

ACEC2021-15901

پیش بینی غلظت آلاینده های هوا با استفاده از شبکه عصبی ترکیبی همراه با بهینه ساز NSGA-II

حسین جلالی^۱، فرشید کی نیا^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده انرژی، گرایش تکنولوژی انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

ایمیل نویسنده مقاله : hossein.jalali11@gmail.com

^۲ دانشیار گروه مدیریت و بهینه سازی انرژی، دانشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

ایمیل نویسنده مسئول : f.keynia@kgut.ac.ir

چکیده

آلودگی هوا از مسائل مهم زیست محیطی محسوب می شود و برای بسیاری از ساکنین شهرهای بزرگ، موضوع نگران کننده ای می باشد. در سال های اخیر به دلیل افزایش جمعیت و استفاده گسترده از سوخت های فسیلی و ازدیاد وسایل حمل و نقل و عوامل مختلف دیگر، غلظت آلاینده های هوا رفته رفته در حال افزایش می باشند که باعث ایجاد آسیب های جدی و جبران ناپذیری در حوزه سلامت انسان و محیط زیست می شود. بنابراین پیش بینی آلاینده های هوا این امکان را فراهم می کند که از قبل در مورد وضعیت آلاینده های هوا آگاهی لازم ایجاد شود و به موقع اقدامات لازم جهت مقابله با آن صورت گیرد. مدل پیشنهادی که در این تحقیق استفاده شده، یک شبکه عصبی ترکیبی است که از ترکیب سه شبکه عصبی پرسپترون چند لایه به صورت سری با الگوریتم های آموزشی متفاوت برای هر شبکه ایجاد شده است. شبکه عصبی ترکیبی به کار گرفته شده در این تحقیق به همراه بهینه ساز چند هدفه با الگوریتم ژنتیک^۱ (NSGA-II) آمده است که هدف از بکارگیری این الگوریتم بهینه سازی، به دست آوردن مقدار بهینه پارامترهای دارای درجه آزادی موجود در قسمت شبکه عصبی ترکیبی و انتخاب ویژگی می باشد. داده های مورد استفاده در این تحقیق، داده های واقعی از آلاینده های هوای نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان می باشند.

واژه های کلیدی : پیش بینی غلظت آلاینده های هوا ناشی از نیروگاه سیکل ترکیبی، شبکه عصبی ترکیبی، انتخاب ویژگی، بهینه ساز چند هدفه با الگوریتم ژنتیک.

مقدمه

هوا یک نیاز اساسی برای بقا و رشد تمامی موجودات روی زمین است و به طور مستقیم بر سلامت و رشد اقتصادی جامعه تاثیر می گذارد. آلاینده های هوا از دو منبع انسانی و طبیعی در جو انتشار می یابند. از جمله عوامل طبیعی که سبب انتشار آلاینده ها به جو می شوند می توان به آتش سوزی جنگل ها و فوران آتشفشان ها اشاره کرد. انتشار آلاینده های ناشی از فعالیت انسانی، به دلیل افزایش جمعیت، رشد صنایع، افزایش تعداد ناوگان حمل و نقل فرسوده به خصوص اتومبیل های شخصی و سوزاندن سوخت های فسیلی، کیفیت هوا در حال کاهش و آلودگی هوا دائماً در حال افزایش می باشد. اکسیدهای نیتروژن NO_x و دی اکسید گوگرد SO_2 مهمترین آلاینده های صنعتی می باشند. تحقیقات صورت گرفته در سال ۲۰۱۳ نشان داد که انتشار این دو آلاینده به ترتیب ۱۰/۵ و ۳/۳ درصد از کل گازهای گلخانه ای در بخش صنعتی را به خود اختصاص می دهند [۱]. گوگرد دی اکسید (SO_2) و اکسیدهای نیتروژن (NO_x) عمدتاً از طریق احتراق سوخت های فسیلی در نیروگاه ها و دیگر تاسیسات صنعتی انتشار می یابند [۲، ۳]. همچنین طبق آخرین آمار وزارت نیرو در سال ۱۳۹۶ میانگین شاخص انتشار گازهای NO_x و SO_2 در بخش نیروگاهی کشور به ترتیب ۲/۲۸۷ گرم بر کیلووات ساعت و ۰/۸۴۱ گرم بر کیلووات ساعت می باشد [۴]. این آلاینده ها اثرات جدی و مخربی بر سلامت انسان و محیط زیست از طریق تغییر آب و هوا، باران اسیدی و تشکیل لایه ازون تروپوسفری^۲ می گذارند [۵-۸]. بنابراین، برای اتخاذ اقدامات پیشگیرانه، ایجاد قوانین کنترل انتشار آلاینده ها، ارزیابی منابع آلودگی هوا در آینده، لازم است که غلظت آلاینده ها در زمان و مکان های مختلف پیش بینی شوند [۹]. روش های متفاوتی جهت پیش بینی آلودگی هوا مورد استفاده قرار گرفته اند. روش های

^۲ Tropospheric ozone

^۱ Non dominated sorting genetic algorithm-II

۳. آماده سازی تمامی داده‌های ورودی نرمال شده با تشکیل ماتریس داده‌های اولیه ورودی و بردار هدف و تفکیک داده‌های آموزش و داده‌های آزمایش جهت انجام عمل پیش‌بینی بر روی داده‌ها.
۴. از آنجا که متغیرهای ورودی نقش بسیار مهمی در عملکرد مدل پیش‌بینی ایفا می‌کنند، بهترین ویژگی‌ها به عنوان متغیرهای ورودی با استفاده از مدل اطلاعات متقابل^{۲۰} در این تحقیق انتخاب می‌شوند.
۵. داده‌های به‌دست آمده از روش انتخاب ویژگی در مرحله قبلی وارد مدل پیشنهادی شده و آموزش داده‌ها و عمل پیش‌بینی بر روی داده‌ها انجام می‌گیرد. مدل پیشنهادی شامل یک شبکه عصبی ترکیبی^{۲۱} همراه با الگوریتم بهینه سازی ژنتیک چند هدفه که هدف از بکارگیری این الگوریتم بهینه سازی، بهینه کردن پارامترهای تاثیر گذار در روند پیش‌بینی که در قسمت انتخاب ویژگی و شبکه عصبی ترکیبی وجود دارند، می‌باشد. همچنین به معرفی هر کدام از شبکه عصبی ترکیبی و الگوریتم ژنتیک چندهدفه و نحوه بکارگیری آن‌ها با یکدیگر پرداخته می‌شود.
۶. سپس به تحلیل و بررسی نتایج خروجی از مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود تا کارایی مدل پیشنهادی به وضوح مشاهده شود.

منطقه مورد مطالعه و داده‌های آلودگی

نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان در کیلومتر ۳ جاده باغین و در کیلومتر ۲۰ جاده کرمان - رفسنجان، با مختصات جغرافیایی "۱۱'۱۲'۳۰" شمالی و "۲۸'۴۷'۵۶" شرقی، یکی از نیروگاه‌های ایران از نوع سیکل ترکیبی با ظرفیت تولید ۱۹۱۲ مگاوات است که شامل ۸ واحد گازی ۱۵۹ مگاواتی و ۴ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی در زمینی به مساحت ۱۲۰ هکتار که ۶۰ هکتار از این مساحت فضای سبز است [۲۶]. شکل ۱ مکان قرارگیری نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان را نشان می‌دهد.

آمار^۲، یکی از این روش‌ها است که به طور عمده رابطه آماری بین غلظت آلاینده‌های هوا و داده‌های هواشناسی تاثیر گذار بر غلظت آلاینده‌های هوا با استفاده از روش‌های آماری-ریاضی ایجاد می‌کنند. مدل‌های آماری که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل مدل‌های سری زمانی^۴ و مدل‌های رگرسیون^۵ هستند [۱۰]. روش سری‌های زمانی یک روش پیش‌بینی سنتی است. چهار مدل سری‌های زمانی مانند اتورگرسیون^۶، میانگین متحرک^۷، اتورگرسیون میانگین متحرک^۸ و اتورگرسیون میانگین متحرک یکپارچه^۹ به طور گسترده در پیش‌بینی آلودگی هوا استفاده می‌شوند [۱۱، ۱۲]. مدل‌های رگرسیونی که برای پیش‌بینی آلودگی هوا بکار می‌روند شامل مدل رگرسیون گام‌به‌گام^{۱۰}، مدل رگرسیون مولفه اصلی^{۱۱}، مدل رگرسیون خطی چندگانه^{۱۲}، و غیره هستند [۱۳، ۱۴]. روش دیگر پیش‌بینی آلودگی هوا، با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی^{۱۳} و روش‌های یادگیری ماشین^{۱۴} است. با توسعه مداوم مدل‌های هوش مصنوعی و روش‌های یادگیری ماشین، مدل‌های هوشمند مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۵}، جنگل تصادفی^{۱۶}، ماشین بردار پشتیبان^{۱۷} و مدل‌های منطق فازی^{۱۸} و غیره، به دلیل توانایی آن‌ها در مدل‌سازی روابط غیر خطی و عملکرد پیشرفته آن‌ها نسبت به تکنیک‌های آماری به شدت مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [۱۵-۲۱]. دسته مختلفی از شبکه‌های عصبی مصنوعی مانند شبکه عصبی پرسپترون چند لایه^{۱۹} برای مطالعه بر روی پیش‌بینی کیفیت هوا به دلیل توانایی و کارایی بالا در مدل‌سازی مسائل غیر خطی و پیچیده مورد استفاده قرار گرفته است، همچنین به طور گسترده در پیش‌بینی‌های کوتاه مدت و بلند مدت از آن استفاده می‌شود [۲۲-۲۵]. هدف از این تحقیق ارائه‌ی یک مدل توسعه یافته بر پایه شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از داده‌های واقعی آلاینده‌های هوا بدست آمده از نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

نقشه راه و عمده کارهای صورت گرفته در این تحقیق به شرح زیر ارائه شده است:

۱. بررسی منطقه مورد مطالعه و داده‌های آلودگی هوای مربوط به آن
۲. نرمال کردن تمامی داده‌های ورودی به مدل پیشنهادی

^{۱۳} Artificial Intelligence (AI)

^{۱۴} Machine learning (ML)

^{۱۵} Artificial neural networks (ANN)

^{۱۶} Random forest (RF)

^{۱۷} Support vector machines (SVM)

^{۱۸} Fuzzy logic models

^{۱۹} Multilayer perceptron (MLP)

^{۲۰} Mutual Information (MI)

^{۲۱} Hybrid Neural Network (HNN)

^۲ Statistical models

^۴ Time-series models

^۵ Regression models

^۶ Autoregressive model (AR)

^۷ Moving average model (MA)

^۸ Autoregressive moving average (ARMA)

^۹ Autoregressive integrated moving average (ARIMA)

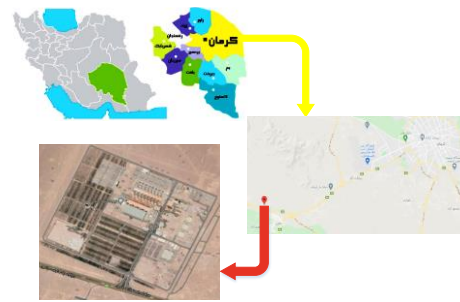
^{۱۰} Stepwise regression model

^{۱۱} Principal component regression model (PCR)

^{۱۲} Multiple linear regression model (MLR)



| | | | | | |
|---------|-----------------|--------|------|------|--------|
| مه | NO ₂ | ۱,۴۶۸۰ | ۰,۰۱ | ۸,۷۶ | ۱,۴۳۰۸ |
| | SO ₂ | ۰,۲۷۴۸ | ۰,۰۴ | ۱,۹۱ | ۰,۱۴۳۵ |
| ژوئن | NO ₂ | ۱,۱۴۹۴ | ۰,۱ | ۱,۹ | ۰,۲۰۱۵ |
| | SO ₂ | ۰,۲۷۶۷ | ۰,۰۶ | ۰,۴۸ | ۰,۰۷۶۷ |
| ژوئیه | NO ₂ | ۱,۰۳۶۳ | ۰,۲۱ | ۲,۱۹ | ۰,۲۶۰۱ |
| | SO ₂ | ۰,۳۲۶۸ | ۰,۰۶ | ۲,۲۶ | ۰,۲۷۸۴ |
| اوت | NO ₂ | ۱,۱۱۲۶ | ۰,۷۱ | ۱,۵۵ | ۰,۱۷۱۲ |
| | SO ₂ | ۰,۲۷۹۲ | ۰,۱۱ | ۰,۴۳ | ۰,۰۷۳۱ |
| سپتامبر | NO ₂ | ۱,۰۷۸۲ | ۰,۰۱ | ۱,۶۶ | ۰,۳۰۹۴ |
| | SO ₂ | ۰,۲۷۷۵ | ۰,۱۱ | ۰,۴۸ | ۰,۰۶۸۹ |



شکل ۱. موقعیت نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان

داده های آلودگی جمع آوری شده از نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان به دو مجموعه داده متفاوت تقسیم بندی شده اند. مدل پیشنهادی ارائه شده در این تحقیق بر روی هر دو مجموعه از داده ها به صورت جداگانه تست شده و نتایج آن به دست آمده است. مجموعه اولی (دسته الف) و مجموعه دومی (دسته ب) نام گذاری شده اند، که در هر کدام از آن ها، داده های متفاوتی دارند. هر کدام از این مجموعه داده ها شامل داده های آلودگی نیتروژن دی اکسید NO₂، گوگرد دی اکسید SO₂، سرعت باد و دمای هوا می باشند که برای پنج ماه از سال ۲۰۱۹ (از ماه می تا سپتامبر) با دوره ی زمانی ۳ ساعته ثبت شده اند. بنابراین برای هر ماه عمل پیش بینی به صورت جداگانه اجرا خواهد شد. همچنین برای هر ماه چهار نوع داده ی ذکر شده شامل داده های سرعت باد، دمای هوا و گازهای آلاینده NO₂ و SO₂ به عنوان داده های ورودی به مدل پیشنهادی جهت پیش بینی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. در جدول های زیر تمامی اطلاعات آماری مربوط به داده های آلودگی هوا نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان برای هر دو دسته (الف و ب) و برای تمامی ماه های ذکر شده شامل میانگین، کمینه، بیشینه و انحراف معیار به دست آمده است.

جدول ۱. اطلاعات آماری مربوط به داده های دسته الف

| انحراف معیار | بیشینه | کمینه | میانگین | آلاینده | ماه |
|--------------|--------|-------|---------|-----------------|---------|
| ۰,۲۱۹۳ | ۲,۰۲ | ۰,۷۳ | ۱,۲۱۷۴ | NO ₂ | مه |
| ۰,۰۷۹۱ | ۰,۴۳ | ۰,۱۱ | ۰,۲۶۷۲ | SO ₂ | |
| ۰,۲۰۰۴ | ۱,۸۴ | ۰,۴ | ۱,۲۲۱۰ | NO ₂ | ژوئن |
| ۰,۰۷۷۲ | ۰,۴۸ | ۰,۱۱ | ۰,۲۷۸۰ | SO ₂ | |
| ۰,۲۳۳۳ | ۱,۷۳ | ۰,۲۶ | ۱,۰۱۷۶ | NO ₂ | ژوئیه |
| ۰,۰۷۵۶ | ۰,۴۳ | ۰,۱۱ | ۰,۲۸۱۲ | SO ₂ | |
| ۰,۱۶۵۳ | ۱,۴۷ | ۰,۶۹ | ۱,۱۱۶۳ | NO ₂ | اوت |
| ۰,۰۷۹۵ | ۰,۴۳ | ۰,۰۶ | ۰,۲۷۷۶ | SO ₂ | |
| ۰,۱۹۴۶ | ۱,۶۸ | ۰,۷۴ | ۰,۱۵۵۶ | NO ₂ | سپتامبر |
| ۰,۰۶۹۳ | ۰,۴۳ | ۰,۰۶ | ۰,۰۵۴۹ | SO ₂ | |

جدول ۲. اطلاعات آماری مربوط به داده های دسته ب

| انحراف معیار | بیشینه | کمینه | میانگین | آلاینده | ماه |
|--------------|--------|-------|---------|---------|-----|
|--------------|--------|-------|---------|---------|-----|

نرمال کردن داده ها

به طور کلی عملیات نرمال سازی قبل از بسیاری از الگوریتم های پیش بینی مانند شبکه های عصبی بایستی انجام بگیرد تا ابعاد مختلف به صورت عادلانه توسط الگوریتم بررسی شوند و تاثیر یکی بیشتر از بقیه نباشد. نرمال سازی داده ها در این تحقیق بین ۰ و ۱ با استفاده از رابطه ۱ صورت می گیرد.

$$PN_i = \frac{P_i - \min(P_i)}{\max(P_i) - \min(P_i)} \quad [1,0] \quad (1)$$

PN_i داده آلودگی نرمال شده ی نام و P_i داده آلودگی اولیه نام و $i = 1, 2, \dots, n$ می باشند، که n تعداد کل داده های آلودگی ماه مورد مطالعه می باشد.

آماده سازی داده های آلودگی

منظور از آماده سازی داده های آلودگی هوا، در واقع ساختن ماتریس داده های ورودی اولیه و بردار هدف جهت ورود به شبکه عصبی و آموزش دادن آن ها و انجام عمل پیش بینی بر روی این داده ها می باشد که به ترتیب در بردار هدف (۲) و ماتریس داده های ورودی اولیه (۳) مشاهده می شوند. دقت شود که در این تحقیق از چهار نوع داده استفاده شده است که شامل داده های سرعت باد با نماد (W)، دمای هوا با نماد (T)، نیتروژن دی اکسید با نماد (N) و گوگرد دی اکسید با نماد (S) می باشند، در نتیجه به ازای هر نوع از این داده ها باید ماتریس داده های اولیه ایجاد شود و همچنین نوع داده های بردار هدف نیز باید بر اساس نوع آلاینده ای که می خواهیم عمل پیش بینی روی آن صورت گیرد شامل نیتروژن دی اکسید یا گوگرد دی اکسید، ایجاد می شود. بردار هدف در واقع همان داده های آلودگی ساعات بعدی است و هر سطر از ماتریس داده های ورودی اولیه یک متغیر ورودی (IV)^{۲۲} می باشد، که شماره متغیر ورودی معرف داده های ساعت قبل از بردار هدف می باشد. به عنوان مثال IV₁ معرف داده های یک ساعت قبل داده های بردار هدف است و IV_i معرف داده های i ساعت قبل داده های بردار هدف می باشد. در نتیجه هر سطر از ماتریس داده های ورودی اولیه، میزان شیفت به ساعات قبل یا همان شیفت به عقب^{۲۳} نسبت به

^{۲۲} Back Shift (BS)

^{۲۳} Input Variable (IV)

تمرکز مسئله انتخاب ویژگی بر روی یافتن یک زیرمجموعه از ورودی-های ارزنده می‌باشد. در حقیقت این عمل منجر به بهبود عملکرد یادگیری، کاهش پیچیدگی محاسباتی، کاهش فضای ذخیره سازی و ساخت مدلی بهتر با قابلیت تعمیم می‌شود. در این بخش به معرفی روشی برای فیلتر کردن داده‌ها در دو مرحله بر مبنای معیار اطلاعات متقابل (MI) که این روش مبتنی بر تابع آنتروپی می‌باشد و توضیحات کافی در مورد این روش در مقالات [۲۷, ۲۸] داده شده است.

۱. فیلتر داده‌های کم اثر: با کمک معیار اطلاعات متقابل به محاسبه میزان همبستگی بین مؤلفه‌های متغیر ورودی (IV) و مؤلفه‌های بردار هدف پرداخته می‌شود.
۲. فیلتر داده‌های تکراری: با کمک معیار اطلاعات متقابل به محاسبه همبستگی بین متغیرهای ورودی پرداخته می‌شود.

فیلتر داده‌های کم اثر

فرض کنید $S_{total} = \{IV_1, IV_2, IV_3, \dots, IV_{i^*}\}$ مجموعه‌ای از ویژگی‌ها یا همان متغیرهای ورودی که نامزدهای ورودی به قسمت انتخاب ویژگی هستند و γ نیز بردار هدف باشد. در این صورت برای هر ویژگی $IV_m \in S_{total}$ که $m = 1, 2, 3, \dots, (i^* * i)$ ، معیار MI آن با بردار هدف (γ) به صورت $MI(IV_m, \gamma)$ نشان داده می‌شود و طریقه محاسبه آن براساس محاسبه توضیح احتمالی مشترک $P(IV_m, \gamma)$ و توزیع احتمالی مستقل $P(IV_m)$ و $P(\gamma)$ می‌باشد. توجه شود که هر چقدر معیار $MI(IV_m, \gamma)$ بزرگ باشد، نشان دهنده همبستگی بالای متغیرهای ورودی (IV_m) و بردار هدف (γ) می‌باشد. برای تعیین مقدار بهینه میزان همبستگی بین این دو ویژگی از پارامتر TH_1 که آستانه فیلتر داده‌های کم اثر نام دارد، استفاده می‌شود.

$$MI(IV_m, \gamma) \geq TH_1 \quad (5)$$

معادله (۵) بیان می‌کند که فقط ویژگی‌هایی که دارای همبستگی بزرگتر یا مساوی TH_1 هستند حق عبور از این فیلتر را دارند و بقیه آن‌ها به دلیل کم اثر بودن حذف می‌شوند. نحوه بدست آوردن مقدار بهینه TH_1 در این تحقیق از طریق روش بهینه سازی ژنتیک چند هدفه می‌باشد که در قسمت‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.

فیلتر افزونگی یا داده‌های تکراری

بعد از این که از مجموعه S_{total} ، متغیرهای ورودی کم‌اثر در مرحله قبلی فیلتر شدند، فرض کنید که متغیرهای ورودی باقیمانده در مجموعه S_1 قرار دارند که $S_1 \subset S_{total}$ می‌باشد. در این مرحله نیز برای هر $IV_m, IV_n \in S_1$ ، معیار MI آن برای متغیر ورودی به نام m با متغیر ورودی به نام n که $m \neq n$ است به صورت $MI(IV_m, IV_n)$ نشان داده می‌شود و طریقه محاسبه آن بر اساس توزیع احتمال مشترک $P(IV_m, IV_n)$ و توزیع احتمال مستقل $P(IV_m)$ و $P(IV_n)$

داده‌های بردار هدف را نشان می‌دهد، بنابراین چون از چهار نوع داده استفاده شده است در نتیجه $BS = 4 * i$ می‌باشد، همچنین تعداد متغیرهای ورودی به اندازه $IV = 4 * i$ می‌باشد در نتیجه $BS = IV$ است. ستون‌های ماتریس داده‌های ورودی اولیه و بردار هدف معرف نمونه‌های آموزشی^{۲۴} هستند. در این تحقیق پیش بینی آلودگی هوا برای هر ماه به صورت جداگانه صورت گرفته است، در نتیجه برای هر ماه باید ماتریس داده‌های ورودی اولیه و بردار هدف تشکیل شود. لازم است که تعداد کل نمونه‌های انتخاب شده برای هر ماه، بزرگتر یا مساوی مجموع نمونه‌های آموزشی (TS) و میزان شیفت به ساعات قبل (BS) باشد همان طور که در رابطه (۴) مشاهده می‌شود.

$$\text{Target}_{i^*j}(y) = [x_{h-(j-1)} \dots x_{h-2} \ x_{h-1} \ x_h] \quad (2)$$

$$\text{InputMatrix}_{(BS^*TS) \text{ or } ((i^*)^*j)} = \begin{bmatrix} IV_1 & W_{h-(j-1)} & \dots & W_{h-2} & W_{h-1} & W_h \\ IV_2 & W_{h-(j-1)} & \dots & W_{h-2} & W_{h-1} & W_h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ IV_{i^*} & W_{h-(j-1)} & \dots & W_{h-2} & W_{h-1} & W_h \\ IV_{i^*+1} & T_{h-(j-1)} & \dots & T_{h-2} & T_{h-1} & T_h \\ IV_{i^*+2} & T_{h-(j-1)} & \dots & T_{h-2} & T_{h-1} & T_h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ IV_{i^*+i} & T_{h-(j-1)} & \dots & T_{h-2} & T_{h-1} & T_h \\ IV_{i^*+i+1} & N_{h-(j-1)} & \dots & N_{h-2} & N_{h-1} & N_h \\ IV_{i^*+i+2} & N_{h-(j-1)} & \dots & N_{h-2} & N_{h-1} & N_h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ IV_{i^*+i+i} & N_{h-(j-1)} & \dots & N_{h-2} & N_{h-1} & N_h \\ IV_{i^*+i+i+1} & S_{h-(j-1)} & \dots & S_{h-2} & S_{h-1} & S_h \\ IV_{i^*+i+i+2} & S_{h-(j-1)} & \dots & S_{h-2} & S_{h-1} & S_h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ IV_{i^*+i+i+i} & S_{h-(j-1)} & \dots & S_{h-2} & S_{h-1} & S_h \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$n \geq TS + BS \quad (4)$$

n تعداد کل داده‌های موجود برای هر یک از ماه‌ها، که در این تحقیق مقدار n به طور میانگین ۱۹۵ و مقدار BS و TS برای هر نوع داده به ترتیب i و j می‌باشند. TS نمونه‌های آموزشی، BS میزان شیفت به عقب، x_{h-1} داده ساعت h ام، x_{h-1} داده ساعت $h-1$ ام. برای انجام عمل پیش‌بینی بر روی داده‌ها، لازم است که داده‌های موجود در ماتریس داده‌های ورودی اولیه و بردار هدف را به دو دسته، داده‌های آموزشی و داده‌های آزمایشی تقسیم بندی کرد. بنابراین از آنجا که برای هر ماه به طور میانگین ۱۹۵ داده در اختیار است، پس در این تحقیق ۱۳ داده را به عنوان داده‌های آزمایشی و بقیه داده‌ها یعنی ۱۸۲ داده دیگر را به عنوان داده‌های آموزشی در نظر گرفته شده اند. داده‌های آزمایشی یا به اصطلاح داده‌های تست، داده‌هایی هستند که وارد شبکه عصبی نمی‌شوند و عمل آموزش روی آن‌ها صورت نمی‌گیرد، بلکه صرفاً جهت تست کردن دقت آموزش داده توسط شبکه عصبی و محاسبه خطای آموزش از آن‌ها استفاده می‌شود.

انتخاب ویژگی

همان طور که در ماتریس داده‌های ورودی اولیه (۳) دیده می‌شود، این ماتریس دارای داده‌های بسیار زیاد می‌باشد که وارد کردن این داده‌ها به طور مستقیم به قسمت پیش‌بینی یک عمل کاملاً غیر اصولی است، زیرا در بین این داده‌ها قطعاً یک سری داده‌های غیر موثر و تکراری وجود دارند که وارد کردن آن‌ها به قسمت پیش‌بینی باعث کاهش دقت و افزایش خطای پیش‌بینی می‌شود.

^{۲۴} Training Samples (TS)

تک شبکه عصبی می‌باشد. به همین علت در این تحقیق از شبکه عصبی ترکیبی، متشکل از سه شبکه عصبی متوالی که هر شبکه دارای ساختار شبکه عصبی پیش خور^{۲۵} از نوع پرسپترون چند لایه (MLP) که هر شبکه دارای الگوریتم یادگیری به خصوصی می‌باشد، استفاده شده و این شبکه عصبی پیشنهادی به خوبی از عهده محدودیت موجود در آموزش بر می‌آید. در ساختار شبکه MLP، تعداد نورون‌های لایه ورودی و لایه پنهان و لایه خروجی برای هر شبکه از شبکه عصبی پیشنهادی، یکسان در نظر گرفته شده، دقت شود که در ساختار MLP می‌توان از چند لایه پنهان استفاده کرد ولی در این تحقیق از یک لایه پنهان در هر شبکه استفاده شده است. تعداد نورون‌های لایه پنهان N_H در هر شبکه بر خلاف تعداد نورون‌های لایه ورودی و لایه خروجی که مقدار ثابت و مشخصی دارند، می‌توان هر مقداری به آن اختصاص داد. در واقع تعداد نورون‌های لایه پنهان (N_H) از نوع پارامتر دارای درجه آزادی می‌باشد که برای انتخاب بهینه‌ترین مقدار برای آن، از روش بهینه سازی ژنتیک چند هدفه استفاده می‌شود که در قسمت‌های بعدی توضیح داده شده است.

نامزدهای ورودی به شبکه عصبی ترکیبی همان مؤلفه‌های انتخاب شده در قسمت انتخاب ویژگی که در واقع همان ماتریس داده‌های ورودی ثانویه می‌باشند. دقت شود که تمامی شبکه‌های عصبی مورد استفاده در شبکه عصبی پیشنهادی، دارای یک خروجی هستند که در واقع همان مقدار آلودگی پیش‌بینی شده برای ساعت آینده می‌باشد. از هر شبکه عصبی موجود در شبکه عصبی ترکیبی، وزن‌ها و بایاس‌های آن شبکه به شبکه‌ی بعدی منتقل می‌شوند، به عبارت دیگر هر شبکه عصبی، دانش کسب شده و ذخیره شده در وزن‌ها و بایاس‌های خود را به شبکه عصبی بعدی منتقل می‌کند. بنابراین می‌توان فرآیند آموزش خود را از نقطه پایان شبکه عصبی قبلی آغاز کند. فقط اولین شبکه عصبی موجود در شبکه عصبی ترکیبی باید با مجموعه مقادیر اولیه وزن‌ها و بایاس‌های تصادفی شروع شود و بقیه شبکه‌های عصبی، وزن‌ها و بایاس‌های آموزش دیده‌ی شبکه عصبی قبل از خود را دریافت می‌کنند، که این کار موجب کاهش محدودیت در آموزش و عملکرد بهتر شبکه عصبی در روند آموزش می‌شود.

هر شبکه عصبی موجود در شبکه عصبی ترکیبی، دارای الگوریتم آموزشی مختص به خود آن شبکه عصبی می‌باشد که فرآیند آموزش بر روی داده‌ها را انجام می‌دهد، در این تحقیق ترتیب استفاده کردن از این الگوریتم‌ها به صورت: LM^{26} ، $BFGS^{27}$ و LM می‌باشد که به لحاظ قدرتمند بودن الگوریتم LM در دو مرحله از آن استفاده شده و در ابتدا و انتهای شبکه عصبی ترکیبی قرار داده شده است، همچنین هر کدام از این الگوریتم‌ها روش‌های آموزشی متفاوتی را دنبال می‌کنند که قرارگیری هر کدام از آن‌ها با ترتیب ذکر شده، منجر به بهبود عملکرد کلی شبکه عصبی ترکیبی و کسب نتایج بهتر می‌شود [۲۹].

می‌باشد. در واقع در این قسمت همبستگی هر سطر از ماتریس داده‌های عبوری از مرحله اول با سطر دیگر بررسی می‌شود و بر اساس معیار MI تصمیم گیری صورت می‌گیرد.

هرچقدر که معیار $MI(IV_m, IV_n)$ بزرگ باشد، نشان دهنده همبستگی زیاد و تشابه ویژگی‌ها نسبت به یکدیگر می‌باشند که در این مرحله نیاز است که یکی از این ویژگی‌ها یا همان متغیر ورودی حذف شود، زیرا به دو ویژگی شبیه به همدیگر احتیاجی نیست و با حذف ویژگی‌های مشابه، علاوه بر کاهش ابعاد داده‌ها، باعث عملکرد بهتر مرحله پیش‌بینی و بدست آوردن نتایج بهتر و دقیق‌تر می‌شود. برای تعیین مقدار بهینه میزان همبستگی بین ویژگی‌ها از پارامتر TH_2 که آستانه فیلتر داده‌های تکراری نام دارد، استفاده می‌شود.

$$MI(IV_m, IV_n) \geq TH_2 \quad (6)$$

معادله (۶) بیان می‌کند که با بزرگ‌تر یا مساوی بودن معیار $MI(IV_m, IV_n)$ از TH_2 یکی از ویژگی‌ها باید حذف شود و فقط یکی از آن دو ویژگی حق عبور از این فیلتر را دارد. نحوه‌ی بدست آوردن مقدار بهینه TH_2 در این تحقیق از طریق روش بهینه سازی ژنتیک چند هدفه می‌باشد که در قسمت‌های بعدی توضیح داده می‌شود. در نهایت متغیرهای ورودی باقیمانده بعد از دو مرحله فیلتر در مجموعه S_2 قرار می‌گیرند که $S_2 \subset S_1$ می‌باشد و داده‌های موجود در مجموعه S_2 به عنوان خروجی الگوریتم انتخاب ویژگی و ورودی به مرحله بعد که همان شبکه عصبی ترکیبی است، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به این نکته باید توجه کرد که پارامترهای TH_1 و TH_2 از نوع پارامترهای دارای درجه آزادی می‌باشند که برای انتخاب بهینه‌ترین مقدار برای آن‌ها، از روش بهینه سازی ژنتیک چند هدفه استفاده می‌شود. همچنین هر چه مقدار TH_1 افزایش یابد، داده‌های بیشتری حذف می‌شوند و باند عبور باریکتر می‌شود و فقط داده‌هایی که بیشترین اثر را دارند و همبستگی آن‌ها نسبت به هدف، در بالاترین حد باشند از این باند عبور می‌کنند. همچنین هر چه مقدار TH_2 کمتر شود، داده‌های بیشتری حذف می‌شوند و باند عبور باریکتر می‌شود و فقط داده‌هایی که کمترین شباهت را با هم دارند از این باند عبور می‌کنند، در واقع داده‌هایی که شبیه هم هستند را به عنوان داده‌های اضافی و تکراری، آن‌ها را فیلتر می‌کند.

شبکه عصبی ترکیبی

همان طور که قبلاً گفته شد، مقادیر آلودگی هوا، مقادیر غیر خطی و متغیر با زمان می‌باشند و برای یک شبکه عصبی، ایجاد نگاشت صحیح بین ورودی و خروجی از چنین سیگنالی در تمام دوره‌های زمانی بسیار مشکل است و این امر به دلیل وجود محدودیت در آموزش برای یک

^{۲۷} Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shannon(BFGS)

^{۲۵} Feed-forward Neural Network (FNN)

^{۲۶} Levenberg-Marquardt (LM)

هر متغیر تصمیم محدود به گرفتن مقداری بین حد پایینی $X_i^{(L)}$ و حد بالایی $X_i^{(U)}$ است. این حدود، فضای متغیر تصمیم را شکل می‌دهند. همچنین f برداری از m تابع هدف است:

$$f(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)]^T \quad (13)$$

$g_j(X)$ و $h_k(X)$ قیدهای تابع هدف و J تعداد قیدهای نامعادله و K تعداد قیدهای معادله هستند.

با ارتقای الگوریتم NSGA، نخبه گرایی دسته بندی یا مرتب سازی نامغلوب در الگوریتم ژنتیک با عنوان NSGA-II پیشنهاد داده شد [31-33]. در ادامه مفاهیم به کار رفته در این الگوریتم به طور مختصر توضیح داده شده است.

مفهوم غلبه

جواب $X^{(1)}$ بر جواب $X^{(2)}$ غالب است، اگر هر دو شرط زیر برقرار باشند:

۱. جواب $X^{(1)}$ در هیچ یک از اهداف بدتر از $X^{(2)}$ نباشد.

۲. جواب $X^{(1)}$ دست کم در یک هدف بهتر از جواب $X^{(2)}$ باشد.

از آنجا که مفهوم غلبه، زمینه مقایسه جواب‌ها با اهداف چندگانه را مهیا می‌سازد، معمولاً در روش‌های بهینه‌یابی چند هدفه برای جست‌جو جواب‌های نامغلوب به کار می‌رود.

مجموعه نامغلوب

از بین مجموعه جواب‌های P ، مجموعه جواب‌های نامغلوب P' ، آن‌هایی هستند که مغلوب هیچ یک از اعضای مجموعه P نیستند.

الگوریتم انتخاب بهترین جواب نامغلوب

با فرض این که هر جواب i دارای یک رتبه نامغلوب (r_i) و یک فاصله ازدحام محلی (d_i) باشد، جواب i در رقابت با جواب j صرفاً در صورتی انتخاب می‌شود که شرایط زیر برقرار باشند:

۱. جواب i رتبه بهتری نسبت به j داشته باشد، یعنی $r_i < r_j$.

۲. حال اگر جواب‌های i و j در یک رتبه قرار گرفته باشند آنگاه باید جواب i فاصله ازدحام بهتری نسبت به j داشته باشد،

$$\text{یعنی } d_i > d_j$$

فاصله ازدحام

برای بدست آوردن تخمینی از چگالی جواب‌های موجود در کنار یک جواب خاص مانند جواب i در جمعیت شکل ۶، میانگین فاصله‌ای از دو جواب واقع در طرفین جواب i برای هر کدام از M تابع هدف محاسبه می‌شود. مقدار عددی d_i که از محاسبه تقریبی فضای مکعبی

یادگیری شبکه عصبی، براساس خطای ایجاد شده در طول فرآیند آموزش است. بنابراین، خطای شبکه به صورت مربع میانگین اختلاف بین مقادیر خروجی هدف و خروجی پیش بینی شده توسط شبکه عصبی تعریف می‌شود. این خطای میانگین مربع^{۲۸} (MSE) شبکه عصبی است که در طول فرآیند آموزش شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور معمول، خطای میانگین مربع طبق رابطه (۷) به عنوان خطای یادگیری شبکه و مقادیر وزنی شبکه عصبی برای رسیدن به هدف یادگیری مورد نظر، بروزسانی می‌شوند. خطاهای آموزش دیگری نیز برای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش بینی مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل میانگین قدرمطلق خطا^{۲۹} (MAE) طبق رابطه (۸)، جذر خطای میانگین مربع^{۳۰} (RMSE) طبق رابطه (۹) و خطای درصدی میانگین قدرمطلق^{۳۱} (MAPE) طبق رابطه (۱۰) می‌باشند.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{iACT} - x_{iFOR})^2 \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{iACT} - x_{iFOR}| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{iACT} - x_{iFOR})^2} \quad (9)$$

$$MAPE = 100 * \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|(x_{iACT} - x_{iFOR})|}{x_{iACT}} \quad (10)$$

x_{iFOR} داده آلودگی نام پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی ترکیبی و x_{iACT} داده آلودگی نام بردار هدف یا همان مقدار واقعی که باید به آن رسید.

بهینه سازی چند هدفه با الگوریتم NSGA-II

هنگامی که مسئله بهینه سازی بیش از یک تابع هدف را دربر گیرد، یافتن یک یا چند جواب بهینه را می‌توان بهینه سازی چند هدفه نامید. در چنین شرایطی، پیدا کردن یک جواب که همه اهداف را بهینه کند تقریباً ناممکن است و سعی می‌شود مجموعه‌ای از جواب‌ها با بهینه سازی نسبی در همه اهداف یافت شود، درواقع هدف یافتن جواب‌های بهینه پارتو است [30].

فرم کلی مسائل چند هدفه بدین صورت می‌باشند:

$$\min / \max_m f_m(X) \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

subject to :

$$g_j(X) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, J$$

$$h_k(X) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$X_i^{(L)} \leq X \leq X_i^{(U)} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

X برداری از n متغیر تصمیم است:

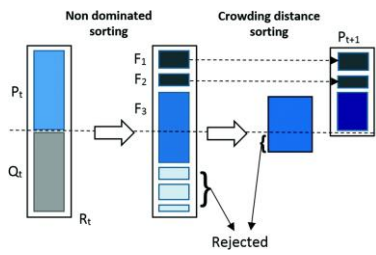
$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (12)$$

^{۳۰} Root Mean Square Error (RMSE)

^{۳۱} Mean Absolute Percent Error (MAPE)

^{۲۸} Mean Squared Error (MSE)

^{۲۹} Mean absolute error (MAE)



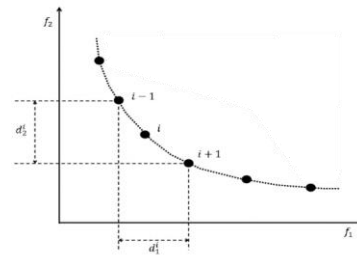
شکل ۳. نحوه عملکرد الگوریتم NSGA-II

هدف از بکارگیری الگوریتم NSGA-II در این تحقیق به دست آوردن بهترین مقدار در محدوده تعیین شده برای پارامترهای موجود در مرحله انتخاب ویژگی مانند تعیین مقدار ضرایب آستانه موثر بودن TH_1 و آستانه شباهت TH_2 و همچنین تعیین مقدار پارامتر موجود در شبکه عصبی ترکیبی مانند تعداد نورون های لایه پنهان N_H در هر یک از شبکه عصبی MLP مورد استفاده قرار می گیرد. توابع هدفی که قرار است با استفاده از این الگوریتم کمینه شوند، شامل جذر خطای میانگین مربع (RMSE) طبق رابطه (۹) و خطای درصدی میانگین قدرمطلق (MAPE) طبق رابطه (۱۰) می باشند، که تعیین مقادیر پارامترهای ذکر شده با توجه به کمترین مقدار به دست آمده از این توابع هدف می باشند.

مدل پیشنهادی و نتایج حاصل از آن

در این تحقیق سعی شده که راه حلی برای مشکل محدودیت آموزش یک شبکه عصبی معمولی و همچنین تنظیم پارامترهای تاثیرگذار در روند کاهش خطای پیش بینی همچون TH_1 و TH_2 در قسمت انتخاب ویژگی دو مرحله ای و تعداد نورون های لایه پنهان N_H در قسمت شبکه عصبی ترکیبی ارائه شده است. روش ارائه شده برای حل مشکل محدودیت در آموزش یک شبکه عصبی پرسپترون چندلایه معمولی، استفاده از شبکه عصبی ترکیبی که حاصل ترکیب سه شبکه عصبی پرسپترون چندلایه معمولی به صورت متوالی می باشد. همچنین برای حل مشکل تنظیم پارامترهایی دارای درجه آزادی همچون TH_1 ، TH_2 و N_H از روش بهینه سازی چند هدفه NSGA-II برای پیدا کردن مقدار بهینه هر کدام از این پارامترها و بهبود عملکرد پیش بینی استفاده شده است. شکل ۸ مدل پیشنهادی معرفی شده در این تحقیق قابل مشاهده است. دقت شود که در این تحقیق هر دو آلودگی هوا SO_2 و NO_2 توسط مدل پیشنهادی پیش بینی می شوند.

اطراف جواب i با به کار بردن نزدیک ترین همسایه های آن بدست می آید، فاصله ازدحام نامیده می شود.



شکل ۲. نمایش گرافیکی فاصله ازدحام

$$d_i^1 = \frac{f_1(X_{i+1}) - f_1(X_{i-1})}{f_1^{max} - f_1^{min}} \quad (14)$$

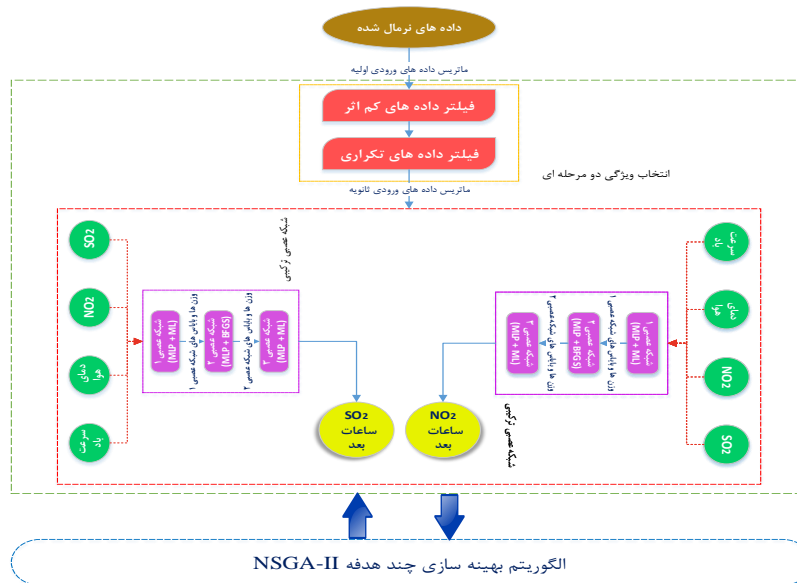
$$d_i^2 = \frac{f_2(X_{i+1}) - f_2(X_{i-1})}{f_2^{max} - f_2^{min}} \quad (15)$$

$$d_i = d_i^1 + d_i^2 \quad (16)$$

X_1 جواب نام، d_i^1 فاصله ازدحام جواب نام در تابع هدف اول، d_i^2 فاصله ازدحام جواب نام در تابع هدف دوم و d_i فاصله ازدحام جواب نام.

نحوه عملکرد و هدف بکارگیری NSGA-II

در این الگوریتم ابتدا جمعیت فرزندان یا Q_t با استفاده از جمعیت والدین یا P_t ساخته می شوند، سپس دو جمعیت با هم ترکیب می گردند و جمعیت R_t با اندازه $2N$ ایجاد می شود. سپس از مرتب سازی نامغلوب برای دسته بندی تمام جمعیت R_t استفاده می شود. پس از ایجاد صف های متفاوت نامغلوب، جمعیت بعدی به ترتیب اولویت از این صف ها پر می شود. پر کردن P_{t+1} با بهترین صف نامغلوب آغاز می گردد و سپس به ترتیب با دومین صف نامغلوب و همین طور تا زمانی که P_{t+1} پر شود. در مورد صف آخر، جواب هایی که دارای فاصله ازدحام بیشتری هستند برای پر کردن P_{t+1} در اولویت قرار دارند. در نهایت جمعیت فرزندان Q_{t+1} از P_{t+1} با استفاده از یک الگوریتم انتخاب بهترین جواب نامغلوب و عملگرهای تقاطع و جهش ایجاد می شوند. در شکل ۷ نحوه عملکرد الگوریتم بهینه سازی چند هدفه NSGA-II به صورت گرافیکی نمایش داده شده است [۳۴].



شکل ۴. مدل پیشنهادی این تحقیق (CNN - NSGA-II)

بهینه‌سازی یعنی RMSE و MAPE، محاسبه شوند و بهینه‌ترین مقدار برای TH_1 ، TH_p و NH به دست آید و تا جایی این عمل تکرار می‌شود که کمینه‌ترین مقدار برای توابع هدف به دست آید. در جدول ۱ مقدار خطاهای آموزش MSE، MAE، RMSE، MAPE به دست آمده از مدل پیشنهادی برای داده‌های دسته الف، همچنین در جدول ۲ مقدار خطاهای آموزش MSE، MAE، RMSE، MAPE به دست آمده از مدل پیشنهادی برای داده‌های دسته ب قابل مشاهده است.

همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد، مدل پیشنهادی برای هر ماه به صورت جداگانه اجرا خواهد شد. بنابراین داده‌های هر ماه پس از اینکه نرمال شدند و فقط نخبه‌ترین داده‌ها از قسمت انتخاب ویژگی عبور کردند، آنگاه وارد شبکه عصبی ترکیبی می‌شوند و آموزش داده‌ها و پیش‌بینی داده‌های آلودگی انجام می‌گیرد. سپس نمونه داده‌های آموزش دیده توسط شبکه عصبی ترکیبی وارد الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه NSGA-II شده تا توابع هدف این الگوریتم

جدول ۱: خطاهای آموزش MSE، MAE، RMSE و MAPE به دست آمده از مدل پیشنهادی برای داده‌های دسته الف

| متغیر خروجی | متغیرهای ورودی | زمان | مقادیر خطای پیش‌بینی | | | |
|-------------|-------------------------------------|---------|----------------------|--------|--------|---------|
| | | | CNN - NSGA-II | | | |
| | | | MSE | MAE | RMSE | MAPE |
| NO_2 | سرعت باد، دمای هوا، NO_2 و SO_2 | مه | ۰/۰۰۲۶ | ۰/۰۴۰۷ | ۰/۰۵۱۰ | ۹/۱۸۶۴ |
| | | ژوئن | ۰/۰۰۳۲ | ۰/۰۴۴۷ | ۰/۰۵۷۳ | ۷/۵۲۹۰ |
| | | ژوئیه | ۰/۰۰۵۸ | ۰/۰۵۵۹ | ۰/۰۷۶۶ | ۱۰/۱۶۴۰ |
| | | اوت | ۰/۰۰۴۰ | ۰/۰۴۵۲ | ۰/۰۶۳۴ | ۶/۷۴۹۸ |
| | | سپتامبر | ۰/۰۰۶۵ | ۰/۰۵۸۲ | ۰/۰۸۰۷ | ۱۲/۲۲۶۰ |
| SO_2 | سرعت باد، دمای هوا، NO_2 و SO_2 | مه | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۰۴۸۲ | ۰/۰۶۷۲ | ۹/۶۰۳۵ |
| | | ژوئن | ۰/۰۰۸۷ | ۰/۰۶۹۵ | ۰/۰۹۰۶ | ۱۷/۲۱۸۹ |
| | | ژوئیه | ۰/۰۱۵۴ | ۰/۰۸۸۸ | ۰/۱۲۳۴ | ۱۶/۰۵۵۴ |
| | | اوت | ۰/۰۱۰۷ | ۰/۰۸۵۵ | ۰/۱۰۳۵ | ۱۵/۴۰۲۰ |
| | | سپتامبر | ۰/۰۱۵۵ | ۰/۰۹۱۳ | ۰/۱۲۴۵ | ۱۵/۲۵۴۶ |

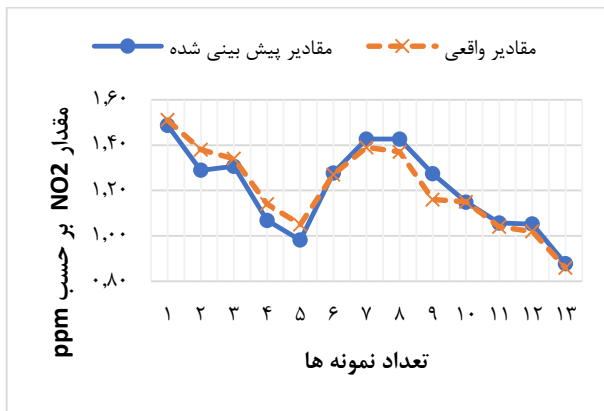
جدول ۲: خطاهای آموزش MSE، MAE، RMSE و MAPE به دست آمده از مدل پیشنهادی برای داده‌های دسته ب

| متغیر خروجی | متغیرهای ورودی | زمان | مقادیر خطای پیش‌بینی | | | |
|-------------|----------------|------|----------------------|--|--|--|
|-------------|----------------|------|----------------------|--|--|--|

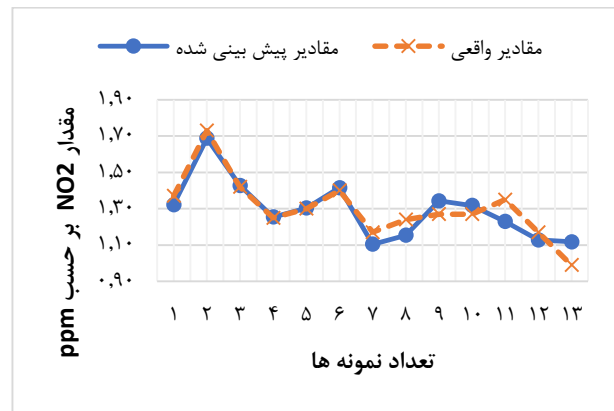


CNN - NSGA_II

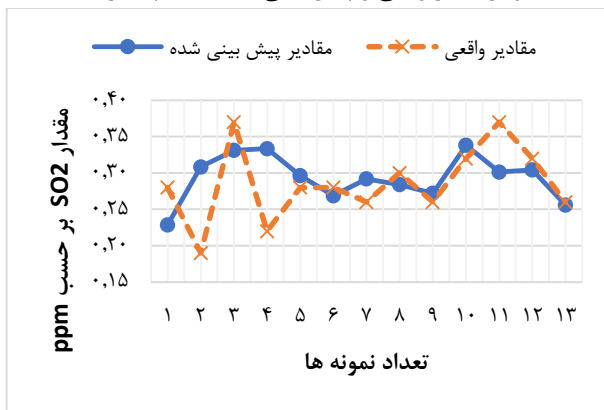
| | | | MSE | MAE | RMSE | MAPE |
|--------|-------------------------------------|---------|----------|--------|--------|---------|
| NO_2 | سرعت باد، دمای هوا، NO_2 و SO_2 | مه | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۱۱۴ | ۰/۰۱۵۶ | ۹/۵۶۲۵ |
| | | ژوئن | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۰۳۳۱ | ۰/۰۴۷۷ | ۵/۶۲۵۴ |
| | | ژوئیه | ۰/۰۰۲۷ | ۰/۰۳۶۳ | ۰/۰۵۲۲ | ۸/۹۲۰۹ |
| | | اوت | ۰/۰۰۷۳ | ۰/۰۵۸۲ | ۰/۰۸۵۷ | ۹/۵۶۰۱ |
| | | سپتامبر | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۲۴۱ | ۰/۰۲۷۳ | ۴/۲۱۵۷ |
| SO_2 | سرعت باد، دمای هوا، NO_2 و SO_2 | مه | ۰/۰۰۰۰۵۴ | ۰/۰۰۵۶ | ۰/۰۰۷۳ | ۱۱/۰۱۸۶ |
| | | ژوئن | ۰/۰۱۴۴ | ۰/۰۹۳۹ | ۰/۱۲۰۲ | ۲۰/۴۷۵۰ |
| | | ژوئیه | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۱۰۸ | ۰/۰۱۲۶ | ۱۱/۱۶۸۴ |
| | | اوت | ۰/۰۱۳۹ | ۰/۰۸۸۱ | ۰/۱۱۸۲ | ۱۶/۸۱۹۶ |
| | | سپتامبر | ۰/۰۱۸۱ | ۰/۱۰۱۴ | ۰/۱۳۴۸ | ۱۹/۶۸۷۶ |



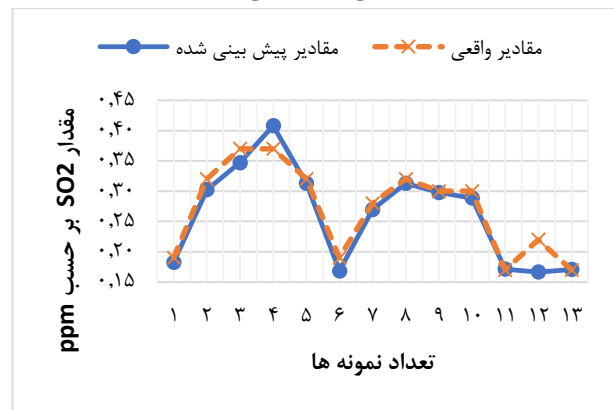
شکل ۶. نمودار مقدار واقعی و پیش بینی شده ماه سپتامبر، دسته الف



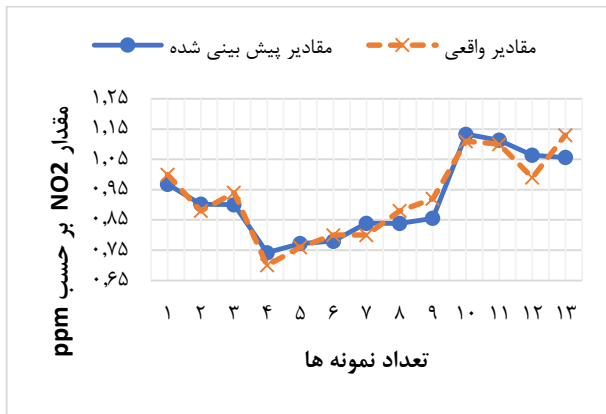
شکل ۵. نمودار مقدار واقعی و پیش بینی شده ماه مه، دسته الف



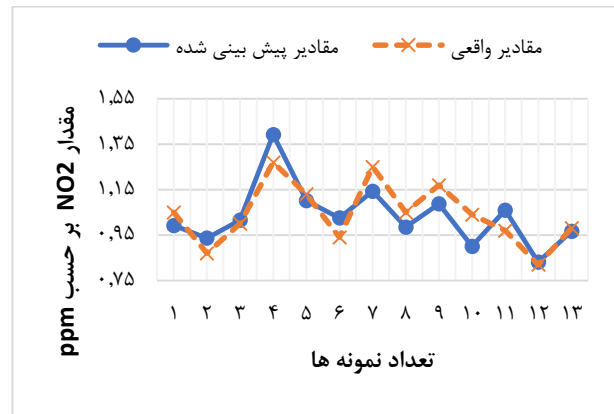
شکل ۸. نمودار مقدار واقعی و پیش بینی شده ماه سپتامبر، دسته الف



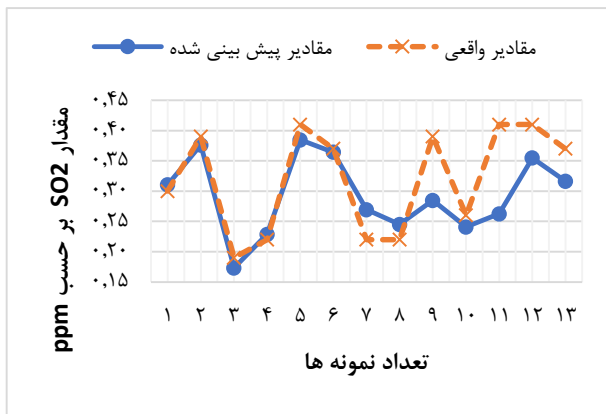
شکل ۷. نمودار مقدار واقعی و پیش بینی شده ماه مه، دسته الف



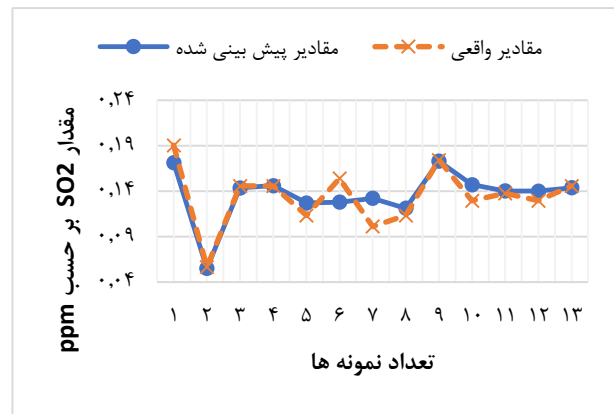
شکل ۱۰. نمودار مقدار واقعی و پیش بینی شده ماه سپتامبر، دسته ب



شکل ۹. نمودار مقدار واقعی و پیش بینی شده ماه مه، دسته ب



شکل ۱۲. نمودار مقدار واقعی و پیش بینی شده ماه سپتامبر، دسته ب



شکل ۱۱. نمودار مقدار واقعی و پیش بینی شده ماه مه، دسته ب

- [2] W. Al-Dahhan and A. A. A. E. Yousif, "Environmental problem from the Combustion of Sulfur in Mishraq Field," *Science Arena Publications Specialty Journal of Chemistry*, vol. 2, no. 2, pp. 10-16, 2017.
- [3] A. Krasner and T. S. Jones, "Cooking with Gas Can Harm Children." [4] "ترازنامه انرژی <https://isn.moe.gov.ir>."
- [5] L. Cox, *Nitrogen oxides (NOx) why and how they are controlled*. Diane Publishing, 1999.
- [6] G. B. Hamra, F. Laden, A. J. Cohen, O. Raaschou-Nielsen, M. Brauer, and D. Loomis, "Lung cancer and exposure to nitrogen dioxide and traffic: a systematic review and meta-analysis," *Environmental health perspectives*, vol. 123, no. 11, pp. 1107-1112, 2015.
- [7] W. J. Lee *et al.*, "Mortality from lung cancer in workers exposed to sulfur dioxide in the pulp and paper industry," *Environmental Health Perspectives*, vol. 110, no. 10, pp. 991-995, 2002.
- [8] C. Vlachokostas *et al.*, "Economic damages of ozone air pollution to crops using combined air quality and GIS modelling," *Atmospheric Environment*, vol. 44, no. 28, pp. 3352-3361, 2010.
- [9] P. Zannetti, *Air pollution modeling: theories, computational methods and available software*. Springer Science & Business Media, 2013.

نتیجه گیری

امروزه آلودگی هوا، به عنوان یک پدیده مهم در سطح جهانی، توجه بیشتری به آن می‌شود. عمدتاً به این دلیل که پیش بینی روزهای آلوده، هم می‌تواند از پیامدهای منفی سلامت جلوگیری کند و هم اطلاعات لازم را برای افزایش آگاهی سیاست گذاران ارائه دهد. شناسایی عوامل تاثیر گذار بر آلودگی هوا و روند تغییرات آنها در طول زمان نقش بسزایی در توسعه مدل های با هدف کاهش آلودگی هوا دارند. مدل پیشنهادی در این مقاله با ترکیب شبکه عصبی ترکیبی و بهینه ساز چند هدفه NSGA-II ایجاد شده است، که سعی در برطرف کردن محدودیت آموزش شبکه‌های عصبی معمولی و همچنین انتخاب مقادیر بهینه برای پارامترهایی دارای درجه آزادی همچون TH_1 ، TH_4 و NH جهت کاهش خطاهای RMSE و MAPE که به عنوان توابع هدف بهینه ساز مورد استفاده قرار گرفته بودند، داشته است.

مراجع

- [1] H. Li, X. Tan, J. Guo, K. Zhu, and C. Huang, "Study on an implementation scheme of synergistic emission reduction of CO2 and air pollutants in China's steel industry," *Sustainability*, vol. 11, no. 2, p. 352, 2019.



- [22] S. M. Cabaneros, J. K. Calautit, and B. R. Hughes, "A review of artificial neural network models for ambient air pollution prediction," *Environmental Modelling & Software*, vol. 119, pp. 285-304, 2019.
- [23] S. Kalantary, A. Jahani, and R. Jahani, "MLR and ANN approaches for prediction of synthetic/natural nanofibers diameter in the environmental and medical applications," *Scientific reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1-10, 2020.
- [24] S. Kalantary, A. Jahani, R. Pourbabaki, and Z. Beigzadeh, "Application of ANN modeling techniques in the prediction of the diameter of PCL/gelatin nanofibers in environmental and medical studies," *RSC advances*, vol. 9, no. 43, pp. 24858-24874, 2019.
- [25] Z. Mosaffaei, A. Jahani, M. A. Z. Chahouki, H. Goshtasb, V. Etemad, and M. Saffariha, "Soil texture and plant degradation predictive model (STPDPM) in national parks using artificial neural network (ANN)," *Modeling Earth Systems and Environment*, vol. 6, no. 2, pp. 715-729, 2020.
- [26] "سایت نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان." <http://www.kpp.co.ir/?q=node/2>
- [27] N. Amjady and F. Keynia, "Day-ahead price forecasting of electricity markets by mutual information technique and cascaded neuro-evolutionary algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 306-318, 2008.
- [28] امجدی، عابدی‌نیا، "پیش‌بینی بار در بازار برق با استفاده از مدل هیبرید شبکه عصبی و الگوریتم بهبود یافته جستجوی گرانشی،" *مدل سازی در مهندسی*, vol. 13, no. 40, pp. 69-77, 2015.
- [29] F. Keynia, "A new feature selection algorithm and composite neural network for electricity price forecasting," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, no. 8, pp. 1687-1697, 2012.
- [30] K. Deb, "Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms: an introduction," in *Multi-objective evolutionary optimisation for product design and manufacturing*: Springer, 2011, pp. 3-34.
- [31] K. Deb and A. Kumar, "Real-coded Genetic Algorithms with Simulated Binary Crossover: Studies on Multimodal and Multiobjective Problems," *Complex Syst.*, vol. 9, 1995.
- [32] K. Deb, M. Mohan, and S. Mishra, "Evaluating the ϵ -domination based multi-objective evolutionary algorithm for a quick computation of Pareto-optimal solutions," *Evolutionary computation*, vol. 13, no. 4, pp. 501-525, 2005.
- [33] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE*
- [10] H. Liu, K. Jin, and Z. Duan, "Air PM2. 5 concentration multi-step forecasting using a new hybrid modeling method: comparing cases for four cities in China," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 10, no. 5, pp. 1588-1600, 2019.
- [11] A. Kumar and P. Goyal, "Forecasting of daily air quality index in Delhi," *Science of the Total Environment*, vol. 409, no. 24, pp. 5517-5523, 2011.
- [12] L. Zhang *et al.*, "Trend analysis and forecast of PM2. 5 in Fuzhou, China using the ARIMA model," *Ecological indicators*, vol. 95, pp. 702-710, 2018.
- [13] A. Donnelly, B. Misstear, and B. Broderick, "Real time air quality forecasting using integrated parametric and non-parametric regression techniques," *Atmospheric Environment*, vol. 103, pp. 53-65, 2015.
- [14] H. Liu *et al.*, "An intelligent hybrid model for air pollutant concentrations forecasting: Case of Beijing in China," *Sustainable Cities and Society*, vol. 47, p. 101471, 2019.
- [15] U. Brunelli, V. Piazza, L. Pignato, F. Sorbello, and S. Vitabile, "Two-days ahead prediction of daily maximum concentrations of SO₂, O₃, PM₁₀, NO₂, CO in the urban area of Palermo, Italy," *Atmospheric Environment*, vol. 41, no. 14, pp. 2967-2995, 2007.
- [16] K.-P. Lin, P.-F. Pai, and S.-L. Yang, "Forecasting concentrations of air pollutants by logarithm support vector regression with immune algorithms," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 217, no. 12, pp. 5318-5327, 2011.
- [17] A. Masih, "Application of ensemble learning techniques to model the atmospheric concentration of SO₂," *Global Journal of Environmental Science and Management*, vol. 5, no. 3, pp. 309-318, 2019.
- [18] R. Raturi and J. Prasad, "Recognition of future air quality index using artificial neural network," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5, no. 03, pp. 2395-0056, 2018.
- [19] S. R. Shams, A. Jahani, M. Moeinaddini, and N. Khorasani, "Air carbon monoxide forecasting using an artificial neural network in comparison with multiple regression," *Modeling Earth Systems and Environment*, vol. 6, no. 3, pp. 1467-1475, 2020.
- [20] O. Taylan, "Modelling and analysis of ozone concentration by artificial intelligent techniques for estimating air quality," *Atmospheric environment*, vol. 150, pp. 356-365, 2017.
- [21] B. Wang and Z. Chen, "A model-based fuzzy set-OWA approach for integrated air pollution risk assessment," *Stochastic environmental research and risk assessment*, vol. 29, no. 5, pp. 1413-1426, 2015.



- transactions on evolutionary computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002.
- [34] C. A. C. Coello, G. B. Lamont, and D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Springer, 2007.

ACEC2021-15952

تحلیل اثرات اجرای برنامه پاسخگویی بار در کنترل پیک مصرف و کاهش خسارت خاموشی

مجتبی ثمره^۱، علیرضا صفرنواده^۲، محمد علی بیجاری^۳، امیرحسین عموحسینی^۴، عرفان عرفانی اصل^۵، سجاد توکلی^۶، دانیال نژادملایری^۷

^۱دفتر مدیریت مصرف، شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان؛ eng.samareh@gmail.com
^۲دفتر مدیریت مصرف، شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان؛ ar.safarnavadeh@gmail.com
^۳ و ^۴ و ^۶ گروه فنی پایش، شرکت پارس پایش زاد نیرو؛ zadniru.co@outlook.com
^۷ بخش الکترونیک، دانشگاه فنی و حرفه ای کرمان؛ dnezhadmalayeri@tvu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش تلاش شد با تحلیل نتایج اجرای طرح پایش پیک مصرف مشترکین، تاثیر آن در تامین برق مداوم، کاهش خاموشی های با برنامه و بی برنامه ناشی از بحران انرژی و در نتیجه کاهش بخشی از خسارت های خاموشی، خصوصاً در بخش صنعت و کشاورزی بررسی شود. به عبارتی با پایش مشترکین و اجرای برنامه پاسخگویی بار و مدیریت مصرف برق، میزان خسارت وارده به مصرف کننده را کاهش داده و با ایجاد همکاری نزدیک با مشترکین کشاورزی و صنعتی، همکاری دوسویه در جهت کاهش خاموشی با برنامه یا بدون برنامه و از طرف دیگر، کاهش خسارات مشترکین در قطع برق صورت پذیرد. این طرح در مجموعه شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان و با همکاری شرکت پارس پایش زاد نیرو به نمایندگی این شرکت در تابستان سال ۱۴۰۰ پیاده سازی شد.

واژه های کلیدی: کاهش خسارت خاموشی، پاسخ گویی بار، مصرف برق، پایش پیک مصرف

مقدمه

قطعی های مکرر برق مشکلات عدیده ای را در بخش های مختلف صنعت، کشاورزی و ... به وجود می آورد. به گونه ای که بخش عظیمی از فعالیت های صنعت مختل شده و به بخش های کشاورزی نیز خسارات زیادی وارد می شود. مدیریت بار مصرف یا مدیریت سمت تقاضا از مهمترین راهکارها به منظور ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا انرژی الکتریکی می باشد از اینرو دارای منافع مشترک بین شرکت های برق و جامعه وجود دارد. یکی از مزایای شبکه هوشمند برق کاهش تقاضا در پیک بار و همچنین آلودگی هوا می باشد و موجب بهبود ضریب بار شبکه در اثر اصلاح منحنی بار

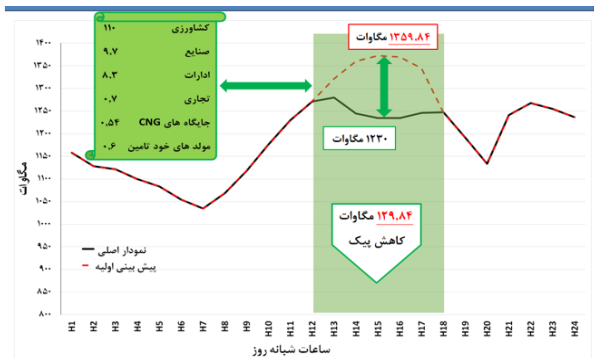
شبکه می گردد. واژه مدیریت مصرف بار (Demand Side Management) نخستین بار در اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی توسط گروهی از محققین به کار گرفته شد. مجموعه DSM دربرگیرنده گستره ای از فعالیت هایی است که از ناحیه شرکت برق و یا دولت به منظور تغییر میزان و یا زمان مصرف برق مشترکین در جهت منافع مشترک جامعه، شرکت برق و مصرف کنندگان طراحی می شود که منافع مشترکین شامل تامین تقاضای برق، کاهش و ثبات قیمت برق و بهبود سطح خدمات رسانی، منافع جامعه شامل کاهش ضایعات زیست محیطی، حفظ منابع، حفاظت از محیط زیست جهانی، حداکثر سازی رفاه اجتماعی و تامین برق مداوم و منافع شرکت برق شامل هزینه سرویس دهی کمتر، بهبود کارایی بهره برداری، ارتقا قابلیت انعطاف، کاهش نیاز به سرمایه گذاری و بهبود سرویس دهی به مشترکین است.

در حقیقت DSM را می توان به عنوان واژه ای که در برگیرنده مفاهیمی همچون مدیریت بار، کارایی انرژی و صرفه جویی انرژی می باشد قلمداد کرد. مدیریت مصرف انرژی با استفاده از روش های صرفه جویی انرژی، تعرفه های برق، تشویق های مالی، سیاست های حکومتی برای تخفیف دادن تقاضای بار پیک به جای توسعه ظرفیت تولید یا تقویت شبکه های انتقال و توزیع انجام می گیرد.

شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان با همکاری گروه فنی پایش پیک شرکت پارس پایش زادنیرو، فرآیند پایش مشترکین جهت کنترل پیک را از ابتدای خرداد ماه سال جاری و همزمان با گسترش بحران انرژی الکتریکی در سال جاری آغاز نمود. این طرح با هدف کنترل پیک مصرف و معرفی برنامه های پاسخگویی بار به مشترکین به این صورت بوده که با مشترکین در حوزه های کشاورزی، صنعت، تجاری و ادارات حوزه اجرایی شرکت

گزارشات مدیریت پیک بار

این گزارش به صورت ترکیبی و با استفاده از داده های دو نرم افزار "بازاربرق" و "فراب" به صورت روزانه تهیه گردید. روند گزارش گیری بدین صورت است که ابتدا گزارش دیماندر مصرفی کل شرکت در روز قبل توسط نرم افزار بازار برق گرفته شده و نمودار آن با استفاده از نرم افزار اکسل تهیه میشود. سپس با استفاده از داده های نرم افزار فراب میزان همکاری کل بر مبنای مگاوات محاسبه شده که این مقدار با میزان دیماندر مصرفی کل شرکت سرجمع شده و نمودار پیشبینی اولیه را تشکیل میدهد. نمودار مذکور (شکل ۲) بیانگر مصرف واقعی شرکت در صورت نبود برنامه های پاسخگویی بار بوده که اهمیت و ضرورت اجرای این برنامه ها را نشان میدهد. در کنار گزارش فوق، همکاری هر تعرفه به تفکیک نیز قابل مشاهده بوده که تمامی آنها توسط نرم افزار فراب تهیه و تنظیم شده است.



شکل ۲: نمودار مدیریت پیک بار مورخ ۱۴۰۰/۰۳/۲۲

گزارشات همکاری روزانه

این گزارشات به صورت روزانه تهیه شده که مفاد آن به شرح زیر است:

- تعداد کل مشترکین ثبت نام شده در سامانه سمپ (تعداد مشترک مشمول در طرح) (تمامی اشتراک های شرکت)
- تعداد مشترکین ثبت نام شده در برنامه های پاسخگویی بار
- بیان تعداد مشترکین ثبت نامی به صورت درصدی از کل مشترکین
- سرجمع دیماندر مصرفی که با استفاده از داده های موجود در نرم افزار سمپ تهیه میشود
- میزان همکاری کنتور های هوشمند که با استفاده از نرم افزار فراب و طرح های پاسخگویی بار میزان همکاری هر یک از طرح ها بر حسب مگاوات آماده میشود
- تعداد مشترکین همکار، این بخش از گزارش نیز با استفاده از داده های فراب تهیه میشود بدین صورت که مشترکینی که حداقل ۲ ساعت کاهش بار در ساعت اوج مصرف را دارند به عنوان مشترک همکاری محسوب شده که سرجمع آنها به تفکیک هر تعرفه در گزارش اعلام میشود (شکل ۳ و ۴).

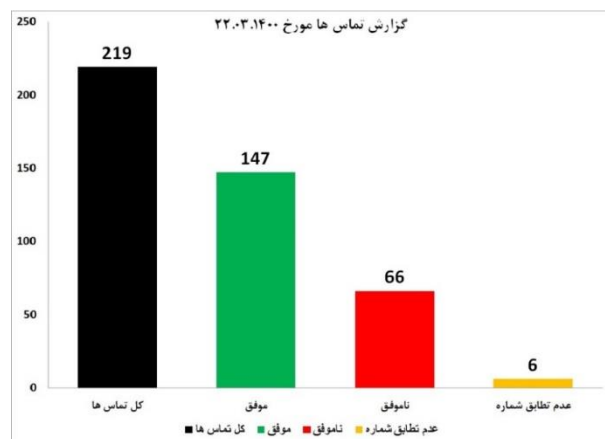
توزیع برق جنوب کرمان توافق نامه ای جهت خاموشی در ساعت پیک مصرف (۱۱:۰۰ تا ۱۸:۰۰) به ازای تخفیف و در برخی موارد رایگان شدن بهای برق مصرفی، اعطای پاداش و یک سری تسهیلات صورت گرفت و همچنین تذکر به مشترکین غیر همکار جهت همکاری مطابق با شرایط برنامه های مربوطه صورت پذیرفت.

یکی از فعالیت های تیم پایش برقراری تماس با مشترکین در حوزه های کشاورزی، صنعت، تجاری و ادارات حوزه اجرایی شرکت توزیع برق جنوب کرمان بوده که این امر با هدف معرفی برنامه های پاسخگویی بار به مشترکین مشمول هر طرح و تشویق آنها به ثبت نام در طرح های مرتبط و همچنین تذکر به مشترکین غیر همکار جهت همکاری مطابق با شرایط برنامه های مربوطه صورت پذیرفت (جدول ۱).

جدول ۱: سرجمع تعداد کل تماس های اپراتور های پایش

| تعداد کل تماس ها | تعداد تماس های موفق | تعداد تماس های ناموفق | تعداد شماره های عدم تطابق |
|------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|
| ۲۱۶۷۷ | ۱۵۱۴۵ | ۶۱۰۹ | ۴۲۱ |

در پایان ساعت کاری و پس از اتمام برقراری تماس هر اپراتور تعداد کل تماس های گرفته شده به همراه تعداد تماس های موفق و ناموفق و بعضاً شماره هایی که با نام مشترک همخوانی ندارند (عدم تطابق شماره) را به مسئول گزارشات تیم اعلام کرده و در نهایت مسئول گزارشات نموداری مبتنی بر تعداد کل تماس های گرفته شده در هر روز، تعداد تماس های موفق، تعداد تماس های ناموفق (اشغال، خاموش، در دسترس نبودن و ...) و تعداد شماره های عدم تطابق رسم میکنند (شکل ۱).



شکل ۱: نمونه گزارش تماس

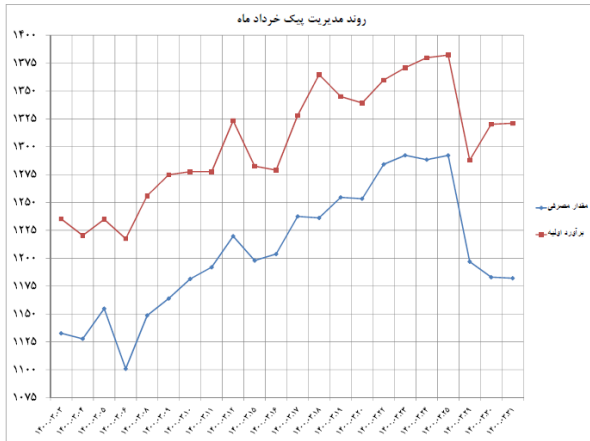
در این فرآیند علاوه بر ثبت گزارشات نحوه تعامل بین مشترکین و شرکت توزیع، پایگاه داده اطلاعات تماس مشترکین نیز به روز رسانی و دسترسی های بعدی به مشترکین تسهیل می گردد.



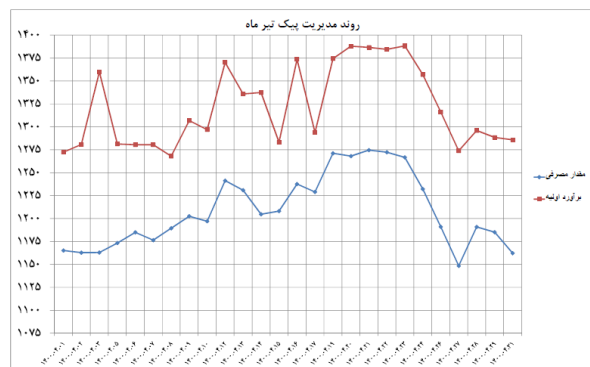
با ایشان تماس گرفته شود. لازم به ذکر است مشترکینی که حداقل دو ساعت (در ساعات اوج مصرف) کاهش و یا قطع بار داشته باشند مشترکین همکار محسوب شده که با توجه به ضوابط اجرایی برنامه های پاسخگویی بار، پاداش همکاری به ایشان تعلق خواهد گرفت. همطور که گفته شد لیست مذکور به صورت هفتگی و با استفاده از نرم افزار مدیریت داده کنتور (فراب) تهیه شده که علاوه بر برقراری تماس تلفنی (مشترکین غیر همکار)، اسامی ایشان جهت ارسال پیامک نیز به دفتر مدیریت مصرف داده میشود.

روند مدیریت پیک مصرف در ماه های خرداد و تیر، به صورت خلاصه و به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ ارائه گردیده است. چنانکه ملاحظه می شود، مدیریت روزانه بار در برخی نقاط تا بیش از ۲۰۰ مگاوات کاهش پیک برآورد شده را در پیش داشته است. از طرفی عدم همکاری مشترکین در برخی روزها می توانست منجر به افزایش مصرف و تحقق نمودار پیش بینی شده گردد که در این صورت قطعاً منجر به افزایش خاموشی های برنامه ریزی شده و چه بسا خاموشی های برنامه ریزی نشده می گردید.

از این جهت و با تحلیل نمودار های فوق می توان اهمیت پایش لحظه ای و مداوم پیک و مبحث DMS را به وضوح مشاهده نمود. امری که هنوز زمینه های توسعه و افزایش کارایی بسیاری داشته و در زمینه های مختلف قابل تحقق خواهد بود.



شکل ۶: گزارش روند مدیریت مصرف پیک در خرداد ماه ۱۴۰۰



شکل ۷: گزارش روند مدیریت مصرف پیک در تیر ماه ۱۴۰۰

| ردیف | صنعتی | کشاورزی | عمومی (سبب) | سایر مصارف (تجاری) | CNG | مولدهای خود تامین | جمع کل |
|--------------------------------------------|--------|---------|-------------|--------------------|-------|-------------------|--------|
| تعداد مشترک مشمول در طرح | ۷۸۹ | ۱۱۵۷۹ | ۵۷۱ | ۱۹۶ | ۲۰ | ۲۸ | ۱۳۱۸۳ |
| مشترکین ثبت نام شده | ۷۴۸ | ۱۱۴۳۴ | ۵۵۷ | ۱۹۱ | ۲۰ | ۲۸ | ۱۲۹۷۹ |
| درصد ثبت نام شدگان | ۹۵ | ۹۹ | ۹۸ | ۹۷ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۹۸ |
| سرجمع دیماند مصرفی (MWh) | ۵۲/۳۴ | ۴۵۱/۴۳ | ۱۹/۷۳ | ۱۰/۳۴ | ۲/۱۹ | - | ۵۳۴/۹۷ |
| میزان همکاری کنتورهای هوشمند در ۱۴۰۰-۰۳-۲۵ | ۱۰/۶۴۱ | ۱۱۱/۴۹۷ | ۸/۲۵۵ | ۱ | ۰/۶۰۹ | ۰/۱۶۸ | ۱۳۲.۱۷ |
| تعداد مشترک همکار در ۱۴۰۰-۰۳-۲۵ | ۳۸۸ | ۵۴۶۰ | ۳۶۴ | ۹۲ | ۱۷ | ۳ | ۶۳۲۴ |

شکل ۳: نمونه گزارش همکاری روزانه

| ردیف | صنعتی | کشاورزی | عمومی (سبب) | سایر مصارف (تجاری) | CNG | مولدهای خود تامین | سرجمع همکاری |
|-------------|--------|---------|-------------|--------------------|--------|-------------------|--------------|
| ارزوبه | -۰.۲۳۸ | ۴.۷۲۴ | -۰.۲۲۴ | -۰.۲۷ | - | - | ۵.۲۲۳ |
| بافت | -۰.۲۳۸ | ۳.۱۱۱ | -۰.۱۵۸ | -۰.۱۷ | -۰.۱۰۶ | - | ۳.۸۷۴ |
| بر صبیر | -۰.۴۸۴ | ۳.۰۷۶ | -۰.۴۲۴ | - | -۰.۶۱۵ | - | ۴.۰۹۹ |
| بیم | ۱.۵۹۹ | ۴.۷۵۳ | -۰.۷۸۴ | -۰.۱۵ | -۰.۲۲۶ | - | ۷.۳۷۷ |
| جیرفت | ۱.۳۳۸ | ۱۲.۳۳۱ | ۲.۱۵۸ | -۰.۲۷۹ | - | - | ۱۶.۱۱۶ |
| زایر | -۰.۰۰۶ | - | - | - | -۰.۰۹۲ | - | -۰.۰۹۸ |
| روندار جنوب | -۰.۴۵۲ | ۱۶.۳۲۲ | -۰.۴۸۱ | -۰.۰۰۱ | - | - | ۱۷.۳۲۶ |
| ریگان | -۰.۲۳۸ | ۳.۳۵۵ | -۰.۱۵۷ | -۰.۰۰۱ | - | - | ۳.۸۵۱ |
| سیرجان | ۵.۱۳۱ | ۴.۰۲۱ | ۱.۱۱۶ | -۰.۲۷۱ | -۰.۰۷ | -۰.۲۱۲ | ۱۰.۸۲۱ |
| عسرا آباد | -۰.۵۶ | ۱۶.۳۷۹ | -۰.۵۰۹ | -۰.۲۳ | - | - | ۱۷.۵۶۸ |
| فاریاب | -۰.۲۰۹ | ۹.۸۵ | -۰.۲۰۵ | -۰.۰۰۲ | - | - | ۱۰.۴۴۶ |
| غیر ج | -۰.۲۷۸ | ۴.۴۶۹ | -۰.۱۵۷ | -۰.۰۰۷ | - | - | ۴.۷۱۱ |
| قلعه گنج | -۰.۸۰۸ | ۸.۵۳۱ | -۰.۳۷۶ | -۰.۲۲۳ | - | - | ۹.۷۳۸ |
| میوهجان | -۰.۲۱۹ | ۱۱.۰۵۹ | -۰.۲۶۶ | -۰.۰۰۸ | - | - | ۱۱.۵۲۴ |
| نومیسر | - | ۳.۸۱۴ | - | - | - | - | ۴.۰۲۴ |
| گنوج | ۱.۳۸۸ | ۱۰.۱۱۴ | -۰.۸۶۶ | -۰.۱۳۳ | -۰.۰۶ | -۰.۱۲۲ | ۱۲.۴۳۳ |
| جمع کل | ۱۳.۳۳۱ | ۱۱۴.۸۹۸ | ۸.۰۹۱ | -۰.۸۹۲ | -۰.۷۶۹ | -۰.۳۴۴ | ۱۳۸.۳۱۷ |

شکل ۴: نمونه گزارش به تفکیک امور

گزارشات ساعت به ساعت پاسخگویی بار مربوط به عملکرد برنامه های پاسخگویی بار (همان میزان همکاری) از ساعات ۱۱ الی ۱۸ (ساعات شروع و پایان پیک مصرف برق) آورده میشود. میزان همکاری در گزارش فوق به صورت ساعت به ساعت بوده بدین صورت که مقدار همکاری در هر ساعت بر حسب مگاوات و با توجه به داده های نرم افزار فراب تهیه و تنظیم میشود (شکل ۵).

| ردیف | نام شرکت | تاریخ | عملکرد برنله های پاسخگویی بار | | | | |
|------|-------------|------------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | | | ساعت ۱۲ | ساعت ۱۳ | ساعت ۱۴ | ساعت ۱۵ | ساعت ۱۶ |
| ۱ | ایران انرژی | ۱۴۰۰/۰۶/۲۱ | ۰/۲۷۵ | ۰/۷۵۴ | ۷۶/۸۰۷ | ۹۵/۹۶۸ | ۸۴/۶۸۸ |
| | | ۱۴۰۰/۰۶/۲۲ | ۰/۸۱۸ | ۱/۱۸۴ | ۸۱/۱۰۷ | ۱۰۳/۷۶۲ | ۸۸/۳۷۷ |
| | | ۱۴۰۰/۰۶/۲۳ | ۰/۵۴۱ | ۰/۶۵۷ | ۷۸/۷۶۲ | ۹۸/۷۴۶ | ۸۸/۳۲۶ |
| | | ۱۴۰۰/۰۶/۲۴ | ۰/۶۵۰ | ۱/۰۹۸ | ۷۷/۴۳۱ | ۱۰۹/۱۳۵ | ۹۴/۵۵۷ |
| | | ۱۴۰۰/۰۶/۲۵ | ۰/۸۳۷ | ۱/۳۷۷ | ۷۶/۰۹۷ | ۹۵/۵۵۹ | ۸۷/۵۵۹ |
| | | ۱۴۰۰/۰۶/۲۶ | ۰/۴۳۹ | ۰/۶۶۱ | ۸۱/۵۳۴ | ۹۶/۳۴۷ | ۹۱/۹۶۹ |
| | | ۱۴۰۰/۰۶/۲۷ | ۰/۴۲۰ | ۰/۶۴۴ | ۷۳/۴۲۹ | ۸۳/۶۷۳ | ۹۷/۰۰۲ |
| | | ۱۴۰۰/۰۶/۲۸ | ۰/۴۲۰ | ۰/۶۴۴ | ۷۳/۴۲۹ | ۸۳/۶۷۳ | ۹۷/۰۰۲ |
| | | ۱۴۰۰/۰۶/۲۹ | ۰/۴۲۰ | ۰/۶۴۴ | ۷۳/۴۲۹ | ۸۳/۶۷۳ | ۹۷/۰۰۲ |
| | | ۱۴۰۰/۰۶/۳۰ | ۰/۴۲۰ | ۰/۶۴۴ | ۷۳/۴۲۹ | ۸۳/۶۷۳ | ۹۷/۰۰۲ |

شکل ۵: نمونه گزارش ساعت به ساعت پاسخگویی بار

گروه فنی پایش به صورت هفتگی لیستی متشکل از مشترکینی که با توجه به ضوابط اجرایی برنامه های پاسخگویی بار، همکاری لازم را نداشته اند تهیه نموده و در اختیار اپراتور های پایش قرار می دهد تا



با مدیریت پیک مصرف از ابتدای آغاز فصل گرم و پایش روزانه بار در برخی نقاط، تا بیش از ۲۰۰ مگاوات کاهش پیک نسبت به مقدار پیش بینی شده را در پی داشته است. به طور خلاصه با پایش مشترکین و اجرای برنامه پاسخگویی بار، پیک مصرف در زمان اوج کاهش یافت و دیگر احتیاج به خاموشی در این ساعات نبوده یا در حداقل ممکن بوده و در نتیجه، خسارت های وارده در اثر خاموشی کاهش یافت.

منابع

- ۱- گزارش عملکرد پایش پیک ۱۴۰۰ شرکت پارس پایش زاد نیرو، کارفرما توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان، مهرماه ۱۴۰۰

همزمان با روند پایش مشترکین، مطالعه و ثبت میزان خسارت وارده به مشترکین در حالات مختلف بررسی گردید. رفتار مشترکین و میزان خسارت وارده به آنها بر اساس نوع صنعت یا نوع کشاورزی دسته بندی متفاوت بوده و خسارات وارده نیز متفاوت می باشد. لذا پیشنهاد شد تا در قرارداد های آتی با مشترکین در خصوص همکاری در پاسخگویی بار، نتایج بررسی خسارت مشترکین در حالات مختلف دیده شود تا در صورت همکاری، ضریب پاداش برای این مشترکین متناسب با نیاز آنها به برق در ساعات مختلف و همچنین خسارات وارده در ساعات خاموشی در نظر گرفته شود.

نتیجه گیری

در این پروژه تلاش شد زوایای مختلف اجرای طرح پایش پیک مصرف مشترکین با هدف تامین تقاضای برق، بهبود سطح خدمات رسانی، تامین برق مداوم و باکیفیت بررسی و تحلیل شود.

ACEC2021-17155

سیستم هوشمند مدیریت انرژی بومی (SEMS-BMS) با قابلیت انعطاف و توسعه بر اساس نیاز مناطق مختلف

دانیال نژادملایری^۱، امیرحسین ادهمی^۲، حانیه حجت زاده حسنی نژاد^۳، سمیرا صفری زاده^۴، حمید علیزاده^۵

^۱ عضو هیات علمی دانشگاه فنی و حرفه ای کرمان؛ dnezhadmalayeri@tvu.ac.ir

^۲ دفتر طراحی و مهندسی شرکت پارس پایش زادنیرو؛ Aha.amirhosein@gmail.com

^۳ دفتر طراحی و مهندسی شرکت پارس پایش زاد نیرو؛ haniehojjatzadehh@gmail.com

^۴ دفتر طراحی و مهندسی شرکت پارس پایش زاد نیرو؛ saharisafarizadeh@gmail.com

^۵ دفتر مدیریت مصرف شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان؛ Hamid.Alizadeh.dsm@gmail.com

چکیده

سیستم های هوشمند مدیریت انرژی SEMS که در این طرح تولید شده و به صورت عملی مورد استفاده قرار گرفته است با هدف سازگاری با الزامات برنامه پاسخگویی بار شرکت توانیر در کنترل پیک طراحی گردیده است و قابلیت انتخاب و اجرای برنامه های ابلاغی توانیر را دارد. برنامه کنترل بار سرمایه‌گذاری در میان تمام مشترکان شرکت برق قابل اجرا بوده و هر مشترک حقیقی و یا حقوقی میتواند در این برنامه مشارکت نماید. این تجهیزات طی یک سال گذشته به تعداد ۲۰ دستگاه در شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان، ۹۶ دستگاه در شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان و ۱۲۰ دستگاه در شرکت توزیع نیروی برق استان لرستان نصب گردیده است. خلاصه نتایج عملی نصب این سیستم ها در ایام تابستان گویای کاهش شدید مصرف تا میزان ۴۰ درصد بوده است. توسعه استفاده از این سیستم ها جهت کنترل بارهای سرمایه‌گذاری، روشنایی معابر و موتور پمپ های کشاورزی، بر اساس مشخصات دیده شده در طرح به سهولت امکان پذیر بوده و با سرعت قابل استفاده می باشد.

واژه های کلیدی: هوشمندسازی، کنترل بار، سیستم هوشمند مدیریت انرژی، SEMS، کاهش مصرف انرژی

مقدمه

با توجه به مصرف سالانه زیاد انرژی در ایران در بخش خانگی، عمومی و تجاری بر اساس برآورد سازمان بهینه سازی مصرف سوخت، سهم مصرف سوخت در ساختمان ها حدود ۳۸ درصد از مصرف کل سوخت کشور است که در مقایسه با سایر بخش ها نظیر حمل و

نقل، صنعت و کشاورزی، سهم قابل توجهی است. همزمان با تلفیق اینترنت با تلفن همراه تعریف و جایگاه تکنولوژی در زندگی روزمره مردم را عمیقاً دگرگون شده است. تلفن همراه هوشمند در حال حاضر به یکی از پر استفاده ترین ابزار دیجیتالی در ایران تبدیل شده است و مشترکان بسیاری دارد. اولین سیستم هوشمند تجربی در سال ۱۹۶۶ به بازار عرضه شد. استفاده معمولی از اتوماسیون خانگی شامل کنترل روشنایی، گرمایش و سرمایش، امنیت، بهینه سازی مصرف انرژی و غیره می باشد. در سال ۲۰۱۶ مشاهده سیستم اتوماسیون خانگی در ساختمان های تجاری، دانشگاه ها یا هتل ها به امری عادی تبدیل شده است اما استفاده از این سیستم ها در خانه های شخصی محدود به قشر مرفه جامعه است. پیش بینی می شود که تعداد وسایل خانگی که با سیستم هوشمند ساختمان کار می کنند به بیش از ۴۰ میلیون در سال ۲۰۲۲ رشد خواهد کرد.

سامانه مدیریت ساختمان یک سامانه مبتنی بر رایانه است که برای کنترل و نظارت بر تجهیزات درون ساختمان (مانند تهویه، روشنایی، سامانه قدرت، سامانه آتش نشانی و ایمنی) در داخل ساختمان ها نصب می شود که شامل دو بخش نرم افزار و سخت افزار است، سخت افزارها معمولاً به صورت اختصاصی به وسیله میکروکنترلرها پیاده سازی می شوند و نرم افزارها نیز ممکن است به صورت اختصاصی برای سامانه نوشته شوند، در برخی از سامانه ها از نرم افزارهای کنترل و مانیتورینگ برای کنترل و نظارت بر عملکرد بخش های مختلف استفاده می شود.

چارچوب برنامه کنترل بار سرمایه‌گذاری

سیستم کنترل به گونهای طراحی شده است که هر گونه خرابی دستگاه کنترل، اختلالی در ادامه کار تجهیزات ایجاد نخواهد کرد. تجهیز مدیریت هوشمند بار سرمایه‌ی توسط شرکت برق تهیه و نصب میشود. مشترک هزینه‌های بابت تجهیز پرداخت نمیکند. همواره حق واریسی، سرویس و یا جمع کردن تجهیز منصوبه برای شرکت برق محفوظ میباشد.

مشترک متعهد میشود که با دقت از تجهیز نصب شده نگهداری نماید و از آسیب رساندن به آن پرهیز نماید. در صورت انجام هرگونه فعالیتی که منجر به تخریب یا آسیب رساندن به تجهیز شود، مشترک موظف به جبران خسارت وارده خواهد بود.

در طی انجام برنامه، هر زمان که مشترک کتباً از شرکت برق درخواست نماید میتواند از برنامه خارج شود.

هرگونه دستکاری در تجهیزات منصوبه (نظیر دستکاری دستگاه توسط مشترکین، از کار انداختن دستگاه، فریب دستگاههای مربوطه و مسائلی از این قبیل)، موجب عدم دریافت پاداش توسط مشترک خواهد شد.

با درخواست کتبی مشترک حق دسترسی به اطلاعات خود را در هر زمان خواهد داشت.

نصب تجهیز کنترلی پس از تایید پیمانکار متخصص از سلامت سیستم سرمایه‌ی موجود و با تایید شرکت برق امکانپذیر میباشد.

ساختار و مشخصات فنی طرح پیشنهادی

شرکت پارس پایش زاد نیرو به عنوان یکی از شرکت های پیشرو خلاق در زمینه طراحی و تولید تجهیزات پایش و مدیریت مصرف، مجموعه سیستم های Smart Energy Management Systems (SEMS) را به صورت بومی طراحی و به تولید رسانیده است. سیستم های فوق با هدف سازگاری با الزامات برنامه پاسخگویی بار شرکت توانیر در کنترل پیک طراحی گردیده است و قابلیت انتخاب و اجرای برنامه های ابلاغی توانیر در عملکرد سیستم دیده شده است.

طی یک سال گذشته به تعداد ۲۰ دستگاه در شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان، ۹۶ دستگاه در شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان و ۱۲۰ دستگاه در شرکت توزیع نیروی برق استان لرستان نصب گردیده است.

نسخه نهایی سیستم های فوق به صورت یکپارچه، در کنترل پیک تابستان و زمستان و کنترل خاموشی بحرانی قابل استفاده میباشد. این سیستم قابلیت دارد تا در کنترل بارهای کشاورزی و موتورپمپ ها، کنترل روشنایی معابر و کنترل بار ساختمان های اداری و تفکیک مصارف اضطراری و عمومی در زمان های بحران مورد استفاده قرارگیرد.

ب

در این طراحی، یک سیستم هوشمند قابل کنترل از راه دور ارائه گردیده است. بسته به محل و نوع پیکربندی، در هر گروه تجهیزات ۱ الی ۵ تجهیز در یک شبکه قرار می گیرند. این تجهیزات از طریق

برنامه کنترل مستقیم بار شامل نصب تجهیزات و دستگاههای کنترل بر روی تجهیزات سرمایه‌ی، در محل زندگی و یا کار مشترک است که از طریق آن، شرکت برق اجازه کنترل بار سرمایه‌ی مشترک در زمانهای از پیش تعیین شده و در زمان پیک مصرف را دارد. مشترک این اجازه را به شرکت برق میدهد که با اعلام قبلی/زمانبندی تعیین شده براساس تفاهم انجام شده، نسبت به کنترل بار سرمایه‌ی، اقدام نماید. همکاری در کاهش بار سرمایه‌ی، به صورت پاداش تشویقی بر روی قبض مشترک اعمال خواهد شد.

برنامه کنترل بار سرمایه‌ی در میان تمام مشترکان شرکت برق قابل اجرا بوده و هر مشترک حقیقی و یا حقوقی میتواند در این برنامه مشارکت نماید. بازه ساعت همکاری در مشترکین اداری از ساعت ۱۱ الی ۱۵ و در سایر مشترکین از ساعت ۱۲ الی ۱۶ میباشد. مشترک میتواند به ازای پاداش مقرر در یکی از دو حالت زیر در برنامه مشارکت نماید:

الف) قطع بار سرمایه‌ی برنامه‌ریزی شده

ب) تنظیم دمای برنامه‌ریزی شده

الف) قطع بار سرمایه‌ی برنامه‌ریزی شده در این حالت مشترک موافقت می‌نماید بارهای سرمایه‌ی خود را بصورت بازه قطع و وصل در اختیار شرکت برق قرار دهد. در این حالت دستگاه سرمایه‌ی در بازه زمانی همکاری به مدت ۴۵ دقیقه در مدار بوده و به مدت ۱۵ دقیقه از مدار خارج خواهد شد.

ب) تنظیم دمای برنامه‌ریزی شده در این حالت مشترک موافقت مینماید تنظیم دمای بارهای سرمایه‌ی خود را در اختیار شرکت برق قرار دهد. توسط این برنامه دستگاه سرمایه‌ی در بازه زمانی همکاری بر روی دمای ۲۴ درجه سانتیگراد تنظیم شده و مشترک امکان تغییر در دمای ترموستات را نخواهد داشت.

ساختار اجرایی

در این برنامه، تجهیز مدیریت هوشمند بار سرمایه‌ی، از طریق کارشناسان و نیروهای ماهر و مورد تأیید شرکت برق، بر روی تجهیزات و یا تاسیسات مشترک، نصب میشود. کارشناسان و نیروهای ماهر، از سوی شرکت برق و یا پیمانکار، معرفی میشوند.

تجهیز مدیریت هوشمند بار سرمایه‌ی نصب شده، دارای استانداردها و مجوزهای لازم از سوی شرکت برق و سازمانهای مربوطه میباشد.

انجام برنامه، تنها در ساعات و روزهای تعیین شده و با هدف کنترل بار صورت میگیرد.

تجهیز مدیریت هوشمند بار سرمایه‌ی نصب شده، از دو طریق فرمان از راه دور و یا برنامه‌ریزی شده از قبل، کنترل میشود. اطلاعات به صورت امن و با استفاده از استانداردهای بینالمللی رمزنگاری شده و هیچ ارتباطی با حریم خصوصی مشترک ندارد.

اطلاعات استخراج شده از تجهیز منصوبه فقط برای پایش روند مصرف، بررسی عملکرد و محاسبه پاداش مورد استفاده قرار خواهد گرفت.



بار توانیر در یک طبقه از ساختمان اداری امور برق رفسنجان بر

حسب (kva)

طبق (شکل ۱) کاهش بار سرمایشی در ساعات مورد نظر برنامه پاسخگویی بار قابل ملاحظه است، میزان مصرف در بخش تحت کنترل در زمان های تعیین شده تا ۳۵ درصد کاهش یافته است. بدیهی است با اجرای سیستم فوق در ساختمان های اداری، می توان به میزان بسیار قابل توجهی در مصرف انرژی الکتریکی صرفه جویی نمود و کمک شایانی به رفع بحران کمبود انرژی نمود.

نتیجه گیری و جمع بندی

چنانکه ملاحظه می شود کاهش بار سرمایشی در ساعات مورد نظر برنامه پاسخگویی بار قابل ملاحظه است. از طرفی این سیستم قابلیت دارد تا در کنترل بارهای کشاورزی و موتورپمپ ها، کنترل روشنایی معابر و کنترل بار ساختمان های اداری و تفکیک مصارف اضطراری و عمومی در زمان های بحران مورد استفاده قرار گیرد. با ابتکار انجام شده در این طرح، نیاز به نصب هیچگونه تجهیزاتی به طور مستقیم بر روی چیلر یا کمپرسور ها نخواهد بود. بلکه با کنترل Fan های داخل اتاق ها، با خاموش شدن Fan، خود به خود میزان کارکرد کمپرسورهای کاهش یافته و مصرف انرژی الکتریکی به حداقل رسید. به این طریق نگرانی های مربوط به تحت تاثیر قرار گرفتن سلامت سیستم های سرمایشی در کنترل های متعدد نیز منتفی می باشد. نسخه نهایی سیستم های فوق به صورت یکپارچه، در کنترل پیک تابستان و زمستان و کنترل خاموشی بحرانی قابل استفاده می باشد.

منابع:

- ۱- ضوابط اجرایی برنامه پاسخگویی بار های سرمایشی، شرکت توانیر، ۱۳۹۹/۹/۵.

شبکه Wi-Fi به هم متصل بوده و از طریق شبکه GSM به نرم افزار کنترل متصل می باشد. نرم افزار کنترل در حال حاضر یک App بر روی سیستم عامل Android می باشد. این نرم افزار از نظر امنیتی می تواند به صورتی پیکربندی شود که علاوه بر تعریف Password اختصاصی، تنها از طریق شماره های خاصی قابلیت ارسال فرمان به تجهیزات منصوبه را داشته باشد.

رخی ویژگی های محصول پیشنهادی به شرح زیر می باشد:

_ قابلیت برنامه ریزی هفتگی و روزانه جهت تعیین ساعت کارکرد روزانه و هفتگی تجهیزات سرمایشی

_ قابلیت تعیین مدت زمان روشن بودن برای تک تک فن کوئل ها

_ تعیین و ارسال دمای Set point برای تک تک فن کوئل ها به صورت مستقل

_ پشتیبانی از انواع کولرهای اسپلیت با برند های مختلف

_ قابلیت پایش لحظه ای دما و رطوبت محیط

_ پشتیبانی از سیم کارتهای دایمی و اعتباری

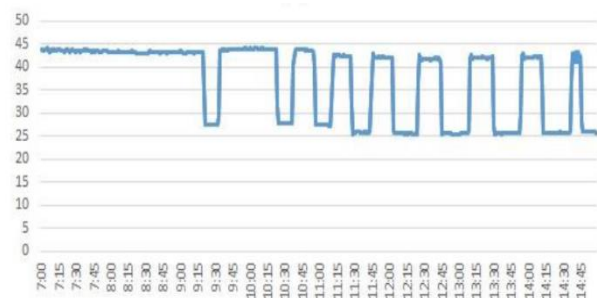
_ اندازه گیری میزان مصرف تابلو برق ورودی که کلیه سیستم های سرمایشی و گرمایشی از آن تغذیه می شوند.

_ قابلیت کنترل از راه دور سیستم های سرمایشی به صورت مجزا

_ نرم افزار کنترل و پایش بسیار کاربردی با کاربری آسان

نتایج

با توجه به قابلیت کنترل عملکرد اسپلیت ها و فن کوئل ها و بر اساس ساختار سیستم سرمایشی، به صورت موثری میزان مصرف انرژی الکتریکی کاهش خواهد یافت. این تغییرات در کاهش مصرف توسط سیستم اندازه گیری پایش شده و اطلاعات آن به نرم افزار ارسال خواهد شد تا در مطالعات مورد نیاز مورد استفاده قرار گیرد. نتایج عملی حاصل از نصب سیستم های فوق در یکی از نمونه های پایلوت در شکل زیر ارائه گردیده است (شکل ۱).



شکل ۱: نمونه کاهش بار سرمایشی در ساعات مورد نظر برنامه پاسخگویی

ACEC2021-18436

بررسی تأثیر عوامل مکانی و محیطی بر مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی با استفاده از GIS

عاطفه سجادیان^۱، سعید نیازمردی^۲، میثم ارگانی^۳، رضا عرب‌آبادی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان،

ایران، atefeh.sajadian222@gmail.com

^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، s.niazmardi@kgut.ac.ir

^۳ استادیار سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران، argany@ut.ac.ir

^۴ استادیار، پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، arababadi@kgut.ac.ir

چکیده

درصد از کل انرژی در ایالات متحده را تشکیل می‌دهد [۱]. رشد سریع مصرف انرژی در مناطق شهری نگرانی‌های زیست‌محیطی بسیاری را برانگیخته است. با توجه به توسعه مداوم شهرنشینی، تلاش برای کاهش مصرف انرژی در شهرها از اهمیت بالایی برخوردار شده است. مطالعات نشان می‌دهند که خصوصیات فیزیکی ساختمان مانند هندسه [۲]، پوشش [۳] و سیستم عملکرد [۴] مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مصرف انرژی آن هستند. علاوه بر این عوامل، مطالعات اخیر شواهدی ارائه داده‌اند که نشان می‌دهد روابط مکانی بین ساختمان‌ها و ویژگی‌های محیط شهری جز عوامل تأثیرگذار بر مصرف انرژی ساختمان هستند [۵]. با توجه به محدود بودن منابع انرژی، هراندازه که بتوان الگوی مصرف انرژی را بهبود بخشید، یک گام مهم در جهت حفظ محیط زیست و منابع طبیعی برداشته خواهد شد.

تاکنون مطالعات زیادی در جهت بررسی عوامل مؤثر بر کاهش مصرف انرژی انجام شده است، اما در بین آن‌ها بررسی تأثیر عوامل مکانی بر مصرف انرژی به‌ندرت یافت می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند متغیرهای شکل شهری با تغییر الگوی جریان هوا و سرعت باد در اطراف ساختمان و تأثیرگذاری بر سطح گرمایش خورشید و داشتن سایه‌بان، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد انرژی ساختمان دارند [۶]؛ بنابراین تغییر شکل شهری بر اساس تأثیر آن بر مصرف انرژی ساختمان می‌تواند منجر به پیشرفت در مدیریت انرژی شهری شود. با بررسی تأثیر شکل شهری بر روی مصرف انرژی ساختمان‌ها در شهر سیاتل، در کشور ایالات متحده آمریکا، به کمک یک مدل تأخیر مکانی GIS^۲، این نتیجه به دست آمد که تا محدوده ۱۵۰ متری اطراف هر ساختمان تغییرات ارتفاعی کمتر و نسبت پوشش افقی بیشتر موجب کاهش مصرف انرژی می‌شود. در این پژوهش علاوه بر ویژگی‌های شکل شهری، ویژگی‌های فیزیکی ساختمان و محیط طبیعی و اقتصادی نیز در مدل وارد شده که در بین این عوامل سن، تعداد طبقات و مساحت ساختمان، متوسط

عوامل بسیار زیادی هستند که می‌توانند بر عملکرد انرژی ساختمان تأثیر بگذارند که بیانگر پیچیده بودن این مسئله است. مطالعات نشان می‌دهند که عوامل مکانی و ویژگی‌های محیط طبیعی و شهری در اطراف ساختمان به‌طور قابل توجهی بر عملکرد کلی انرژی ساختمان تأثیر می‌گذارند. این موضوع نشان‌دهنده نیاز به تجزیه و تحلیل تجربی بیشتر برای پی بردن به نقش و نحوه تأثیر هر کدام از عوامل بر مصرف انرژی ساختمان است. این مطالعه با استفاده از داده‌های واقعی مصرف گاز تعدادی ساختمان در سطح شهر کرمان برای اولین بار به بررسی اهمیت نسبی تأثیر هفت متغیر بر روی مصرف انرژی در طول یک سال به کمک شبکه عصبی مصنوعی پرداخته است. متغیرهای استفاده شده شامل سن و مساحت ساختمان، ارزش املاک، تراکم افقی، ارتفاع، پوشش گیاهی و دمای سطح زمین هستند. در بین این متغیرها مساحت ساختمان با ۳۵ درصد و ارتفاع سطح زمین با ۱۶ درصد بیشترین اهمیت نسبی را در طول یک سال دارا بودند. با توجه به مصرف بیشتر گاز در ۶ ماه دوم سال جهت گرمایش فضای ساختمان، مساحت بزرگ‌تر، منطقه مرتفع‌تر و پوشش گیاهی بیشتر اطراف ساختمان می‌توانند عواملی برای مصرف بیشتر انرژی گاز باشند.

واژه‌های کلیدی: مصرف انرژی، ساختمان، GIS، شبکه عصبی مصنوعی، اهمیت نسبی.

مقدمه

انرژی مصرفی ساختمان‌ها سهم قابل توجهی از تقاضای انرژی در سراسر جهان را در برمی‌گیرد. داده‌های ماهانه انرژی که در ژانویه سال ۲۰۱۸ توسط وزارت انرژی ایالات متحده (DOE)^۱ گزارش شده است، نشان می‌دهد که انرژی مصرفی ساختمان‌های تجاری و مسکونی ۷۷/۵

^۲ Geospatial Information System

^۱ United States Department of Energy

پژوهش حاضر با جمع‌آوری مجموعه‌ای از این داده‌ها برای اولین بار تأثیر عوامل مکانی و محیطی بر مصرف انرژی گاز مسکونی شهر کرمان را مورد بررسی قرار داده و به دنبال پاسخ به این سؤال است که اهمیت نسبی تأثیر این عوامل به چه صورت است؟

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

کرمان یکی از کلان‌شهرهای ایران و مرکز استان کرمان بین ۵۶ تا ۵۸ درجه طول شرقی و ۳۰ تا ۳۱ درجه عرض شمالی قرار گرفته است. جمعیت این شهر طبق سرشماری سال ۱۳۹۵ معادل ۷۲۴,۷۲۴ نفر بوده است. وسعت شهر کرمان حدود ۲۴۰ کیلومتر مربع است و به دلیل وسعت شهری و جمعیت، این شهر جز کلان‌شهرهای ایران طبقه‌بندی شده است. شهر کرمان با ۱۷۶۰ متر ارتفاع از سطح دریا، چهارمین مرکز استان مرتفع در ایران به شمار می‌آید. کرمان دارای آب‌وهوای خشک و میزان بارندگی سالانه به‌طور متوسط ۱۴۲ میلی‌متر است.



شکل ۱. موقعیت شهر کرمان در استان کرمان

داده‌های انرژی ساختمان

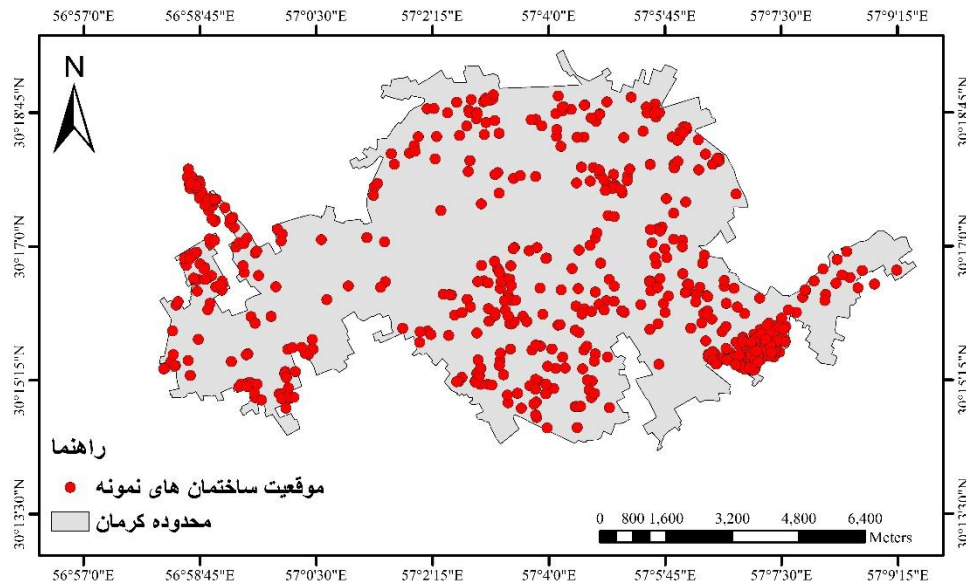
داده‌های مصرف گاز ۶۲۰ ساختمان مسکونی که به‌صورت تصادفی در سطح شهر کرمان انتخاب شده‌اند، از شرکت گاز استان کرمان اخذ شده‌اند. این داده‌ها که مربوط به ۱۲ ماه از سال ۱۳۹۷ هستند، شامل میزان متوسط مصرف ماهانه گاز، مساحت زیربنای ساختمان، تاریخ نصب اولین کنتور گاز، نوع کاربری (که کاربری تمام ساختمان‌های انتخابی مسکونی است) و همچنین موقعیت هر کدام از ساختمان‌های نمونه هستند. شکل ۲ موقعیت ساختمان‌های نمونه را نشان می‌دهد. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 آماده‌سازی و یکپارچه شده‌اند.

درآمد خانوار و همچنین تأثیر سایه درختان از لحاظ آماری معنادار بودند [۷]. میزان بازتاب آلبدو^۱ سطح پشت‌بام ساختمان‌ها و میزان پوشش گیاهی اطراف ساختمان بر روی میزان مصرف انرژی تأثیر دارند. بدین‌صورت که با افزایش میزان بازتاب سطح پشت‌بام، بار حرارتی ساختمان کاهش پیدا کرده که در تابستان موجب کاهش مصرف انرژی الکتریکی می‌شود. پوشش گیاهی اطراف ساختمان با ایجاد سایه سبب خنک شدن محیط اطراف می‌شود. همچنین با بررسی شکل ساختمان‌ها در تصاویر هوایی مشاهده شده است که نسبت مساحت به محیط بزرگ‌تر منجر به مصرف انرژی بیشتر می‌شود [۸]. وجود سایه‌ها روی میزان انرژی گرمایی خورشید که به سطوح یک ساختمان می‌رسد تأثیر منفی می‌گذارد، بنابراین تقاضای انرژی جهت گرمایش را در فصول سرد افزایش می‌دهد [۹]. در مناطق با آب‌وهوای سرد، مطالعات نشان داده‌اند که توسعه شهری متراکم‌تر منجر به تلفات حرارتی کمتری می‌شود، در نتیجه منجر به کاهش مصرف انرژی جهت گرمایش ساختمان‌ها می‌شود [۱۰]. به دلیل اثر جزیره حرارتی شهری (UHI^۲)، درجه حرارت به‌طور کلی در شهرهای متراکم نسبت به مناطق حاشیه شهر و روستایی بالاتر است که می‌تواند تأثیر مثبتی بر عملکرد انرژی ساختمان‌ها در زمستان داشته باشد [۱۱]. علاوه بر این، افزایش ارتفاع ساختمان‌ها در شهرهای متراکم منجر به محدود کردن دسترسی به تهویه طبیعی می‌شود به این صورت که ساختمان‌های بلند سد راه جریان هوای سرد در داخل منطقه شهری شده و از کاهش دمای آن جلوگیری می‌کند [۱۲]. تحقیقات قبلی همچنین نشان داده است که آب‌وهوای محلی (به‌عنوان مثال، دمای فصلی، تابش خورشیدی و سرعت باد) نقش مهمی در تعیین شیوه‌هایی دارد که هندسه شهری بر عملکرد انرژی ساختمان تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل، بسیاری از مطالعات تجزیه و تحلیل داده‌ها را ارائه می‌دهند که ویژگی‌های آب‌وهوایی منطقه را در مدل‌ها اعمال می‌کنند [۱۳]. با این حال، آن‌ها در ارائه مبادلات سالانه انرژی بین گرمایش و سرمایش محدود بودند زیرا داده‌های آن‌ها مربوط به فصول یا دوره‌های بلندمدتی از سال بود؛ بنابراین، تأثیر تعامل یک‌ساله بین ریخت‌شناسی محله و شرایط آب‌وهوایی پس‌زمینه بر مصرف انرژی ساختمان‌ها تا حدودی ناشناخته است. از طرف دیگر محدود بودن ایستگاه‌های سینوپتیک در منطقه، استفاده از آن‌ها را با مشکل مواجه می‌کند.

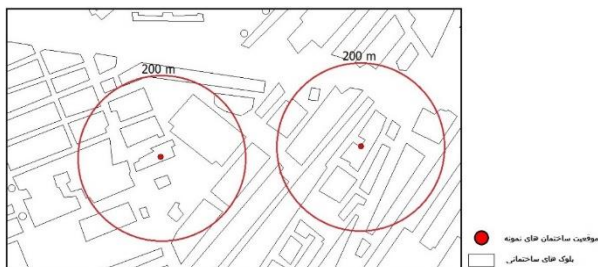
هدف از این مطالعه ارائه شواهد تجربی جهت بررسی تأثیر متغیرهای مختلف شکل شهری، فیزیک ساختمان، محیط طبیعی و وضعیت اقتصادی بر میزان مصرف انرژی مسکونی با استفاده از داده‌های واقعی مصرف انرژی گاز و داده‌های تهیه‌شده به کمک سیستم اطلاعات مکانی است. در این پژوهش برای نزدیک‌تر شدن مدل به واقعیت و بالا بردن دقت با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای متغیرهای دما و پوشش گیاهی را برای هر ماه به‌صورت جداگانه در مدل اعمال شده است.

^۲ Urban heat island

^۱ Albedo



شکل ۲. نقشه پراکنده‌گی ساختمان‌های مسکونی نمونه جهت بررسی مصرف گاز



شکل ۳. بافر ۲۰۰ متری اطراف ساختمان جهت برآورد تراکم افقی

شهر برای سال ۱۳۹۷ از شهرداری کرمان جمع‌آوری و نقشه ارزش املاک تهیه شده است (شکل ۴). جهت بررسی ویژگی‌های محیط طبیعی در این مدل با بهره‌گیری از علم سنجش از دور^۲، از تصاویر ماهواره لندست ۸^۳ استفاده شده است که از سایت^۴ Google Earth Engine اخذ شده‌اند. ارتفاع هر موقعیت از مدل رقومی ارتفاعی یا (DEM^۵) ۳۰ متری منطقه استخراج شده است. شکل ۵ نقشه مدل رقومی ارتفاعی منطقه را نشان می‌دهد. دما یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان مصرف انرژی است، در این تحقیق برای بررسی این تأثیر از دمای سطح زمین یا به اختصار LST^۶ استفاده شده است. جهت بررسی دمای سطح زمین کرمان طی سال ۱۳۹۷ دوازده نقشه رستر ماهانه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ تهیه شده است. شکل ۶ یک نمونه نقشه LST شهر کرمان را نشان می‌دهد.

متغیرهای ورودی

پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که خصوصیات بدنه یک ساختمان، محیط طبیعی اطراف آن و وضعیت اقتصادی خانوار با الگوی مصرف انرژی یک ساختمان مرتبط است. برای بررسی تأثیر این عوامل بر روی مصرف انرژی ساختمان در مقیاس شهری، هفت متغیر شامل سن ساختمان، مساحت ساختمان، ارزش املاک، تراکم افقی ساختمان‌ها، ارتفاع سطح زمین، شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین در این مدل گنجانده شده است. دو متغیر سن و مساحت ساختمان که مربوط به فیزیک ساختمان هستند از اطلاعات موجود در پایگاه داده شرکت گاز استان کرمان استخراج شده‌اند. برای محاسبه تراکم افقی ساختمان‌های اطراف هر موقعیت نمونه، ابتدا یک بافر به شعاع ۲۰۰ متر اطراف هر نقطه ایجاد و سپس اشتراک آن با چندضلعی‌های^۱ موجود در نقشه کاداستر منطقه محاسبه شده و جمع مساحت‌های آن‌ها به دست آمده است. در نهایت، جمع مساحت‌ها بر مساحت بافر تقسیم و به عنوان تراکم ساختمان‌های اطراف املاک، در نظر گرفته شده است (شکل ۳). از آنجایی که دسترسی به میزان درآمد خانوار و شرایط اقتصادی نمونه‌ها امکان‌پذیر نبود، از ارزش املاک به عنوان یک معیاری جهت اعمال تأثیر وضعیت اقتصادی در مدل استفاده شده است. اطلاعات ارزش معاملاتی املاک مناطق مختلف

^۴ <https://earthengine.google.com/>

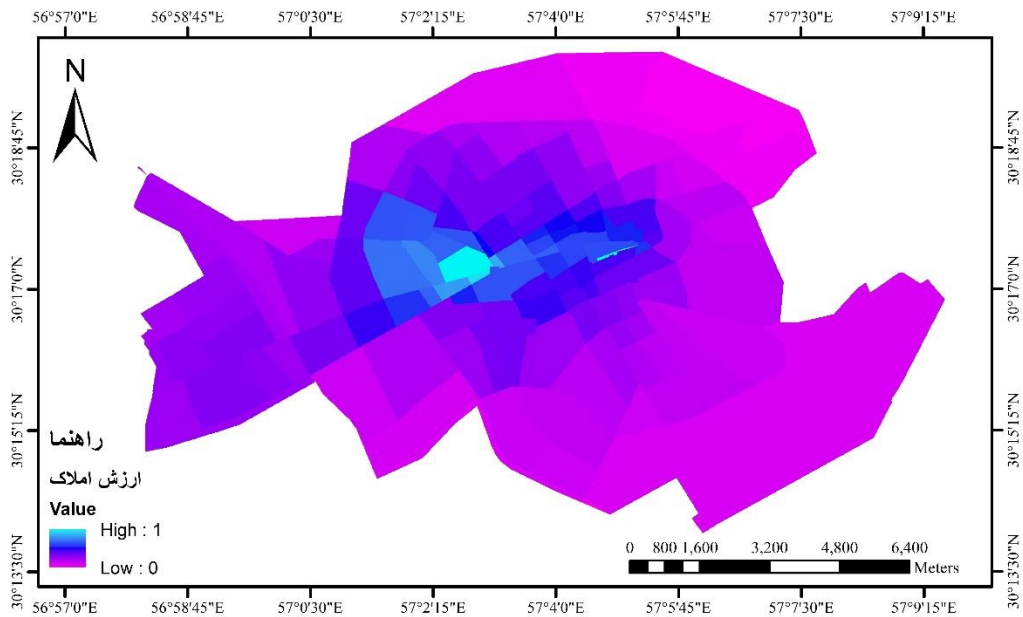
^۵ Digital Elevation Model

^۶ Temperature Surface Land

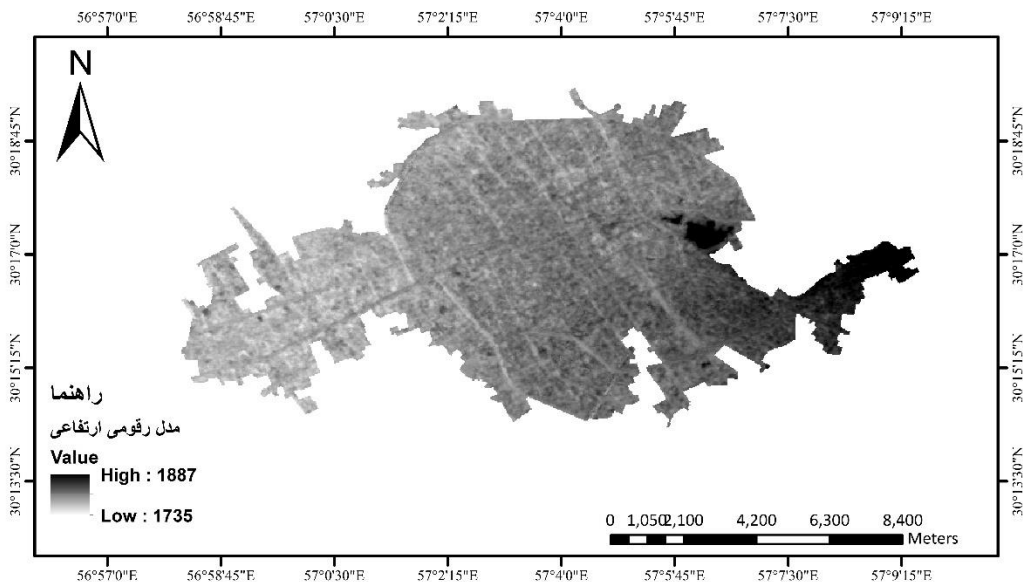
^۱ Polygons

^۲ Remote Sensing

^۳ Landsat8



شکل ۴. نقشه ارزش املاک مناطق مختلف کرمان



شکل ۵. نقشه مدل رقمی ارتفاعی کرمان

مادون قرمز نزدیک^۲ را منعکس سازد، استوار است. مقدار NDVI از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴].

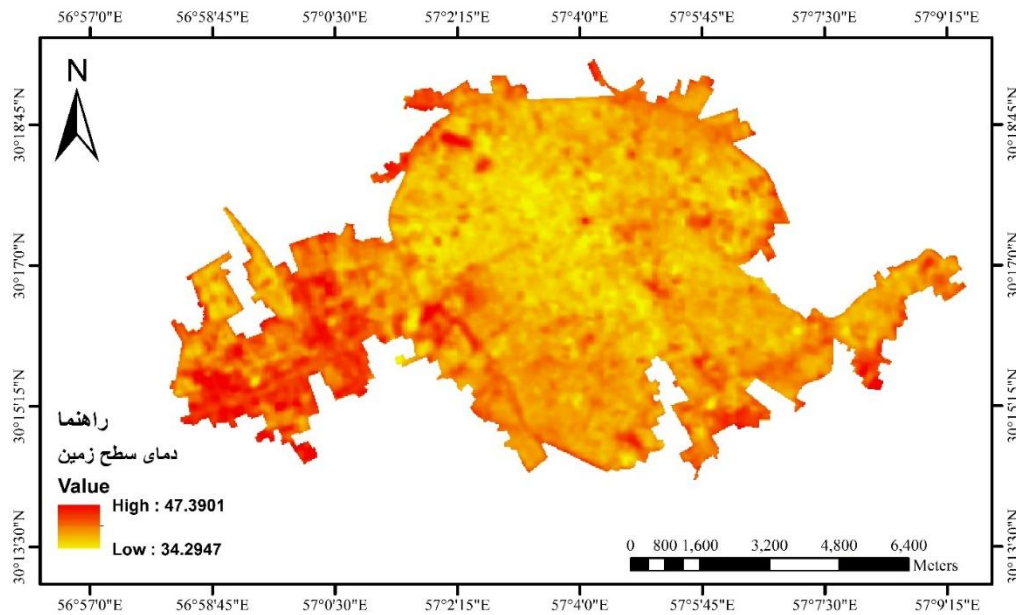
$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (1)$$

که در این رابطه Red میزان بازتاب باند قرمز و NIR میزان بازتاب باند مادون قرمز نزدیک را نشان می‌دهند. به‌منظور تهیه نقشه NDVI جهت بررسی پوشش گیاهی شهر کرمان طی سال ۱۳۹۷ دوازده نقشه رستر ماهانه تهیه شد.

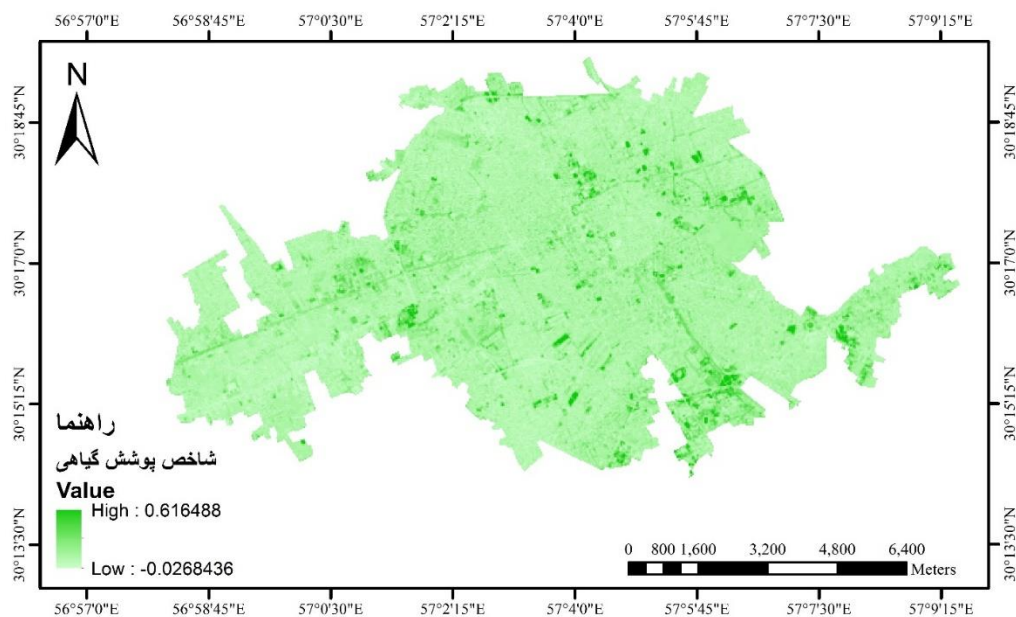
برای بررسی تأثیر پوشش گیاهی اطراف ساختمان‌ها بر مصرف انرژی از شاخص نرمال تفاوت پوشش گیاهی یا به‌اختصار NDVI^۱ استفاده شده است. این شاخص یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی است. ارزش عددی این شاخص بین اعداد +۱ و -۱ در نوسان است که هر چه به عدد +۱ نزدیک شود بر میزان پوشش گیاهی افزوده می‌شود. این شاخص بر پایه این حقیقت که کلروفیل موجود در ساختار گیاهان قادر است نور قرمز را جذب و لایه مزوفیل نور

^۲ Near-Infrared

^۱ Normalized Difference Vegetation index



شکل ۶. نقشه دمای سطح زمین کرمان در خرداد سال ۱۳۹۷



شکل ۷. نقشه شاخص پوشش گیاهی کرمان در خرداد سال ۱۳۹۷

مدل شبکه عصبی مصنوعی شبکه عصبی مصنوعی^۲ (ANN) ایده‌ای برای پردازش اطلاعات که از سیستم عصبی زیستی الهام گرفته شده است و مشابه مغز انسان اطلاعات را پردازش می‌کند. اصلی‌ترین عنصر پردازش در یک سیستم عصبی، نورون‌ها^۱ (سلول‌های عصبی) شناخته شده‌اند که برای حل یک مسئله باهم هماهنگ عمل می‌کنند. ANN نیز همانند انسان‌ها با

برای محاسبه سبزیگی متوسط هر موقعیت، اطراف هر نقطه (مختصات ساختمان) ابتدا یک بافر به شعاع ۲۰۰ متر محاسبه شده و سپس توسط آن، میانگین مقادیر سلول‌های^۱ رستر موجود در بافر، به عنوان سبزیگی اطراف ساختمان در نظر گرفته شده است. شکل ۷ یک نمونه نقشه NDVI شهر کرمان را نشان می‌دهد.

^۲ Neurons

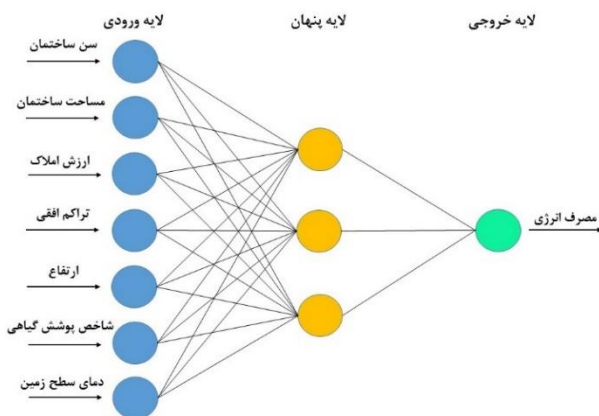
^۱ Pixels

^۲ Artificial neural network

پژوهش از روش اتصال وزن‌ها به‌منظور تعیین اهمیت نسبی متغیرهای مستقل در پیش‌بینی متغیر خروجی استفاده شده است. این روش از اتصالات (وزن‌های) میان لایه‌ها استفاده می‌کند، به‌طوری‌که اهمیت نسبی از مجموع قدر مطلق ضرب وزن‌های مربوط به هر پارامتر به دست می‌آید [۱۶]. فرض کنید ماتریس $W_{i,h}$ برابر با وزن‌های میان لایه ورودی و پنهان و ماتریس $W_{h,o}$ برابر با وزن‌های میان لایه پنهان و خروجی است. به‌طوری‌که به‌عنوان مثال، درایه (۱ و ۲) از ماتریس $W_{i,h}$ برابر با وزن میان نورون اول از لایه ورودی (پارامتر اول) و نورون دوم از لایه پنهان است. در این صورت برای یک شبکه عصبی با یک لایه پنهان، اهمیت نسبی (RI^5) پارامترها در این روش با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$RI_i = \sum_{h=1}^n |W_{i,h} * W_{h,o}| \quad (3)$$

جواب یک بردار است، به‌عنوان مثال؛ اهمیت نسبی پارامتر اول برابر با درایه اول بردار حاصل است. این روش بر اساس وزن نهایی شبکه که توسط آموزش شبکه برآورد می‌شود، به دست می‌آید.



شکل ۸. ساختار شبکه عصبی مصنوعی

نتایج

همان‌طور که گفته شد با توجه به متفاوت بودن میزان پوشش گیاهی و دما در طول سال، این مدل برای هر یک از ماه‌های سال جداگانه محاسبه گردید که نتایج آن‌ها در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. اغلب از انرژی گاز در مصارف خانگی جهت پخت‌وپز، آب گرم و گرمایش فضای ساختمان استفاده می‌شود. در فصل‌های پاییز و زمستان با توجه به افت دما میزان مصرف انرژی گاز در شش ماه دوم سال بیشتر از شش ماه اول است. در این پژوهش تغییرات مکانی این متغیرها در بازه‌های زمانی مشخص مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۹-۱۰). نتایج نشان می‌دهند که مساحت ساختمان دارای بالاترین اهمیت نسبی در بین متغیرهای ورودی به مدل در

مثال و تمرین یاد می‌گیرند و با پردازش روی داده‌های تجربی، قانون یا دانش نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند. نورون‌های شبکه به‌صورت لایه‌ای در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. هر شبکه حداقل از دو لایه، یک لایه ورودی و یک لایه خروجی تشکیل می‌شود. درعین حال شبکه می‌تواند یک یا چند لایه پنهان بین لایه‌های ورودی و خروجی داشته باشد. در این شبکه‌ها ابتدا داده‌های ورودی به همراه وزن‌های اولیه و یک مقدار W_0 تحت عنوان بایاس، از طریق نورون‌های لایه ورودی به شبکه وارد می‌شوند. در شبکه پرسپترون ساختار نورون به‌گونه‌ای است که تک‌تک ورودی‌ها (X_i) در وزن متناظر (W_i) خود ضرب شده و حاصل جمع این مقادیر با W_0 به هسته نورون می‌رود و مقدار خروجی (y) توسط تابع فعال‌ساز غیرخطی f طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$y = f(w_0 + \sum_{i=1}^p x_i w_i) \quad (2)$$

وزن‌های داده‌شده به نورون به نحوی تنظیم می‌شود که نزدیک‌ترین مقدار خروجی را نسبت به مقدار هدف تولید کند. این فرآیند آموزش شبکه نام دارد. هدف از آموزش شبکه این است که شبکه قانون کار را یاد گرفته و پس از آموزش خروجی مناسب را به ازای هر ورودی ارائه دهد. کاربرد اصلی شبکه عصبی مصنوعی توسعه مدل‌هایی برای پیش‌بینی مقادیر آینده یک متغیر وابسته خاص از یک مجموعه داده از متغیرهای مستقل است. در این پژوهش از شبکه عصبی پرسپترون تک لایه با تابع فعال‌ساز 'sigmoid' در لایه پنهان و تابع فعال‌ساز خطی (Purelin) در لایه خروجی استفاده شده و شبکه با تابع خطی Levenberg-Marquardt algorithm آموزش داده شده است. تعداد نورون‌ها در لایه ورودی به تعداد ویژگی‌های^۱ ورودی بستگی دارد که در این مدل از ۷ نورون استفاده شده است. برای آنکه تعداد بهینه نورون برای لایه پنهان مشخص شود، میزان همبستگی خروجی شبکه عصبی با تغییر تعداد نورون از ۱ به تعداد پارامتر، توسط شاخص R^2 سنجیده شده است [۱۵]. مدلی که مقدار شاخص R^2 برای آن بیشینه است، جهت مدل‌سازی انتخاب شده است. تعداد نورون در لایه خروجی بستگی به تعداد هدف^۲ دارد که در این مدل هدف میزان مصرف انرژی است. در این تحقیق ۷۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزش شبکه و ۳۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده صحت‌یابی در نظر گرفته شده است.

روش اتصال وزن‌ها^۳

اهمیت نسبی پیش‌بینی‌کننده‌ها یا متغیرهای ورودی، سهم هر یک از متغیرهای مستقل برای پیش‌بینی متغیر وابسته است. در این

^۱ Connection weights

^۵ Relative Importance

^۱ Activation function

^۲ Features

^۳ Target



هر دو بازه زمانی است. درصد اهمیت این متغیر در نیمسال دوم بیشتر از نیمسال اول است.

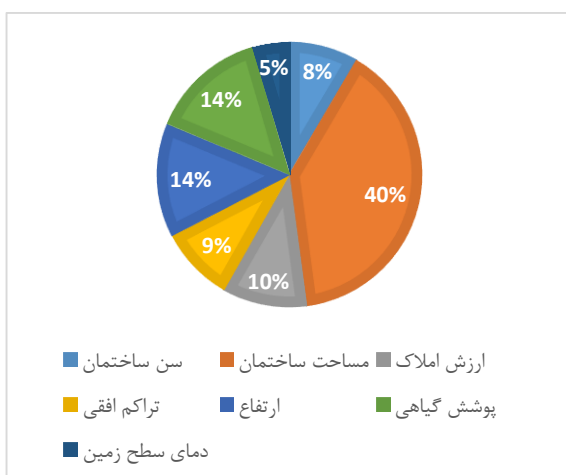
جدول ۱: اهمیت نسبی تأثیر متغیرها بر مصرف انرژی گاز در ۶ ماه اول سال

| دوره/متغیرهای ورودی | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور |
|---------------------|---------|----------|-------|-------|-------|--------|
| سن ساختمان | ۵/۸۴ | ۴/۷۶ | ۳/۳۱ | ۱۰/۶۳ | ۶/۳ | ۱۴/۳۲ |
| مساحت ساختمان | ۳۵/۶۳ | ۹/۵۴ | ۶۸/۵۹ | ۲۳/۴۵ | ۲۵/۱۶ | ۲۴/۱۳ |
| ارزش املاک | ۱۱/۲۱ | ۱۰/۳۱ | ۲/۴۸ | ۰/۸۵ | ۳۱/۸۵ | ۲/۴۳ |
| تراکم افقی | ۱۹/۱۲ | ۱۳/۸۸ | ۸/۷۷ | ۲۶/۸۲ | ۰/۴۲ | ۱۹/۴۷ |
| ارتفاع | ۹/۹۳ | ۲۴/۴۱ | ۳/۹۴ | ۲۵/۸۱ | ۳۱/۸۷ | ۱۵/۵۰ |
| پوشش گیاهی | ۱۴/۲۴ | ۲/۴۷ | ۵/۱۴ | ۱/۴۲ | ۳/۸۶ | ۱۵/۹۲ |
| دمای سطح زمین | ۳/۹۹ | ۳۴/۵۸ | ۷/۸۷ | ۱۰/۹۸ | ۱/۳۱ | ۸/۱۹ |

جدول ۲: اهمیت نسبی تأثیر متغیرها بر مصرف انرژی گاز در ۶ ماه دوم سال

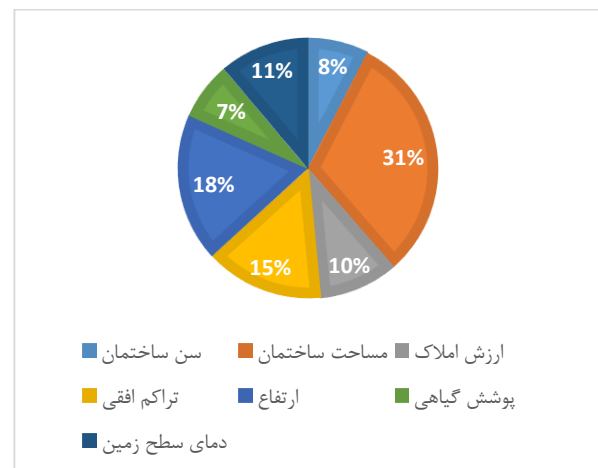
| دوره/متغیرهای ورودی | مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| سن ساختمان | ۸/۱۳ | ۴/۷۳ | ۴/۷۹ | ۸/۶۲ | ۹/۵۱ | ۱۴/۸ |
| مساحت ساختمان | ۱۶/۵۴ | ۱۲/۴۸ | ۴۶/۲۱ | ۳۳/۴۶ | ۶۴/۹ | ۶۳/۱۶ |
| ارزش املاک | ۲/۸۶ | ۲۹/۱ | ۵/۹۵ | ۱۷/۷۸ | ۲/۳۲ | ۳/۹۷ |
| تراکم افقی | ۱۵/۷۹ | ۱۶/۱۲ | ۶/۳۹ | ۷/۳۳ | ۴/۷۶ | ۴/۶۲ |
| ارتفاع | ۳۶/۲۹ | ۷/۴۳ | ۲۱/۵۱ | ۵/۶۹ | ۳/۸۳ | ۹/۴۲ |
| پوشش گیاهی | ۱۱/۷۱ | ۲۲/۲۵ | ۱۲/۱۹ | ۲۳/۵۹ | ۱۳/۲۶ | ۲/۳۰ |
| دمای سطح زمین | ۸/۶۵ | ۷/۹۸ | ۲/۹۴ | ۳/۵ | ۲/۲۱ | ۱/۶۹ |

بیشترین تأثیر بر روی مصرف انرژی گاز با ۱۸ درصد برای شش ماه اول و ۱۴ درصد برای شش ماه دوم است.



شکل ۱۰. اهمیت نسبی متغیرهای ورودی در نیمسال دوم

میزان تأثیر پوشش گیاهی بر مصرف انرژی گاز در نیمسال دوم دو برابر نیمسال اول است که با کاهش بار حرارتی در نیمسال دوم



شکل ۹. اهمیت نسبی متغیرهای ورودی در نیمسال اول

با افزایش فضای ساختمان انرژی بیشتری برای گرم کردن محیط لازم است اما تأثیر این عامل بر سایر مصارف گاز کمتر است. با توجه به توپوگرافی منطقه و اختلافات ارتفاعی مناطق مختلف شهر، در این مدل سازی متغیر ارتفاع پس از مساحت ساختمان دارای

جمع‌آوری و تلفیق مجموعه بزرگی از داده‌ها به کمک GIS به بررسی اهمیت نسبی چند عامل پرداخته شد که در بین آن‌ها مساحت ساختمان، ارتفاع و پوشش گیاهی از سهم بیشتری برخوردار بودند. با توجه به گستردگی این مسئله مدل‌های بسیاری می‌توانند به کار گرفته شوند هراندازه که بتوان عوامل بیشتری را به مدل وارد کرد نتایج به واقعیت نزدیک‌تر خواهند بود. پیشنهاد می‌شود با وارد کردن شرایط آب‌وهوایی، استفاده از داده‌های جمعیتی، بکار بردن تصاویر ماهواره‌ای و هوایی با وضوح بالاتر جهت تهیه نقشه‌ها، بالا بردن تعداد ساختمان‌های نمونه در مدل‌سازی و در صورت امکان استفاده از داده‌های چند شهر با محیط‌های مختلف اقلیمی به نتایج دقیق‌تری دست پیدا کرد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از کارشناسان محترم شرکت گاز استان کرمان برای در اختیار گذاشتن داده‌های موردنیاز تشکر و قدردانی می‌گردد.

باعث افزایش مصرف گاز جهت گرم کردن محیط می‌شود... با توجه به نتایج، تأثیر متغیرهای تراکم افقی ساختمان‌ها، ارزش املاک، سن ساختمان و دمای سطح زمین به نسبت کمتر بوده است. کم بودن درصد اهمیت دمای سطح زمین در نیمسال دوم می‌تواند بدان علت باشد که در محدوده شهر کرمان اختلاف دمایی فاحشی بین مناطق مختلف شهر وجود نداشته است.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

عوامل بسیار زیادی هستند که می‌توانند بر عملکرد انرژی ساختمان تأثیر بگذارند که بیانگر پیچیده بودن این مسئله است. مطالعات نشان داد که عوامل مکانی و ویژگی‌های محیط طبیعی و شهری در اطراف ساختمان به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد کلی انرژی ساختمان تأثیر می‌گذارد که این موضوع نشان‌دهنده نیاز به تجزیه‌وتحلیل تجربی بیشتر برای رسیدن به این‌که هرکدام از عوامل تا چه حدی بر مصرف انرژی ساختمان تأثیر می‌گذارند. در این پژوهش با

مراجع

- [9] C. Chatzipoulka, R. Compagnon, and M. Nikolopoulou, "Urban geometry and solar availability on façades and ground of real urban forms: using London as a case study," *Solar Energy*, vol. 138, pp. 53-66, 2016.
- [10] M. Santamouris *et al.*, "On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings," *Solar energy*, vol. 70, no. 3, pp. 201-216, 2001.
- [11] R. Ewing and F. Rong, "The impact of urban form on US residential energy use," *Housing policy debate*, vol. 19, no. 1, pp. 1-30, 2008.
- [12] K. Steemers, "Energy and the city: density, buildings and transport," *Energy and buildings*, vol. 35, no. 1, pp. 3-14, 2003.
- [13] H.-x. Zhao and F. Magoulès, "A review on the prediction of building energy consumption," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6, pp. 3586-3592, 2012.
- [14] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan, "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation," *NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md*, vol. 371, 1974.
- [15] H. Yonaba, F. Anctil, and V. Fortin, "Comparing sigmoid transfer functions for neural network multistep ahead streamflow forecasting," *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 275-283, 2010.
- [16] O. Ibrahim, "A comparison of methods for assessing the relative importance of input variables in artificial neural networks," *Journal of applied sciences research*, vol. 9, no. 11, pp. 5692-5700, 2013.
- [1] U. EIA, "Electric Power Monthly with Data for December 2017," *US Energy Information Administration*, 2018.
- [2] Y. Chen and T. Hong, "Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models," *Applied Energy*, vol. 215, pp. 717-735, 2018.
- [3] S. B. Sadineni, S. Madala, and R. F. Boehm, "Passive building energy savings: A review of building envelope components," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, no. 8, pp. 3617-3631, 2011.
- [4] A. Smith, R. Luck, and P. J. Mago, "Analysis of a combined cooling, heating, and power system model under different operating strategies with input and model data uncertainty," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 11, pp. 2231-2240, 2010.
- [5] M. Silva, V. Oliveira, and V. Leal, "Urban form and energy demand: A review of energy-relevant urban attributes," *Journal of Planning Literature*, vol. 32, no. 4, pp. 346-365, 2017.
- [6] O. S. Asfour and E. S. Alshawaf, "Effect of housing density on energy efficiency of buildings located in hot climates," *Energy and Buildings*, vol. 91, pp. 131-138, 2015.
- [7] Y. Ahn and D.-W. Sohn, "The effect of neighbourhood-level urban form on residential building energy use: A GIS-based model using building energy benchmarking data in Seattle," *Energy and Buildings*, vol. 196, pp. 124-133, 2019.
- [8] T. Douthat, J. D. Morgan, H. Alibašić, and A. Grant, "Passive building characteristics, and summertime residential energy use: A spatial analysis of energy efficiency in Gainesville, FL," *Building and Environment*, vol. 169, p. 106542, 2020.

ACEC2021-18489

اثر همکاری نیروگاه‌های بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر به عنوان منبع تولید مجازی در بازار برق

محسن اسلامی نیا^۱، فرشید کی نیا^۲

^۱دانشجو دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته؛ mohseneslami68@yahoo.com
^۲دانشیار، گروه بهینه سازی و مدیریت انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته؛ f.keynia@kgut.ac.ir

۱. مقدمه

در حال حاضر با پیشرفت تکنولوژی های مربوط به انرژی های نو، تمایل به استفاده از این نوع انرژی ها افزایش یافته است. در این راستا در بسیاری از کشورهای دنیا توسعه سیاست هایی مبنی بر رشد استفاده از این نوع انرژی ها با هدف ایجاد یک سیستم قدرت پایدار، تاب آور و اقتصادی انجام شده است [۱و۲]. در این میان انرژی بادی به عنوان یکی از انرژی های نو همواره مورد توجه قرار گرفته است، اما به دلیل طبیعت متناوب و احتمالاتی آن، مشارکت نیروگاه های بادی در بازار برق به دلیل انحراف بین تولیدی واقعی و مقدار توان تسویه شده در بازار با مشکلات و پیچیدگی هایی در طراحی و عملکرد همراه است [۳و۴].

از سوی دیگر با هوشمند سازی سیستم های قدرت، امکان استفاده از تجهیزات اندازه گیری هوشمند، امکان تبادل دو طرفه بین مصرف کنندگان و اپراتورهای سیستم بوجود آمده است. در راستای توسعه ی استفاده از انرژی های بادی این هوشمند سازی می تواند با ایجاد منبع تولید مجازی متشکل از بارهای انعطاف پذیر، منابع ذخیره ساز، خودرو های برقی و سایر منابع انرژی به مشارکت بیشتر و موثرتر انرژی های بادی کمک کند [۵و۶].

منبع تولید مجازی ها می توانند با مدیریت بهینه تقاضا و تولید و امکان مشارکت فعالانه مصرف کننده ها و تولید کنندگان توان پراکنده، به افزایش مشارکت مزارع بادی در بازار با کاهش خطاهای پیش بینی و در نتیجه کاهش جریمه های مالی آنها کمک کنند. [۷و۸].

در این مقاله، با در نظر گرفتن یک منبع تولید مجازی متشکل از مزرعه بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر به بررسی اثر

چکیده

امروزه با پیشرفت تکنولوژی های مربوط به توربین های بادی تمایل بیشتری به استفاده از این انرژی در بازارهای برق وجود دارد. اما با این همه به دلیل عدم قطعیت نیروگاه های بادی مشارکت آن ها در بازار برق با محدودیت مواجه می باشد. در این مقاله با در نظر گرفتن مزارع بادی، خودرو های الکتریکی و بارهای انعطاف پذیر به عنوان منبع تولید مجازی^۱ تلاش شده است اثر همکاری آنها در بازار برق بر کاهش انحراف توان تولیدی نیروگاه های بادی با مقدار توان تسویه شده در بازار مورد بررسی قرار گیرد.

بدین منظور دو مدل احتمالاتی در یک بازار برق روز-پیش^۲ در نظر گرفته شده است. در مدل اول نیروگاه های بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر با تشکیل یک منبع تولید مجازی به صورت رقابتی پیشنهاد قیمت می دهند، در حالی که در مدل دوم هر کدام به صورت جداگانه در بازار برق شرکت می کنند. در هر دو مدل تولید سناریو و تکنیک کاهش جهت شبیه سازی عدم قطعیت توان تولیدی توربین های بادی در نظر گرفته شده است و مکانیزم جریمه برای تعدی توان تولیدی مزرعه بادی از مقدار توان تسویه شده در بازار در نظر گرفته شده است. نتایج عددی نشان می دهد که مزرعه های بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر تمایل دارند که با تشکیل منبع تولید مجازی به سود بیشتری از مشارکت در بازار برق برسند.

واژه های کلیدی: منبع تولید مجازی، مزرعه بادی، خودروهای برقی، بارهای انعطاف پذیر

کسری مواجه می شود، میزان توان کسری شامل جریمه ای با قیمتی بیشتر از قیمت بازار روز-پیش می شود.

۲.۲. مدل دوم

در این مدل مزرعه بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر به صورت غیر مشارکتی در یک بازار روز-پیش شامل منابع تولید متداول رقابت می کنند. در این بین در صورت تعدی یا کسری توان تولیدی مزرعه بادی از مقدار تسویه شده در بازار توسط اپراتور بازار جریمه می شوند.

۳. توابع هدف مسأله

۳.۱. توابع هدف مدل اول

در این مدل استراتژی پیشنهاد قیمت منابع تولید متداول افزایش سود حاصل از تولیدشان می باشد. بدین منظور مسئله بهینه سازی آن ها به صورت زیر می باشد:

$$\max_{P_{i,t}} \sum_{t=1}^T [p_t P_{i,t} - (\alpha_i P_{i,t} + 0.5\beta_i P_{i,t}^2)] \quad (1)$$

$$s. t. P_i^{min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{max} \quad (2)$$

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} - \xi_i^{up} P_i^{max} \leq 0 \quad (3)$$

$$P_{i,t-1} - p_{i,t} - \xi_i^{down} P_i^{max} \leq 0 \quad (4)$$

قید ۲ حدود بیشینه و کمینه توان خروجی منابع تولید متداول را مشخص می کند و قید های ۳ و ۴ مشخص کننده حدود رمپ آن ها هستند.

به منظور بیشینه کردن سود منبع تولید مجازی مسئله بهینه سازی مربوط به آن به صورت زیر بیان می شود:

$$\max_{P_{b,t}^{vpp}} \sum_{t=1}^T \{ (p_t P_{b,t}^{vpp} + r_t^+ p_t \Delta_t^+ - r_t^- \rho_t \Delta_t^-) - c(S_t^{out}) \} \quad (9)$$

$$s. t. P_{b,t}^{vpp} = P_{b,t}^w + S_t^{out} - S_t^{in} \quad (10)$$

$$S_t^{in} + N_t^{in} - S_t^{-in} \leq 0 \quad (11)$$

$$S_t^{out} + N_t^{out} - S_t^{-out} \leq 0 \quad (12)$$

$$P_{b,t}^w \leq P_t^{w,max} \quad (13)$$

$$P_t^{dr,min} \leq P_t^{dr} \leq P_t^{dr,max} \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^T P_t^{dr} \leq P^c \quad (15)$$

$$S_t^{in}, S_t^{out}, P_{b,t}^w, N_t^{out}, N_t^{in}, \Delta_t^+, \Delta_t^- \geq 0 \quad (23)$$

قید ۱۰ بیانگر این مسئله است که مجموع توان تولید مزرعه بادی و خودروهای برقی برابر با توان خروجی منبع تولید مجازی در زمان t می باشد.

قیود ۱۱ و ۱۲ تضمین می کنند که مقادیر شارژ و شارژ خودروهای برقی از حد مشخص شده تجاوز نکنند.

مشارکت آنها بر کاهش تعدی توان تولیدی مزرعه بادی از مقدار تسویه شده آن در بازار پرداخته شده است.

۲. چارچوب روش ارائه شده

روش پیشنهادی در این مقاله با در نظر گرفتن یک چارچوب بازار جدید مبادرت به پیشنهاد قیمت در یک بازار برق روز-پیش می کند. در این بازار مزرعه بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر با تشکیل یک منبع تولید مجازی اقدام به پیشنهاد قیمت و رقابت با منابع تولید متداول می کنند. در این راستا در این مقاله جهت بررسی اثر استراتژیکی این معادلات بر بازار برق و آنالیز تمایل این منابع انرژی به تشکیل منبع تولید مجازی، دو مدل معادلات تصادفی بر اساس تئوری غیر انحصاری در نظر گرفته شده است. در مدل اول مزرعه بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر با تشکیل یک منبع تولید مجازی و به صورت رقابتی در یک بازار روز-پیش پیشنهاد قیمت می دهند. در مدل دوم مزرعه بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر هر کدام جداگانه در بازار شرکت می کنند و پیشنهاد قیمت می دهند.

۲.۱. مدل اول

در این مدل مزرعه بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر با تشکیل منبع تولید مجازی در بازار برق شرکت می کنند. در این بازار منبع تولید مجازی با ارائه پیشنهاد قیمت به اپراتور بازار^۳ به رقابت با منابع تولید متداول می پردازد. در این راستا به دلیل عدم قطعیت مزرعه بادی این امکان وجود دارد که منبع تولید مجازی به دلیل انحراف بین توان تولید واقعی و توان تسویه شده در بازار روز-پیش توسط اپراتور بازار جریمه شود. بدین منظور قرارداد هایی مابین مزرعه بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر به منظور کاهش این اختلاف توان بسته می شود، به طوری که با کاهش توان تولیدی مزرعه بادی از مقدار تسویه شده در بازار، بارهای انعطاف پذیر بخشی از توان مصرفی خود را کاهش می دهند و خودروهای برقی اقدام به تخلیه شارژ خود به شبکه می کنند. زمانی که توان تولیدی نیروگاه های بادی بیشتر از توان تسویه شده در بازار روز-پیش است مشتری ها می توانند بارشان را افزایش دهند و خودروهای برقی اقدام به شارژ شدن نمایند. همچنین به منظور افزایش سود منبع تولید مجازی، کنترل ظرفیت توان باقیمانده ی خودروهای برقی در اختیار منبع تولید مجازی قرار داده شده است، به گونه ای که خودروهای برقی می توانند برق خود را در زمان هایی با قیمت پایین تر از بازار روز-پیش بخرند و در زمان هایی با قیمت بالاتر به شبکه بفروشند.

زمانی که توان تولیدی منبع تولید مجازی بیش از مقدار تسویه شده ی آن باشد، توان مازاد با قیمتی کمتر از قیمت بازار روز-پیش به بازار فروخته می شود و زمانی که توان تولیدی منبع تولید مجازی با

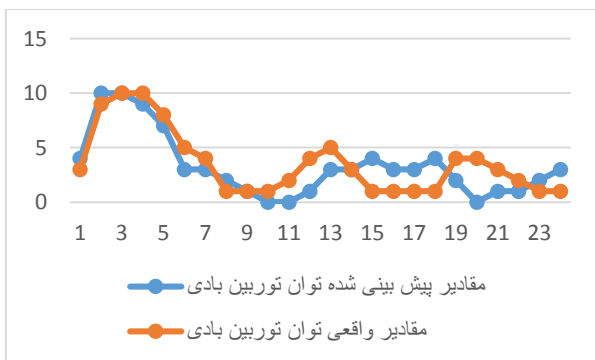


150 MW و مزرعه بادی شامل ده توربین بادی هر کدام با ظرفیت 10 MW در نظر گرفته شده اند. همچنین ظرفیت شارژ باتری های خودروهای برقی، 20MWh و حد شارژ و دشارژ آن ها 3 MW در نظر گرفته شده است.

ظرفیت افزایش و کاهش بار مربوط به بارهای انعطاف پذیر 3 MW در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ و شکل ۱ اطلاعات مربوط به بار و توان تولیدی توربین بادی در مدت بیست و چهار ساعت مشخص شده است.

جدول ۱: پارامتر α مربوط به تابع بار

| زمان | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ |
|--------------|----|----|----|----|----|----|
| $\alpha(MW)$ | ۳۳ | ۳۰ | ۳۰ | ۲۷ | ۳۰ | ۳۲ |
| زمان | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ |
| $\alpha(MW)$ | ۴۰ | ۶۰ | ۷۴ | ۸۷ | ۹۱ | ۹۳ |
| زمان | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۷ | ۱۸ |
| $\alpha(MW)$ | ۹۳ | ۹۸ | ۸۹ | ۸۶ | ۸۶ | ۹۱ |
| زمان | ۱۹ | ۲۰ | ۲۱ | ۲۲ | ۲۳ | ۲۴ |
| $\alpha(MW)$ | ۹۳ | ۹۷ | ۹۳ | ۷۵ | ۳۹ | ۳۷ |



شکل ۳: توان تولیدی توربین های بادی

۴.۱ رفتار استراتژیک خودروهای برقی در مدل های مختلف
شکل ۲ رفتار شارژ و دشارژ خودروهای برقی در مدل های اول و دوم را نشان می دهد. شکل ۳ توان مبادله شده بین خودروهای برقی و مزرعه بادی در منبع تولید مجازی مدل اول را نشان می دهد. مقادیر منفی در این شکل به معنی فراهم کردن توان توسط مزرعه بادی برای شارژ خودروهای برقی و مقادیر مثبت به معنی جبران کسری توان مزرعه بادی توسط خودروهای برقی می باشند. از شکل ۲ می توان دریافت که در زمان های کم باری، خودروهای برقی ها تمایل به شارژ شدن دارند. مقادیر شارژ و دشارژ خودروهای برقی در مدل اول، کمتر از همین مقادیر در مدل دوم می باشند، به این دلیل که در مدل اول، مزرعه بادی می تواند مقادیر بیشتری توان در زمان های کم باری ذخیره کند و بنابراین خودروهای برقی مقادیر کمتری برق نسبت به مدل دوم جهت شارژ شدن از شبکه می خرد.

قید ۱۳ مشخص کننده حد بیشینه توان مزرعه بادی در زمان t باشد. قیود ۱۵ و ۱۴ تضمین کننده حدود افزایش یا کاهش بارهای انعطاف پذیر در طول دوره T می باشد.

همچنین شرط تسویه ی بازار به صورت زیر بیان می شود:

$$\sum_{i=1}^n P_{i,t} + P_{b,t}^{vpp} = a_t - b_t p_t \quad (24)$$

بنابراین مسئله بهینه سازی در این مدل از ترکیب n مسئله بهینه سازی منابع تولید متداول با مسئله بهینه سازی منبع تولید مجازی تشکیل می شود.

۳.۲. توابع هدف مدل دوم

در این مدل مسئله بهینه سازی برای منابع تولید متداول مشابه مدل اول در نظر گرفته شده است.

مسئله بهینه سازی مزرعه بادی به صورت زیر بیان می شود:

$$\max_{P_{b,t}^w, t=1, \dots, T} \left[\sum_{t=1}^T (p_t P_{b,t}^w + r_t^+ p_t \Delta_t^+ - r_t^- p_t \Delta_t^-) \right] \quad (25)$$

$$s. t. P_{b,t}^w \leq P_t^{w,max} \quad (26)$$

$$P_{a,t}^w - P_{b,t}^w = \Delta_t^{w+} - \Delta_t^{w-} \quad (27)$$

$$P_{b,t}^w, \Delta_t^{w+}, \Delta_t^{w-} \geq 0 \quad (31)$$

مسئله بهینه سازی خودروهای برقی به صورت زیر بیان می شود:

$$\max_{t=1, \dots, T} \sum_{t=1}^T [p_t (S_t^{out} - S_t^{in}) - c S_t^{out}] \quad (32)$$

$$S_t^{in} - S_t^{-in} \leq 0 \quad (35)$$

$$S_t^{out} - S_t^{-out} \leq 0 \quad (36)$$

مسئله بهینه سازی بارهای انعطاف پذیر به صورت زیر بیان می شود:

$$\max_{P_t^{dr}, t=1, \dots, T} \sum_{t=1}^T (p_t P_t^{dr}) \quad (39)$$

$$s. t. P_t^{dr,min} \leq P_t^{dr} \leq P_t^{dr,max} \quad (40)$$

$$\sum_{t=1}^T P_t^{dr} \leq P^c \quad (41)$$

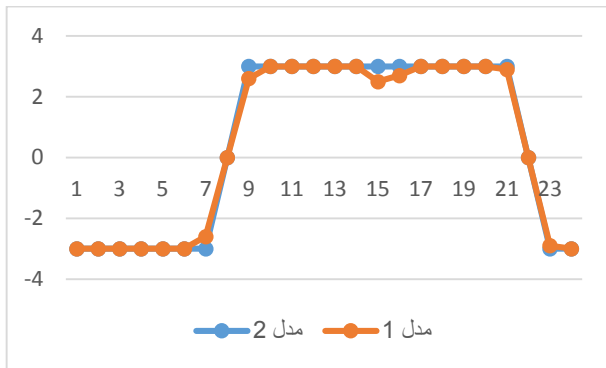
و شرط تسویه تسویه بازار به صورت زیر می باشد:

$$\sum_{i=1}^n P_{i,t} + S_t^{out} - S_t^{in} + P_{b,t}^w + P_t^{dr} = a_t - b_t p_t \quad (41)$$

قابل ذکر است که در این معادلات، قیمت های بازار متغیر های داخلی هستند که توسط پیشنهاد قیمت استراتژیک همه ی شرکت کنندگان بازار تعیین می شوند.

۴. شبیه سازی و تحلیل نتایج

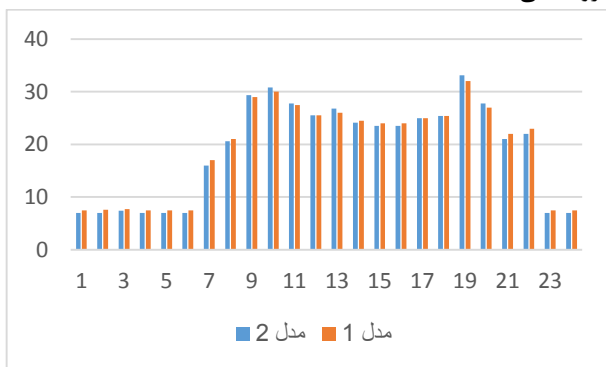
جهت بررسی روش ارائه شده، یک بازار روز-پیش شامل منابع تولید متداول، یک مزرعه بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر در نظر گرفته شده است. هر یک از منابع تولید متداول با ظرفیت تولید



شکل ۴: تغییرات توان بارهای انعطاف پذیر

۴.۳ رفتار استراتژیک منابع تولید متداول در مدل های مختلف

در شکل ۵ نشان داده شده است که چگونه در زمان های کم باری و اوج بار نیروگاه G1 در هر دو مدل اول و مدل دوم اقدام به تامین بار میکند. همچنین رفتار استراتژیک نیروگاه G2 نیز شبیه همین نیروگاه می باشد.



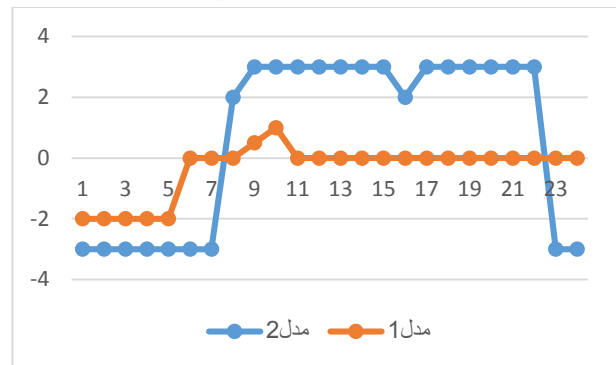
شکل ۵: خروجی منبع تولید G1 در مدل ۱ و مدل ۲

۴.۴ رفتار استراتژیک مزرعه بادی در مدل های مختلف

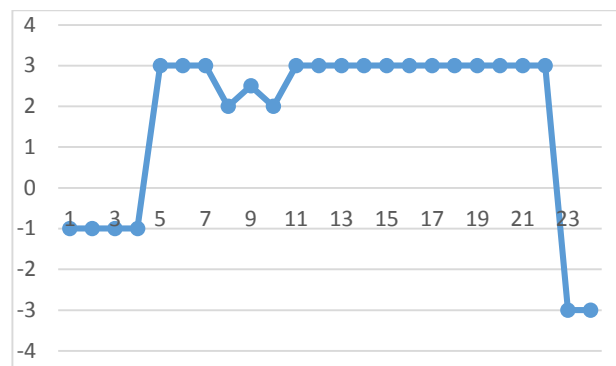
شکل ۶ توان خروجی مزرعه بادی در مدل های مختلف را نشان می دهد. همانطور که از شکل مشخص است در مقایسه با مدل دوم در زمان های کم باری توان خروجی در مدل اول کمتر از مدل دوم می باشد.

در زمان های اوج بار، توان خروجی مزرعه بادی در مدل اول نسبت به مدل دوم بیشتر می شود. در مدل دوم توان خروجی مزرعه بادی در زمان های کم باری به دلیل افزایش تقاضای خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر افزایش می یابد. اما در مدل اول به دلیل افزایش نسبتاً کم تقاضای توان خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر در زمان های کم باری توان خروجی مزرعه بادی نسبت به مدل دوم کمتر می باشد. در مدل اول، منبع تولید مجازی می تواند با هدف ذخیره بیشتر توان توسط خودروهای برقی یا مصرف بیشتر توان توسط بارهای انعطاف پذیر در زمان های کم باری توان خروجی خود را به بازار کاهش دهد. سپس در زمان های اوج بار، منبع تولید مجازی می تواند توان خروجی مزرعه بادی را به شبکه با کاهش بار

زمان های اوج بار خودروهای برقی در مدل اول بیشتر توان ذخیره شده را به عنوان جبران کسری به مزرعه بادی انتقال می دهند، بنابراین دشارژ برق کمتری نسبت به مدل دوم به شبکه دارد.



شکل ۶: خروجی خودروهای برقی در مدل ۱ و مدل ۲



شکل ۷: توان مبادله شده بین خودروهای برقی و مزرعه بادی در مدل ۱

۴.۲ رفتار استراتژیک بارهای انعطاف پذیر در مدل های مختلف

شکل ۴ توان مبادله شده بین مزرعه بادی و بارهای انعطاف پذیر در مدل اول و توان فراهم شده توسط بارهای انعطاف پذیر در مدل دوم را نشان می دهد. در مدل اول مقادیر منفی به معنای تامین برق بارهای انعطاف پذیر توسط مزرعه بادی و مقادیر مثبت به معنای جبران توان کسری مزرعه بادی توسط بارهای انعطاف پذیر می باشد. در مدل دوم مقادیر منفی به معنای افزایش تقاضا بارهای انعطاف پذیر و مقادیر مثبت به معنای حذف قسمتی از بار این بارها می باشد.

از شکل ۴ می توان دریافت که هر دوی مقادیر افزایش بار در زمان های کم باری و کاهش بار بارهای انعطاف پذیر در زمان های اوج بار در مدل اول نسبت به مدل دوم کمتر می باشند.

این مسئله عمدتاً به دلیل این است که در مدل اول بارهای انعطاف پذیر با هدف جبران انحراف تولید مزرعه بادی اقدام به کاهش یا افزایش بار می کنند اما مدل دوم بارهای انعطاف پذیر با هدف پیشینه کردن سود این کار را انجام می دهند.



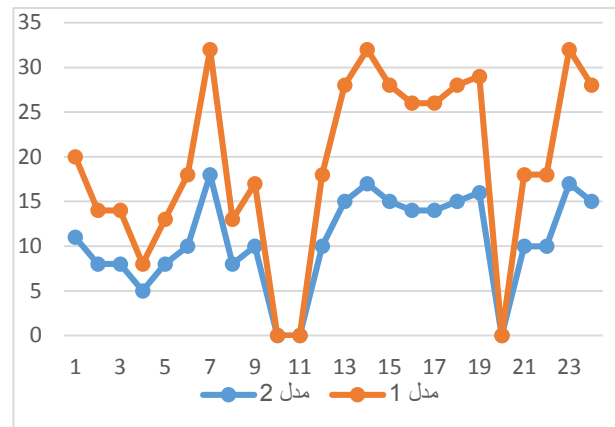
نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله اثر همکاری متقابل مزارع بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر بر کاهش انحراف توان تولیدی مزارع بادی از مقدار پیش بینی شده در بازار برق مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور دو مدل احتمالاتی که در مدل اول مزارع بادی، خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر با تشکیل منبع تولید مجازی اقدام به پیشنهاد قیمت در بازار برق می کنند اما در مدل دوم هر کدام جداگانه در بازار برق شرکت می کنند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که در مدل اول خودروهای برقی و بارهای انعطاف پذیر می توانند در مواقع انحراف توان تولید مزارع بادی از مقدار تسویه شده در بازار، اقدام به جبران این کسری توان کنند در حالی که در مدل دوم مزرعه بادی به دلیل این انحرافات جریمه می شود.

مراجع

- [1] S.J. Kazempour, H. Zareipour, Equilibria in an oligopolistic market with wind power production, IEEE Trans. Power Syst. 29 (2) (2014) 686–697.
- [2] Y. Xiao, X. Wang, X. Wang, et al., Behavior analysis of wind power producer in electricity market, Appl. Energy 171 (2016) 325–335.
- [3] M. Asensio, J. Contreras, Risk-constrained optimal bidding strategy for pairing of wind and demand response resources, IEEE Trans. Smart Grid 8 (1) (2017) 200–208.
- [4] Palizban O, Kauhaniemi K, Guerrero JM. Microgrids in active network management - Part I: hierarchical control, energy storage, virtual power and market participation. Renew Sustain Energy Rev 2014;36:428–39.
- [5] Yavuz L, Onen A, Muyeen SM, Kamwa I. Transformation of microgrid to virtual power plant - a comprehensive review. IET Gener, Transm Distrib 2019;13(11):2077–87.
- [6] Saboori H, Mohammadi M, Taghe R. Virtual power plant (VPP), definition, concept, components and types. In: 2011 asia-pacific power and energy engineering conference. Wuhan; 2011. p. 1–4.
- [7] A. Shahmohammadi, R. Sioshansi, A.J. Conejo, et al., Market equilibria and interactions between strategic generation, wind, and storage, Appl. Energy 220 (2018) 876–892.
- [8] W. Hu, C. Su, Z. Chen, et al., Optimal operation of plug-in electric vehicles in power systems with high wind power penetrations, IEEE Trans. Sustainable Energy 4 (3) (2013) 577–585.

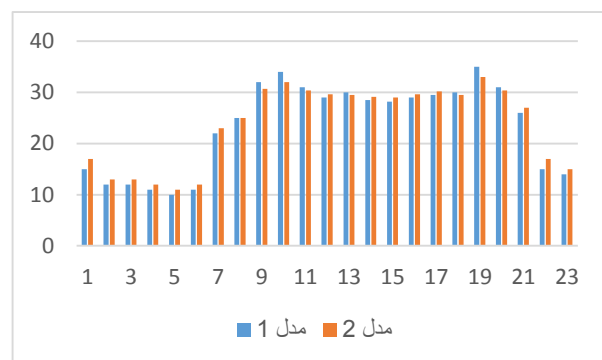
و دشارژ باتری های خودروهای برقی افزایش دهد و سود بیشتری نصیبش شود.



شکل ۶: توان خروجی مزرعه بادی در مدل ۱ و مدل ۲

۴.۵. قیمت های تسویه شده بازار در مدل مختلف

شکل ۷ به ارائه قیمت های تسویه شده بازار در دو مدل اول و دوم پرداخته است. همانطور که از شکل مشخص است در زمان های کم باری پروفایل قیمت در مدل دوم بالاتر از مدل اول قرار گرفته است، در حالیکه در زمان های اوج بار مدل اول قیمت های بالاتری دارد. این موضوع بیانگر توانایی تشکیل منبع تولید مجازی در مشارکت در بازار و رسیدن به سود بیشتر با جریمه کمتر و فروش برق با قیمت بالاتر می باشد.



شکل ۷: توان خروجی مزرعه بادی در مدل ۱ و مدل ۲

ACEC2021-21020

استفاده از انرژی خورشیدی در فرآیندهای استخراج مس

سیماناز گلایی بجستانی^۱، علیرضا ذاکر حسینی^۲، پویا اردشیری^۳، سمیه خواجهوند^۴، زهرا حسینی زاده^۵

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد معدن، بین المللی امام خمینی (ره) chocolatepink44@gmail.com

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد معدن، تربیت مدرس alireza.zakerhosseini@gmail.com

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد معدن، آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات puya_ardeshiri@yahoo.com

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد معدن، تربیت مدرس somaye_kh74@yahoo.com

^۵ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد معدن، صنعتی همدان zahra.hasanalizade@gmail.com

چکیده

در سال ۲۰۱۲ شیلی با تولید ۴٫۵ میلیون تن بیش از یک سوم مس معدنی جهان را تولید کرده است. ایران نیز با تولید ۲۳۰ هزار تن در جایگاه چهاردهم قرار دارد. کشورهای متعدد دیگری از جمله پرو، چین، آمریکا و روسیه هستند که فعالیت های قابل توجهی دارند. تولید مس پالایشی در جهان در سال ۲۰۱۲ حدود ۱٫۲۰ میلیون تن بوده است که از این مقدار ۷٫۱۶ میلیون تن مس اولیه (تولید معدنی) بوده و ۴٫۳ میلیون تن مس ثانویه (بازیافت قراضه) بوده است. چین با تولید ۸٫۵ میلیون تن بیشترین سهم را در تولید مس پالایشی دارد. ایران نیز با تولید ۲۳۰ هزار تن در جایگاه بیستم قرار دارد [۱].

فرآوری مس بسیار پیچیده است با افزایش تقاضا، قیمت بسیار متغیر انرژی، کاهش عیار سنگ معدن که مصرف انرژی را افزایش می دهد.

برای کاهش ریسک ناشی از این مسائل، صنعت به دنبال استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است. با توجه به اینکه مهمترین معادن مس در ایران در مناطقی با سطح تابش زیاد نور خورشید واقع شده اند، انرژی خورشیدی این پتانسیل را دارد که یک منبع پایدار انرژی باشد. این مقاله مروری بر فناوری های فعلی خورشیدی و نحوه بکارگیری آنها برای مقابله با برخی از چالش های صنعت معدن مس امروز ارائه می دهد. این مقاله استفاده از فناوری های خورشیدی و فتوولتائیک خورشیدی برای تولید نیرو و گرما برای فرآیندهای استخراج مس را بیان می کند.

واژه های کلیدی: معدن مس، تکنولوژی انرژی خورشیدی، سیستم های پیشرفته انرژی پاک.

مقدمه

فلز مس سومین فلز پر مصرف پس از فولاد و آلومینیوم است. امروزه فلز مس نسبت به اقتصاد جهانی تاثیرپذیر است و به عنوان شاخص اقتصاد و یا فشار سنجش اقتصاد جهان شناخته می شود. تولیدکنندگان بزرگ مس شیلی، چین، پرو و... می باشند و مصرف کننده های بزرگ جهان چین، ایالات متحده، آلمان و ... می باشند [۲].

برای به دست آوردن کالاهای معدنی از سنگ معدن مس، سه فرایند اساسی یعنی استخراج، جابجایی مواد و فرآوری مورد نیاز است [۳]. میزان مصرف انرژی مورد نیاز برای فرآوری هر ماده معدنی متفاوت است. برای سنگ معدن مس، فرآوری ۴۵ درصد از کل انرژی مورد نیاز، استخراج و حمل مواد ۴۵ درصد، و هزینه های عمومی و اداری ۱۰ درصد را شامل می شود [۴]. انرژی در صنعت معدن مس به سه شکل مورد نیاز است: برق، گرما و سوخت. سهم هر نوع انرژی ۳۵ درصد برق، ۲۶ درصد سوخت دیزل و ۲۰ درصد سوخت زیست توده است [۵].

چرخه تولید مس سبب انتشار گاز CO₂ می شود. فرآیندهای خرد کردن و آسیاب سهم عمده ای در کل انتشار CO₂ دارد.

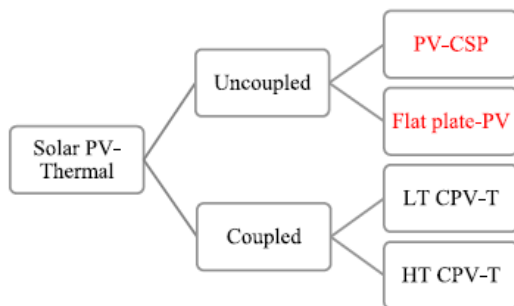
عیار ذخایر مس به مرور کاهش یافته است. به عنوان مثال، بین سالهای ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۲، عیار سنگ مس از ۱٫۲۵ درصد به ۰٫۸۴ درصد کاهش یافته است [۵]. این امر منجر به افزایش چشمگیر تقاضای انرژی می شود. این بدان معناست که تقاضای انرژی به دلیل کاهش مداوم عیار سنگ معدن که نیازهای بیشتری به انرژی دارد، ۶ برابر سریعتر از تولید مس رشد می کند [۶].

هدف جایگزین کردن انرژی سوخت فسیلی از شبکه با انرژی خورشیدی است، وقتی که برق عمدتاً جریان متناوب است، صنعت معدن مس باید تمرکز انرژی خورشیدی را در ترکیب انرژی آینده خود مدنظر قرار دهد.

دارند. این سامانه با به کارگیری پانل های خورشیدی که هرکدامشان را شماری از سلول های خورشیدی تشکیل می دهد، توان الکتریکی تولید می کند. سلول های فتوولتائیک که از یک اتصال P-N ساخته شده اند، بدون هیچ آلودگی نور خورشید را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می کنند. سلول های فتوولتائیک از نظر تکنولوژی ساخت به سه گروه مجزا قابل تفکیک می باشند:

- سلول های خورشیدی مونوکریستال و پلی کریستال
- سلول خورشیدی فیلم نازک (Thin Film)
- تکنولوژی های نوظهور (Next generation)

PV خورشیدی را می توان در مقیاس های کوچک و بزرگ نصب کرد. با این حال ، صنعت معدن مس به دلیل اندازه تاسیسات مورد توجه برنامه های کاربردی در مقیاس بزرگ قرار می گیرد [۶]. هدف از فن آوری های ترکیبی PV-Thermal خورشیدی (PV-T) کاهش هزینه ها با ترکیب مزایای جمع کننده های حرارتی و PV است. آنها ممکن است در دو مجموعه مرتب شوند: سیستم های PV-T به هم پیوسته و جدا شده. شکل ۱ انواع مختلف فناوری های PV-T را نشان می دهد. در سیستم های PV-T همراه با تابش خورشید استفاده نشده توسط سلول های PV توسط جذب کننده حرارتی جذب می شود. رقابتی ترین سیستم PV-T با نام متمرکز PV-T (CPV-T) شناخته می شود. در CPV-T ، سلولهای خورشیدی به طور همزمان به عنوان گیرنده حرارتی و مبدل PV استفاده می شوند [۷].



شکل ۱: طبقه بندی فناوری های PV-CSP PV-T جدا نشده و Flat-plate-PV

در سیستم PV-T جدا نشده ، پانل های PV و جمع کننده های حرارتی از یکدیگر جدا می شوند. گیاهان PV-CSP مثال خوبی از سیستم PV-T جدا نشده هستند. جمع کننده صفحات تخت و پانل های PV که برای مصارف خانگی استفاده می شوند نیز می توانند به عنوان یک سیستم PV-T جدا نشده در نظر گرفته شوند.

۵. کاربردهای انرژی خورشیدی در صنعت معدن مس

۵.۱ کاربردهای PV خورشیدی

عملیات معدنکاری و فرآوری مواد معدنی حرارتی و الکتریکی است. در مورد فرآیندهای الکتریکی ، می توان فرض کرد که نفوذ انرژی فتوولتائیک در مقیاس بزرگ با نیروگاه های PV سنتی به شبکه های برقی تغذیه کننده کارخانه های معدنی ،

استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین فرآیندهای استخراج معدن مس باید بتواند تنوع مصرف انرژی مرتبط با تغییرپذیری در ویژگی های مواد معدنی را در نظر بگیرد. مهمتر از همه سختی سنگ است که تأثیر مستقیمی بر مصرف انرژی در خردایش دارد [۶].

نه تنها با کاهش گازهای گلخانه ای بلکه با کمبود آب مقابله شود. از سال ۲۰۱۷ ، مصرف آب در صنعت مس ۵۴٫۵ متر مکعب بر ثانیه (۱۹ درصد آب دریا ، ۸۱ درصد آب قاره) بود. ۶۷ درصد از این مقدار توسط فرآیند کنسانتره سازی مصرف می شود [۷]. برای تأمین نیازهای صنعت مس ، نیاز به آب دریا همچنان افزایش می یابد. نمک زدایی آب دریا فرآیندی انرژی بر است و با توجه به اینکه ۹۹ درصد تاسیسات نمک زدایی نصب شده از سوخت های فسیلی به عنوان منبع انرژی بهره می گیرند، عواملی همچون قیمت متغیر و پایان پذیری این نوع منابع انرژی، تأثیرات مخرب زیست محیطی ناشی از انتشار آلاینده ها و گازهای گلخانه ای در کنار سایر فاکتورهای راهبردی، سیاسی و اجتماعی سبب توجه گسترده به توسعه کاربرد انرژی های تجدیدپذیر به عنوان نیروی محرکه تاسیسات نمک زدایی شده است [۸]. استفاده از انرژی خورشیدی برای نمک زدایی و انتقال آب از دریا یک راه حل عملی است. ادغام انرژی خورشیدی در صنعت معدن مس می تواند نه تنها با کاهش گازهای گلخانه ای بلکه با کمبود آب مقابله کند [۶].

۲- روش شناسی

پس از برجسته سازی مسائل مربوط به انرژی صنعت معدن مس ، نمای کلی فرآیندهای استخراج مس را ارائه می دهیم. در مرحله بعد ، فناوری های مختلف خورشیدی شرح داده می شوند. سپس کاربردهای کنونی و آینده انرژی خورشیدی در صنعت معدن ارائه و مورد بحث قرار می گیرد.

۳- کارخانه های فرآوری مواد معدنی مس

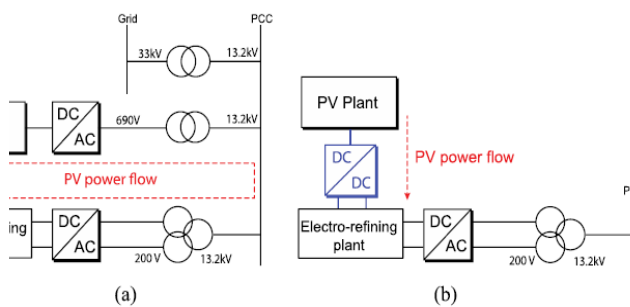
فرآیندهای پیر متالورژی و هیدرومتالورژی برای تصفیه سنگ معدن مس استفاده می شود. پیرومتالورژی یکی از شاخه های متالورژی استخراجی است و شامل عملیات حرارتی مواد معدنی و سنگ های معدن متالورژیکی می باشد. همچنین تمرکز آن روی تحولات فیزیکی و شیمیایی مواد برای بازیافت فلزات با ارزش است [۹]. در فرآیند پیرومتالورژی ، کانیهای مس سولفید برای آزادسازی مواد معدنی آسیاب می شوند [۶]. فرآیند هیدرومتالورژی با افزودن اسید سولفوریک رقیق به منظور تشکیل محلول ضعیف سولفات مس ، سنگ معدن را درمان می کند [۳]. فرآوری مس مقادیر قابل توجهی برق ، گرما ، سوخت ، آب ، اکسیژن و ... نیاز دارد. و بیشترین مصرف انرژی در فرآیند آسیاب است و آب زیادی در شست و شو و شناورسازی نیاز است. سوخت مورد نیاز برای عملیات حمل و نقل و حفاری مورد نیاز است. اکسیژن در مراحل ذوب-پالایشگاه برای اکسید سولفیدهای مس استفاده می شود. [۱۰].

۴- تکنولوژی سیستم خورشیدی

فتوولتائیک یا به اختصار PV، فناوری تبدیل انرژی نور به الکتریسیته از راه استفاده از نیم رساناهایی است که ویژگی اثر فتوولتائیک



تنها یک جبران مصرف انرژی را در طول روز انجام می دهد. با این وجود، ذخیره انرژی می تواند مصرف منابع شبکه را تا زمان تأمین نیروی کل PV از طریق PV کاهش دهد. مزیت ان این است که حوضچه های الکترولیز دارای مساحت بسیار زیادی هستند و سقف های موجود برای نصب نیروگاه PV وجود دارد، بنابراین تنها فاصله کوتاهی برای توزیع نیرو وجود دارد و باعث کاهش خسارات میشود. بسته به کارایی ماژول PV و منابع خورشیدی موجود در کارخانه ER، محاسبات اساسی نشان می دهد که حدود ۵۰٪ از نیروی لازم را می توان در بالا جای داد. همچنین، اگر پانل های PV ترکیبی به عنوان منبع گرمایش لازم برای گرمایش در نظر گرفته شوند، می توان الکترولیت را نیز تامین کرد.



شکل ۲. یک سیستم پالایش الکتریکی مسی با جابجایی

انرژی PV (الف) با تکنولوژی مبدل معمولی و (ب) با پیکربندی

مستقیم مبدل قدرت DC-DC پیشنهاد شده.

برای استفاده از توان PV خورشیدی، وایچمن و همکاران [۱۲] پیشنهاد کردند که فاصله بین الکترودهای فرایند الکتروکودینگ را افزایش دهند. با افزایش فاصله بین الکترودها، چگالی جریان در هر الکترود و مقاومت مربوط به آن افزایش می یابد، که گرمای مورد نیاز را برای الکترولیت تأمین می کند. این مطالعه نشان داد که تاسیسات ۲۴۰,۰۰۰ تن کاتد مس در سال می تواند با استفاده از PV خورشیدی و افزایش فاصله بین الکترودها در فرایند ولتاژ الکتریکی، ۳۵ میلیون دلار صرفه جویی کند. علاوه بر این، کاهش ۳۷,۵ درصدی در انتشار CO₂ پیش بینی می شود. همین نویسنده پیشنهاد کرد که جریان الکتریکی را در فرایندهای ولتاژ الکتریکی افزایش دهد تا استفاده از فناوری PV خورشیدی در ساعات نور خورشید افزایش یابد. برای انجام این کار، آنها استفاده از میله های منبع جریان سه گانه بین سلولی را برای غلبه بر مخاطبین معیوب، افزایش مقاومت در برابر اتصال کوتاه و عملکرد با ۵۰ درصد پراکندگی کمتر در ساعات نور خورشید پیشنهاد کردند [۱۳].

۵,۱,۲ کاربرد های PV در خرد و اسباب کردن

راه حل مستقیم برای دستیابی به صنعت معدن پایدارتر است. این مطمئناً با فناوری PV موجود در چارچوب یک گزینه مناسب است. با این حال، فرصت هایی برای بیرون از چارچوب وجود دارد و از روش هایی استفاده می شود که از طریق آنها می توان انرژی PV را به طور کارآمدتر و مقرون به صرفه تر در فرایندهای مختلف ادغام کرد. این بخش سه نمونه از چنین برنامه هایی را ارائه می دهد.

۵,۱,۱ پالایشگاه های الکتریکی PV

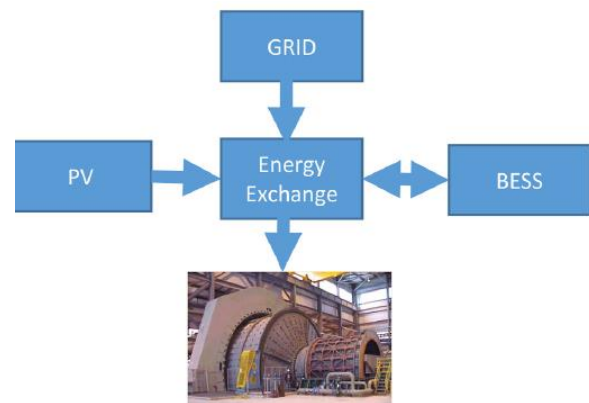
در بین فرایندهای تولید مس، پالایش الکتریکی و برنده شدن الکترو، هر دو بر اساس الکترولیز، یکی از پر انرژی ترین مراحل تولید مس هستند و بنابراین به میزان زیادی در رد پای کربن صنعت معدن مس کمک می کند. این امر در مورد سایر فرایندهای تولید مبتنی بر الکترولیز فلز نیز صادق است. الکترولیز، مستقل از نوع فلز مورد نظر، مستلزم جریانهای پیوسته زیاد (DC) است که در ولتاژهای پایین کار می کنند. معمولاً، این ولتاژها و جریانها با استفاده از ترانسفورماتورهای گام به گام بزرگ و به دنبال یکسو کننده های قدرت بالا ایجاد می شوند، که جریان متناوب را به جریان پیوسته کنترل شده تبدیل می کند که از طریق آنها در استخرهای الکترولیز بسیار بزرگ به کاتدها جریان می یابد.

امروزه تزریق انرژی PV به یک کارخانه تصفیه الکتریکی موجود مستلزم افزایش ولتاژ خروجی رشته های PV و سپس تبدیل از DC به AC از طریق یک اینورتر مرکزی است که توسط ترانسفورماتورها به نقطه اتصال مشترک (PCC) متصل شده است. سپس، برای تغذیه فرایند صنعتی DC، تغییر و تبدیل AC-DC دیگری مورد نیاز است، همانطور که در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است. با این حال، از آنجا که هر دو نیروگاه PV و الکترولیز به طور ذاتی با جریان DC در ولتاژهای پایین کار می کنند، تغذیه مستقیم انرژی PV به نیروگاه تجدیدپذیر (ER) از طریق یک مرحله تبدیل DC-DC کارآمدتر می شود و تعداد مبدل و مراحل ترانسفورماتور، همانطور که در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است.

فناوری مبدل DC-DC مورد نیاز برای این رویکرد در حال حاضر در بازارها موجود نیست اما توسعه یافته و به صورت آزمایشی معتبر شده است [۱۱]. برای مقاوم سازی نیروگاه های ER موجود، یعنی اتصال شبکه موجود با استفاده از ترانسفورماتور پایین و مبدل AC-DC برای تغذیه بقایای کارخانه ER، در نظر گرفته شده است. از این رو، سیستم PV

خرد کردن (مراحل خرد کردن و آسیاب کردن) سهم مهمی از کل مصرف انرژی در یک کارخانه فرآوری مواد معدنی را نشان می دهد. به عنوان مثال، در شیلی، ذرات معلق به طور متوسط مسئول تقریباً ۵۰ درصد از مصرف انرژی الکتریکی فرایند استخراج است و بزرگترین تولید کننده گلخانه در تولید کنسانتره مس است [۱۴].

مصرف انرژی در عملیات اختلاط تحت تأثیر سختی سنگ معدن قرار می گیرد که این امر تنوع را در مصرف ایجاد می کند [۱۵]. بنابراین، چالش طراحی و پیاده سازی جایگزین های خورشیدی است که هم با تنوع مصرف انرژی روبرو شود و هم با یک فرآیند شدید در مصرف انرژی روبرو شود. اگرچه از نظر تئوری، امکان طراحی یک کارخانه خرد کردن وجود دارد که فقط بر اساس انرژی خورشیدی کار کند، اما یک جایگزین هیبریدی جالبی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۶]. که انرژی شبکه را با یک نیروگاه فتوولتائیک و یک BESS ترکیب می کند. مفهوم معمولی در شکل ۳ نشان داده شده است. استفاده از PV خورشیدی برای تأمین یا تا حدی فرایندهای اختلاط نیرو ممکن است بتواند تنوع مصرف انرژی مرتبط با تغییرپذیری در ویژگی های مواد معدنی را محاسبه کند. مهمتر از همه سختی سنگ است که تأثیر مستقیمی بر مصرف انرژی در خرد شدن دارد. سیستم قدرت نشان داده شده در شکل ۳ اجازه می دهد تا مصرف را از شبکه پایین بیاورید و صاف کنید (تراشیدن پیک)، در حالی که کسری از کل انرژی



مصرف شده توسط این فرایند PV خورشیدی است. نفوذ PV خورشیدی را می توان افزایش داد در صورتی که فرآیندهای آماده سازی اصلاح شود تا امکان مدیریت تقاضا (DSM) فراهم شود، بسته به در دسترس بودن انرژی در (PV + BESS) می توان با داشتن بیش از یک ذخیره سنگ معدن برای تصمیم گیری در مورد تغذیه مواد معدنی سخت یا نرم به کارخانه خرد کردن، انجام داد [۱۷].

شکل ۳: ادغام فتوولتائیک خورشیدی و ذخیره سازی باتری (PV-BESS)

(BESS) برای تأمین آسیاب SAG

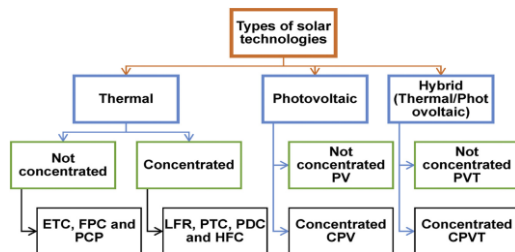
۶- توجه جهان به انرژی خورشیدی

با توجه به افزایش مصرف انرژی جهان و محدودیت در دسترس بودن سوخت های فسیلی، منابع تجدیدپذیر انرژی، به ویژه خورشید به دلیل دوام، حضور در همه جا و منبع پاک توجه ها را به خود جلب می کند. با استفاده از مواد مختلف می توان از انرژی خورشید استفاده کرد. مانند فناوری نانو، علم نقش اساسی در انرژی خورشیدی ایفا می کند و در تبدیل کارآمدتر انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی کمک می کند. در این نسل، سیستم خورشیدی فتوولتائیک کارآمدترین و بزرگترین منبع برق است. نانومواد مانند نقاط کوانتومی، نانوذرات و نانوساختارها امیدوار کننده ترین کاندیدا محسوب می شوند و به طور مداوم برای بهبود جذب نور برای سلول های خورشیدی نسل بعدی شناسایی می شوند. نقاط کوانتومی سلول های خورشیدی با کارایی بالا را تشکیل می دهند و مطالعات نظری اعلام می کنند که می توانند تا ۶۰ درصد بازدهی داشته باشند. علاوه بر این، هنگامی که نانولوله ها با مواد پلیمری پر می شوند، یک لایه جاذب خوب ایجاد می کند و یک سلول خورشیدی کم هزینه با ویژگی های جدید مانند انعطاف پذیری و سبک وزن تولید می کند. با این حال، آزمایشات مربوط به سنتز و ساخت دستگاه های فتوولتائیک نقطه کوانتومی هنوز در مراحل ابتدایی است. مخلوط نقاط Q و پلیمرها نیز برای به دست آوردن نسل چهارم سلول های خورشیدی هترجکشن فله نسل چهارم مورد بهره برداری قرار می گیرند، اگرچه هنوز نمی توانند به ۱۰ درصد بازده سلول برسند. این فصل با هدف بررسی مواد مختلف مختلف برای استفاده از طیف خورشیدی و پیشرفت های انجام شده تا به امروز با آینده مورد انتظار این فناوری انجام شده است. [۱۸]

در کشورهای در حال توسعه، صنایع و بخشهای تولیدی بخش عمده ای از کل مصرف انرژی را مصرف می کنند، جایی که بیشتر انرژی برای تولید حرارت پایین، متوسط یا زیاد برای استفاده در فرآیندهای مورد استفاده به عنوان حرارت فرآیند استفاده می شود. ضرورت تجاری سازی منابع تجدیدپذیر پاک، ارزان و کارآمد در کاربردهای صنعتی از افزایش نگرانی ها در مورد انتشار گازهای گلخانه ای و گرم شدن زمین و کاهش مصرف سوخت های فسیلی در بخش های تجاری ناشی می شود. به عنوان منبع فراوان انرژی، فن آوری های انرژی خورشیدی پتانسیل خود را اثبات کرده اند. تحقیقات اخیر نشان می دهد در حال حاضر تنها تعداد کمی از صنایع از انرژی خورشیدی در فرآیندهای صنعتی برای تولید گرمای فرایند و جایگزینی سوخت های فسیلی استفاده می کنند. تولید انرژی حرارتی خورشیدی در حال حاضر بسیار مشهور است و در سالهای اخیر رواج یافته است در حالی که سایر کاربردهای احتمالی گرمای متمرکز ناشی از تابش خورشید کمی مورد بررسی قرار گرفته



برق، و همچنین در مناطق با زمین در دسترس، از خورشیدی نیروگاهها فضاهای وسیعی را اشغال کرده اند. علاوه بر این، حرارتی نیروگاه های خورشیدی برای سیستم تولید بخار، آینه های شستشو، آب سرویس و سرمایه‌ش (در صورت انتخاب خنک کننده مرطوب، به جای خنک کننده خشک) به آب زیادی نیاز دارند. به منظور دستیابی به کارایی مطلوب، نیروگاه های خورشیدی باید در مناطقی با حداکثر تابش خورشیدی نصب شوند. با این حال، این مناطق بیشتر در مناطق خشک واقع شده اند. [۲۱]



۹- فناوریهای تولید برق حرارتی خورشیدی

برق حرارتی خورشیدی متکی به اصل دوم استرمودینامیک برای تغییر تابش عادی مستقیم (DNI)، به برق. این تحول به دو منبع نیاز دارد: منبع گرم و منبع سرد. در قدرت CSP گیاهان، منبع گرم عموماً گرما نامیده می شود انتقال مایع (HTF)، در حالی که آب به عنوان منبع سرد استفاده می شود. این فرآیند تبادل حرارت خود به خودی بین آب و HTF آنتروپی را افزایش می دهد و از این رو کارهای مفیدی تولید می کند [۲۲].

فرآیند برنده برای تولید مس با خلوص بالا نیاز به آب و برق دارد. یک دستگاه متمرکز کننده ترکیبی خورشیدی، اشعه را بر روی اجسام سلول های کارآمد خورشیدی (CPV) متمرکز کرده و سپس آب پمپاژ می شود تا گرمای حاصل از تابش خورشید را استخراج کرده و در مخزن ذخیره انرژی حرارتی قرار دهد. و در این فرآیند الکترولیت مس حاصل از فرآیند الکتروکینگ تولید می شود. آب/الکتروکینگ تبدیل حرارتی (HEX) برای گرم کردن الکترولیت استفاده می شود. مازاد انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری های ذخیره کننده مستقیم (DS)، ذخیره می شود. این نتایج نشان می دهد که نیروگاه خورشیدی به لطف ذخیره باتری و حرارتی باقی مانده است. انرژی خورشیدی با ذخیره سازی مبتنی بر گرانش و قدرت هیدرولیک پمپاژ آب است. [۲۳]

یکی از جنبه های جالب پمپاژ خورشیدی این است که به گونه ای طراحی شده که با در دسترس بودن خورشید سازگار است. انرژی خورشیدی در طول روز شدیدتر می شود به طوری که هیچ ذخیره الکتریکی وجود ندارد. در پروژه ای به نام Espejo در شیلی، ترکیبی از PV خورشیدی و پمپاژ آب استفاده شد که شامل دو واحد برق آبی ۳۰۰ مگاواتی و واحد انرژی خورشیدی ۶۰۰ مگاواتی بود استفاده گردید. [۲۴]

است. این مقاله مروری اجمالی از جنبه های فعلی بالقوه و آینده مشارکت سیستم های گرمایش فرآیند صنعتی خورشیدی در کاربردهای صنعتی را ارائه می دهد. به منظور همگام شدن با این بخش در حال ظهور و رشد سریع برای کاربردهای انرژی های تجدیدپذیر، لازم است اطلاعات عمیقی در مورد پتانسیل کلی فرایندهای صنعتی در بخش صنعتی فردی که در آن گرمای فرآیند خورشیدی در حال حاضر استفاده می شود و شناسایی فرایندهای صنعتی بیشتر لازم است. بسته به سطح دما و نوع جمع کننده خورشیدی مورد استفاده، برای ادغام منظومه شمسی سازگار است. علاوه بر این، بخشهای امیدوار کننده برای استفاده از گرمای خورشیدی با استفاده از فرایندهای صنعتی برای ادغام گرمای خورشیدی باید مشخص شوند، به طوری که کشورهایی با پتانسیل عظیم انرژی خورشیدی می توانند در آینده از این فناوریها برای کاهش مصرف سوخت فسیلی و توسعه سیستمهای صنعتی پایدار استفاده کنند. [۱۹]

۷- کاربرد انرژی خورشیدی برای معادن از جمله مس

صنعت فرآوری مواد معدنی مس با سناریوهای پیچیده ای همراه است با افزایش تقاضا، قیمت بسیار متغیر انرژی، کاهش عیار سنگ معدن که مصرف انرژی را افزایش می دهد و افزایش نگرانی در مورد ردپای کربن این صنعت. برای کاهش ریسک ناشی از این سناریوها، صنعت به دنبال استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است. با توجه به اینکه مهمترین معادن مس در شیلی در مناطقی با سطح تابش بالا قرار دارند، انرژی خورشیدی این پتانسیل را دارد که یک منبع جذاب و پایدار انرژی باشد. این مقاله مروری بر فناوری های خورشیدی فعلی و نحوه استفاده از آنها برای مقابله با برخی از چالش های صنعت معدن مس امروزه ارائه می دهد

در واقع، از فن آوری های فتوولتائیک خورشیدی می توان برای تولید برق برای ماشین های خرد کننده، پالایشگاه های الکتریکی و پمپاژ آب استفاده کرد در حالی که فناوری های حرارتی خورشیدی برای تولید برق، تولید گرما، شستشوی حرارتی و خشک شدن کنسانتره مس مفید هستند. این بررسی همچنین، از منظر وسیع تری، پتانسیل این فناوری ها را در عملکرد و طراحی فرایندهای جدید معدنی مس خورشیدی تجزیه و تحلیل می کند. نتیجه گیری می شود که چندین گزینه امکان پذیر برای ادغام انرژی خورشیدی در فرایندهای استخراج مس وجود دارد. [۲۰]

۸- فناوری های تولید برق خورشیدی

این قسمت به شرح سه مورد اصلی اختصاص دارد فن آوری های خورشیدی برای تولید برق نشان داده شده در علاوه بر این، نقشه های GIS برای تسهیل در شناسایی استفاده می شود

ظرفیت نصب شده هر فناوری خورشیدی نصب شده نیروگاهها عمدتاً در مناطق جغرافیایی با a واقع شده اند شبکه برقی پیچیده ای که می تواند تولید شده را پشتیبانی کند

7] Cochilco, 2017. Water Consumption in the Copper Mining Industry, 2017. technical report. Available at: <https://www.cochilco.cl/Research/Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%20al02017-INGLES.pdf>

[۸] فدایی، احمد، نوراللهی، یونس، راضی آستارایی، فاطمه، ۱۴۰۰. "مروری بر کاربرد انرژی های تجدید پذیر در سیستم های نمک زدایی از آب دریا". مجله اکوهیدرولوژی، دوره ۸، شماره ۱، صفحه ۲۴۹-۲۸۲.

[9] Hiskey, B., 2000. Metallurgy, Survey. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.

[10] Marsden, J.O., Wilmot, J.C. and Smith, R.J., 2007. Medium-temperature pressure leaching of copper concentrates—Part IV: Application at Morenci, Arizona. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 24(4), pp.226-236.

[11] Collura, S., Guilbert, D., Vitale, G., Luna, M., Alonge, F., D'Ippolito, F., Scipioni, A., 2019. Design and experimental validation of a high voltage ratio DC/DC converter for proton exchange membrane electrolyzer applications. *Int. J. Hydrogen Energy* 44 (14), 7059–7072. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.210>.

[12] Wiechmann, E.P., Henriquez, J., Aqueveque, P., Daz, J., Morales, A., Manríquez, C., 2018. Taking advantage of PV energy in copper electrowinning requires a trend reversal: increasing inter-electrodes spacing. 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). IEEE, pp. 748–752. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2018.8566978>.

[13] Wiechmann, E.P., Díaz, J.E., Morales, A.S., Aqueveque, P.E., 2020. Advanced technology to increase the use of photovoltaic energy in copper electrowinning. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 56, 2117–2121. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2966984>.

[14] Norgate, T., Haque, N., 2010. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *J. Clean. Prod.* 18, 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>.

[15] Pamparana, G., Kracht, W., Haas, J., Ortiz, J.M., Nowak, W., Palma-Behnke, R., 2019a. Studying the integration of solar energy into the operation of a semi-autogenous grinding mill. Part I: framework, model development and effect of solar irradiance forecasting. *Miner. Eng.* 137, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.03.017>.

[16] Pamparana, G., Kracht, W., Haas, J., Ortiz, J.M., Nowak, W., Palma-Behnke, R., 2019b. Studying the integration of solar energy into the operation of a semi-autogenous grinding mill. Part II: effect of ore hardness variability, geometallurgical modeling and demand side management. *Miner. Eng.* 137, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.03.017>.

[17] Wareesri, W., Po-Ngam, S., 2016. A three-phase PV-pump inverter with maximum power point tracking

انرژی خورشیدی، آب را به مخزنی پمپ می کرد که در زمینی به مساحت ۳۷۵ هکتار بود و ظرفیت ذخیره انرژی ۸۳ گیگاوات ساعت داشت. این پروژه و طراحی بسیار جذاب بود زیرا اکثر معادن واقع در منطقه آتاکاما شیلی فاقد بارندگی هستند. در واقع در صحرای آتاکاما انرژی خورشیدی با ذخیره سازی مبتنی بر گرانش و قدرت هیدرولیک تامین می شد زیرا که اختلاف ارتفاع زیاد با سطح دریا در حدود ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متر سبب تولید برق و انرژی می شد. در کنار این روش می توان از جایگزین های دیگر استفاده کرد. در صنعت معدن می توان با بهبود مدیریت باطله و افزایش بازیابی آب ۹۰٪ آب موجود در سد باطله را بازیابی کرد. می توان از PV و CSP برای نمک زدایی آب دریا قبل از استفاده در فرآیند استحصال مس استفاده کرد و همچنین با PV تولید برق را افزایش داده و مصرف آب را کاهش داد. استفاده از این روش ها نتایج بسیار مطلوبی در کاهش دی اکسید کربن و واردات سوخت های فسیلی دارد. [۲۳]

۹- فرصت ها و چشم اندازها

ادغام انرژی خورشیدی سبب در فرآیند های معدنی سبب کاهش رد پای کربن در فرآیند های معدنی می شود. همچنین استفاده از انرژی های خورشیدی سبب کاهش انتشار گازهای گلخانه ای می شود. علاوه بر موارد مذکور این گازها جایگزین بسیار خوبی برای سوخت های وسیلی خواهند بود و می توانند جایگزین آن شوند. و از دیگر مزایای مهم این نوع انرژی می توان به تجدیدپذیری و قابلیت بازیابی آن اشاره کرد. [۲۴]

مراجع

[۱] مهدی زاده، سهیلا، اکبری، محمد، نظری، لیلیا، صدری، ملک ارسلان، ۱۳۹۴. "مطالعات محک زنی بین المللی تکنولوژی تولید با محوریت شاخصهای انرژی در صنعت مس کشور". پنجمین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در صنعت انرژی.

[۲] آزاد، علی، فرجیکلاریجانی، حمیدرضا، روحی جویباری، عادل، زمانی احمد محمودی، محمد، ۱۳۹۵. "پیش بینی قیمت و میزان تولید فلز مس در سال ۲۰۳۰ میلادی و کاربرد آن برای تعیین محدوده نهایی معادن ایران". دومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین علوم و تکنولوژی.

[3] Schlesinger, M.E., Sole, K.C. and Davenport, W.G., 2011. *Extractive metallurgy of copper*. Elsevier.

[4] Vickers, N.J., 2017. Animal communication: when i'm calling you, will you answer too?. *Current biology*, 27(14), pp.R713-R715.

[5] Cochilco, 2020. www.cochilco.cl.

[6] Behar, O., Peña, R., Kouro, S., Kracht, W., Fuentealba, E., Moran, L. and Sbarbaro, D., 2021. The use of solar energy in the copper mining processes: A comprehensive review. *Cleaner Engineering and Technology*, p.100259.



- [22] Zhar R, Allouhi A, Ghodbane M, Jamil A, Lahrech K.2021, Parametric analysis and multi-objective optimization of acombined organic rankine cycle and vapor compressioncycle. Sustain. Energy Technol. Assessments Oct.
- [23] O.Behar et al , 2021 , The use of solar energy in the copper mining processes
- [24] MUFGBank , 2019 , The green climate fund (GCF) is seeking high-quality funding proposal
- [25] لعبت تقوی و مجید عباسپور ، ۱۳۹۲ ، جایگاه انرژی تجدید پذیر جهت نیل به توسعه پایدار (MPPT) controller. 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information [18]SanjayKumar¹VikasAnand²UzmaJabeen³DineshPanthak⁴,2021. Chapter 17 - Solar power energy derived from nanotools and devices
- [19]Shahjadi HisanFarjana^aNazmulHuda^aM.A. ParvezMahmud^aR.Saidur^{bc}.2018. Solar process heat in industrial systems – A global review
- [20].BeharR.PeñaS.KouroW.KrachtE.FuentealbaL.MoranD.Sbarbaro, 2021, The use of solar energy in the copper mining processes: A comprehensive review
- [21] <https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview>.

ACEC2021-22037

بررسی آزمایشگاهی عملکرد آب شیرین کن شیبدار خورشیدی بهبود یافته

حسین امیری^۱

^۱ استادیار، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، h.amiri@kgut.ac.ir

چکیده

به‌عنوان یک بحران مطرح می‌شود. بحران آب در بسیاری از کشورهای جهان از جمله کشورهای واقع در کمربند خشک زمین مثل ایران، روزبه‌روز ابعاد پیچیده‌تری به خود می‌گیرد. شیرین‌سازی آب‌های شور موجود در دریاها و دریاچه‌ها، دیگر منابع آب‌شور به‌عنوان یک راهکار مناسب به‌منظور تأمین آب مصرفی مطرح و مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های مختلفی برای شیرین‌سازی آب وجود دارد که همه این روش‌ها به انرژی نیاز دارند. با توجه به محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی به‌عنوان منبعی رو به اتمام، تخمین زده می‌شود که در آینده‌ای نزدیک بشر با بحران انرژی روبرو شود. علاوه بر این استفاده از سوخت‌های فسیلی و دیگر فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی باعث شده است که محیط‌زیست به‌شدت آلوده شود و در حال حاضر آلودگی محیط‌زیست نیز به‌عنوان یک بحران برای بشر مطرح است.

در حال حاضر اکثر آب‌شیرین‌کن‌های موجود در جهان با استفاده از انرژی‌های فسیلی کار می‌کنند که این امر منجر تولید گازهای گلخانه‌ای و مشکلات زیست‌محیطی می‌شود. استفاده از انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان منبع انرژی مورد نیاز شیرین‌سازی آب باعث خواهد شد بحث مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و مشکل کاهش ذخایر این سوخت‌ها را به‌طور هم‌زمان مرتفع نماید. با توجه به پتانسیل بسیار خوب انرژی تابشی خورشید و وجود آب‌شور فراوان موجود در دریای خزر در شمال و دریای عمان و خلیج فارس در جنوب و دیگر دریاچه‌های داخلی و منابع محلی آب‌شور، چشم‌انداز بسیار مطلوبی را برای تأمین آب شیرین با استفاده از فن‌آوری‌های آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی فراهم نموده است. با توجه به این نکته، در این تحقیق یک دستگاه آب شیرین شیب‌دار خورشیدی جدید و بهبود یافته ارائه و مورد بررسی قرار می‌گیرد که می‌تواند کارایی بهتری نسبت به آب‌شیرین‌کن‌های شیب‌دار خورشیدی استاندارد داشته باشد.

آب‌شیرین‌کن‌ها حوضچه‌ای خورشیدی از قدیمی‌ترین روش‌های شیرین‌سازی آب‌شور با استفاده از انرژی خورشیدی می‌باشند. از

در این تحقیق یک دستگاه آب‌شیرین‌کن جدید، به نام آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبود یافته، برای شیرین‌سازی آب‌های شور با استفاده از انرژی خورشیدی ارائه شده است. این آب‌شیرین‌کن از اضافه کردن یک کندانسور خارجی به‌صورت یکپارچه به یک آب‌شیرین‌کن شیب‌دار استاندارد به وجود آمده است. فضای کندانسور از طریق دو فاصله هوایی در پایین و بالای صفحه جاذب به قسمت روی آب‌شیرین‌کن مرتبط است. گردش هوا بین دو قسمت به‌صورت طبیعی (جریان آزاد) صورت می‌گیرد. به‌منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد آب‌شیرین‌کن جدید، یک آب‌شیرین‌کن استاندارد نیز با همان مشخصات و ابعاد ساخته شد. آب‌شیرین‌کن‌های ساخته شده در روزهای مختلف ماه ۱۰ و ۱۱ مهرماه (۱ و ۲ اکتبر) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان داد که آب‌شیرین‌کن بهبود یافته عملکرد بهتری نسبت به آب‌شیرین‌کن استاندارد داشته است به‌طوری‌که آب شیرین تولیدی توسط آب‌شیرین‌کن بهبود یافته در این دو روز ۱۱۰ و ۷۶ بیشتر از آب شیرین‌کن شیب‌دار استاندارد بوده است.

واژه‌های کلیدی: آب شیرین‌کن خورشیدی بهبود یافته، بررسی آزمایشگاهی، انرژی خورشیدی، طراحی جدید

مقدمه

آب و منابع آبی همواره نقش تعیین‌کننده‌ای بر زندگی بشر داشته است به‌طوری‌که شهرها و روستاها خصوصاً در گذشته در نزدیکی منابع آبی سطحی و یا زیرزمینی به وجود آمده‌اند. رشد صنعتی سریع و رشد جمعیت باعث شده است که تقاضا برای آب سال‌به‌سال افزایش یابد. علاوه بر این مشکل آلودگی منابع سطحی آب مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها به‌واسطه‌ی زباله‌های صنعتی و فاضلاب‌های شهری از دیگر مشکلات حال حاضر جوامع بشری می‌باشد. در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و بالا رفتن سطح استانداردهای زندگی، استفاده از منابع آبی به حدی افزایش یافته که کمبود آن



نهایتاً عملکرد دو دستگاه آب شیرین کن در شرایط آب و هوایی واقعی مورد مطالعه قرار گرفته و میزان آب تولیدی آب شیرین کن جدید با آب شیرین کن استاندارد مقایسه شده است.

طراحی و ساخت

در آب شیرین کن های شیبدار (پله ای) استاندارد، پشت صفحه جاذب عایق بوده و بر روی صفحه جاذب با یک فاصله هوایی (در این متن این فاصله هوایی ناحیه تبخیر نامیده می شود) یک پوشش شفاف که عمدتاً از جنس شیشه می باشد قرار می گیرد. نقش این پوشش شفاف این است که اولاً اجازه عبور پرتوهای تابشی خورشید را بدهد، دوماً از خروج بخار آب و خروج (اتلاف) انرژی به صورت جابجایی و تابشی از صفحه جاذب جلوگیری کند و سوم با توجه اینکه سطح بیرونی این پوشش در معرض هوای محیط (که اکثراً دمای پایین تری نسبت به هوای فضای بالای صفحه جاذب دارد) قرار دارد با ایجاد نقطه شبنم برای هوای مرطوب داخل دستگاه (ناحیه تبخیر) در سمت داخلی پوشش شفاف، باعث تقطیر آب به شود. همان طور که مشخص است شیشه وظایف متضادی را دارد از یک طرف باید برای تقطیر آب با محیط انتقال حرارت داشته باشد (نقش کندانسور) و از طرف دیگر باید از تلفات حرارت از صفحه جاذب جلوگیری کند. علاوه بر این به دلیل اینکه پوشش شفاف قسمتی از انرژی پرتوهای خورشیدی عبوری را جذب می کند دمای بالاتری نسبت به محیط دارد که باعث می شود کارایی آن در فرآیند تقطیر کاهش یابد. با توجه به این مشکلات ایده اضافه کردن یک کندانسور جداگانه به آب شیرین کن های حوضچه ای مطرح شده است. با توجه به اینکه قسمت زیرین دستگاه آب شیرین کن شیبدار در معرض هوا بوده و دوماً در معرض تابش خورشید قرار ندارد دمای سطح آن نسبت به شیشه پایین تر و نزدیک تر به دمای محیط می باشد بنابراین در این تحقیق ایجاد یک فاصله هوایی برای گردش هوا در قسمت زیرین دستگاه که از بالا و پایین به ناحیه تبخیر در ارتباط است مورد بررسی قرار می گیرد. این ناحیه به عنوان ناحیه یا فضای کندانسور نامگذاری شده است. در این آب شیرین کن منطقه تبخیر و تقطیر از هم جدا شده و هوای اشباع شده در بالای حوضچه به وسیله گردش طبیعی بین منطقه تبخیر و فضای کندانسور که در قسمت زیرین آب شیرین کن تعبیه شده گردش می نماید.

در این تحقیق طول و عرض صفحه جاذب دستگاه به ترتیب برابر ۰/۵ متر و یک متر انتخاب شد. ابتدا آب شیرین کن در نرم افزار سالیدورک طراحی و سپس این طرح پیاده سازی و آب شیرین کن ساخته شد. ابعاد بیرونی دستگاه ساخته شده برابر ۵۴ cm × ۱۴۲cm می باشد که مساحت کل آن ۷۶۶۸ cm² و یا ۰/۷۶۶۸ m² می باشد. عمق دستگاه های آب شیرین کن که شامل کندانسور، صفحه جاذب و قسمت تبخیر می شود برابر ۴۴ سانتی متر می باشد. در شکل ۱، نمای آب شیرین کن جدید در نرم افزار سالیدورک و اجزاء آن نشان داده شده است. آب شیرین کن های شیب دار استاندارد و

مزایای این آب شیرین کن ها می توان به ساخت آسان و ارزان، هزینه نگهداری پایین، کیفیت بالای آب تولیدی اشاره نمود [۱].

آب شیرین کن های حوضچه ای خورشیدی استاندارد مشکلاتی دارند که باعث شده است نرخ آب شیرین تولید شده در آنها نسبتاً کم باشد. به منظور رفع مشکل افقی بودن صفحه جاذب آب شیرین کن های حوضچه ای استاندارد، آب شیرین کن های حوضچه ای شیبدار (پله دار) ^۱ ارایه شده اند. در این آب شیرین کن ها، کف حوضچه به صورت پله کانی شیبدار ساخته می شود. هر چند آب شیرین کن های شیبدار کارایی بهتری نسبت به آب شیرین کن های حوضچه ای دارند، با این وجود به منظور افزایش های هر چه بیشتر میزان آب شیرین تولیدی آنها و بهبود عملکرد آنها مطالعات فراوانی انجام شده است. [۲-۴]. اخیراً، تکنیک ها و روش های به کار گرفته شده توسط محققین مختلف جهت افزایش کارایی آب شیرین کن های شیبدار توسط کابیل و همکاران [۵] مرور و دسته بندی شده است.

یکی از مشکلات آب شیرین کن های خورشیدی حوضچه ای (شیبدار) و یا استاندارد) منسجم بودن فرآیند دریافت انرژی تابشی، تبخیر و تقطیر در یک محفظه می باشد که باعث می شود کارایی این دستگاه ها کاهش یابد. جداسازی فرآیند تبخیر و میعان برای آب شیرین کن های حوضچه ای استاندارد توسط محققین مختلفی بررسی شده است. یک ایده برای جداسازی مرحله تبخیر و میعان در آب شیرین کن های حوضچه ای استفاده از کندانسور خارجی می باشد. در این زمینه مطالعات زیادی انجام شده است که در ادامه به چند مورد آن اشاره می شود. مادلوپا و جوهانسون [۶] آب شیرین کن خورشیدی غیرفعال و با کندانسور مجزا را ارائه و مورد بررسی قرار دادند. الهمدانی و شوکلا [۷] ایده استفاده از یک آب شیرین کن حوضچه ای چند مرحله ای را به عنوان کندانسور یک آب شیرین کن حوضچه ای بزرگ، مورد بررسی قرار دادند. بهار دوج و همکاران [۸] اثر استفاده از یک کندانسور مجزا (خارجی) با سطح فین مانند را مورد مطالعه قرار دادند. فتح و همکاران [۹] به صورت عددی کارایی حرارتی گذرای یک آب شیرین کن حوضچه ای رطوبت زنی - رطوبت زدایی به همراه یک کندانسور غیرفعال را مورد مطالعه قرار دادند.

هر چند مطالعات زیادی در مورد آب شیرین کن های حوضچه ای خورشیدی انجام شده است ولی تاکنون استفاده از کندانسور که به صورت یکپارچه در آب شیرین کن های حوضچه ای شیبدار (پله ای) قرار گرفته شده باشد، مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق، یک آب شیرین کن شیبدار جدید و بهبود یافته طراحی و ساخته شده است. در این آب شیرین کن منطقه تبخیر و تقطیر از هم جدا شده و هوای اشباع شده در بالای حوضچه به وسیله گردش طبیعی بین منطقه تبخیر و فضای کندانسور که در قسمت زیرین آب شیرین کن تعبیه شده گردش می نماید. علاوه بر این به منظور ارزیابی عملکرد دستگاه و نشان داده عملکرد بهتر آب شیرین کن جدید، یک دستگاه آب شیرین کن حوضچه ای استاندارد با ابعاد یکسان ساخته شده است.



جابجایی با محیط انتقال حرارت انجام می‌دهند انتقال حرارت از طریق شیشه و کندانسور باعث ایجاد پدیده شبنم بر روی شیشه و کندانسور شده و بخار آب تقطیر می‌شود. آب تقطیر شده همان آب شیرین بوده که جمع‌آوری و از آب شیرین کن خارج می‌شود.

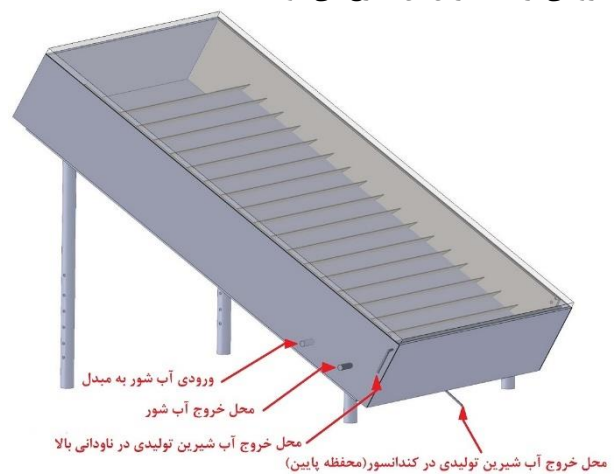
برای ساخت صفحه جاذب و ناودانی‌ها از ورق آهن سیاه با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است و ناودانی‌ها با استفاده از جوش کاربرد به صفحه جاذب جوش داده شده است بعداً، صفحه جاذب بارنگ سیاه روغنی پوشش داده شده است. برای دریافت بیشترین انرژی تابشی خورشید، صفحه جاذب باید به صورت شیب‌دار نصب شود. برای شهر کرمان با عرض جغرافیایی ۳۰/۲۹ بهترین زاویه شیب برای دریافت انرژی تابشی ۳۰ درجه می‌باشد. بنابراین صفحه جاذب باید با شیب ۳۰ درجه نسبت به جنوب نصب شود. ناودانی‌ها به صورت مثلثی (مخروطی) و با شیب داخلی ۶۰ درجه و شیب خارجی ۱۲۰ درجه به صفحه جاذب وصل شده‌اند. برای هر دو آب شیرین کن عرض تیغه‌های ناودانی ۷ سانتیمتر و فاصله تیغه‌ها از هم ۶ سانتیمتر می‌باشد. شیب، فاصله و ابعاد تیغه‌ها باید به نحوی انتخاب شود که تا حد امکان کل سطح جاذب در تماس با آب باشد.



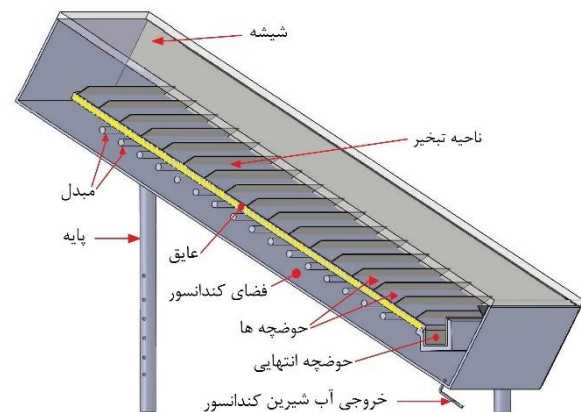
شکل ۲- عکس دستگاه آب شیرین کن شیب دار جدید (سمت چپ) و آب شیرین کن استاندارد در حین آزمایش

در آب شیرین کن استاندارد صفحه جاذب تمام کف دستگاه را می‌پوشاند در حالی که در آب شیرین کن بهبود یافته، دو کانال ارتباطی در بالا و پایین دستگاه قرار گرفته است که باعث گردش هوا بین قسمت کندانسور و فضای بالای صفحه جاذب می‌شود. بنابراین هر چند ابعاد بیرونی دو دستگاه ساخته شده کاملاً یکسان می‌باشد ولی ابعاد صفحه جاذب آن‌ها متفاوت می‌باشد. با توجه به این نکته تعداد حوضچه‌ها در آب شیرین کن شیب‌دار استاندارد برابر ۱۶ و در آب شیرین کن بهبود یافته ۱۴ عدد می‌باشد. لازم به ذکر است به منظور یکسان بودن ابعاد دو دستگاه، یک فاصله هوایی در قسمت

بهبود یافته که در این تحقیق ساخته شده اند در شکل ۲ نشان داده شده اند. فرآیند شیرین‌سازی آب در آب شیرین کن‌های خورشیدی جدید به این صورت است که ابتدا آب شور که به طور نسبی سردتر از هوای داخل دستگاه است وارد مبدل (که نقش بازیاب انرژی را دارد) شده است و از طریق انتقال حرارت با هوای مرطوب داخل دستگاه در قسمت کندانسور هم خود پیش گرم می‌شود و هم با گرفتن حرارت از هوا باعث تقطیر بخار آب موجود در هوا می‌شود. آب خروجی از مبدل وارد حوضچه (ناودانی) بالای صفحه جاذب می‌شود از آنجا به صورت مارپیچی بر روی سطح جاذب از درون یک حوضچه وارد حوضچه دیگر می‌شود. آب در حین عبور گرم شده و قسمتی از آن تبخیر می‌شود. نهایتاً آب ورودی که قسمتی از آن بخار شد و وارد حوضچه جمع‌آوری انتهایی شده و از طریق لوله‌های خروجی از آب شیرین کن خارج می‌شود.



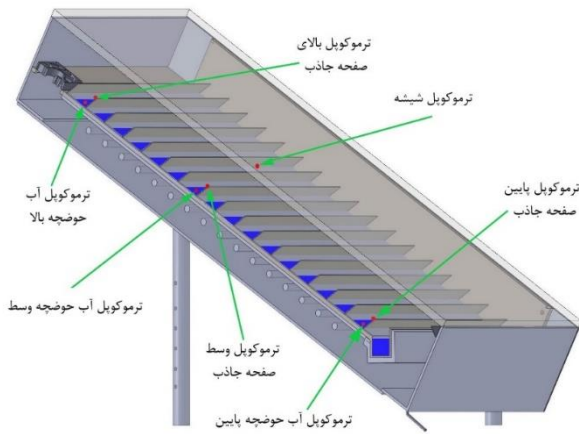
(الف)



(ب)

شکل ۱- الف نمای کلی و ب) اجزای آب شیرین کن خورشیدی در نرم افزار سالدورک

انتقال حرارت از صفحه جاذب به آب باعث تبخیر آب می‌شود و دمای هوا و رطوبت موجود در هوا افزایش می‌یابد (هوا گرم و مرطوب شود). با توجه به اینکه دمای محیط کمتر از دمای هوای داخل آب شیرین کن می‌باشد و چون شیشه و کندانسور از طریق



شکل ۴- شماتیک محل قرارگیری ترموکوپل‌های (حسگرهای) اندازه‌گیری دما

جهت اندازه‌گیری تابش بر روی سطح کلکتور از پیرانومتر (تابش‌سنج) کیپ اند زونن مدل CMP3 استفاده شده است. میزان آب شیرین تولیدشده بر اساس حجم اندازه‌گیری شده و واحد آن میلی‌لیتر (معادل ۱۰۰۰ میلی‌متر مکعب) است. برای اندازه‌گیری میزان آب شیرین تولیدشده از استوانه مدرج پلاستیکی ۵۰۰ میلی‌متری استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری استوانه مدرج پنج میلی‌لیتر است. میزان آب شیرین تولیدشده توسط دستگاه در طول روز هر نیم ساعت یکبار و در طول شب یک بار و در صبح روز بعد اندازه‌گیری و ثبت شده است.

دماهای قسمت‌های مختلف دستگاه آب‌شیرین‌کن به صورت خودکار (اتوماتیک) اندازه‌گیری و ثبت شده است به دین منظور از دستگاه دیتالاگر یونیورسال هیوکی مدل ۸۴۰۱ استفاده شده است. در آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق داده‌برداری هر پنج دقیقه یکبار و به صورت خودکار انجام شده است.

آزمایشات

به منظور بررسی عملکرد دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته و استاندارد، این دستگاه‌ها در چند روز از مهرماه ۱۳۹۹، در محل دانشگاه تحصیلات صنعتی و فناوری پیشرفته مورد آزمایش قرار گرفتند. دستگاه‌ها در هوای بیرون و در محلی که در طول روز هیچ سایه‌ای بر روی آن نباشد و بتواند تابش مستقیم نور خورشید را دریافت نماید، مورد آزمایش قرار گرفتند.

برای نشان داده وضعیت‌های مختلف دستگاه و کمیت‌های اندازه‌گیری شده از متغیرها و کمیت مختلفی استفاده می‌شود که در ادامه به توضیح آن‌ها می‌پردازیم. اولین کمیت میزان انرژی تابشی روزانه، E_S^D ، می‌باشد این کمیت کل انرژی تابشی خورشید که در طول روز به آب‌شیرین‌کن می‌رسد را نشان می‌دهد. برای محاسبه این پارامتر از میزان شدت تابش خورشید بر روی شیشه، $I_T(t)$ ، که به وسیله پیرانومتر نصب‌شده به موازات شیشه به دست آمده است، استفاده می‌شود:

$$E_S^D = A_S \times \int I_T(t) dt \quad (1)$$

زیرین آب شیرین‌کن استاندارد قرار دارد که با استفاده از چسب اکوارיום از قسمت بالایی صفحه جاذب جدا و درزبندی شده است.

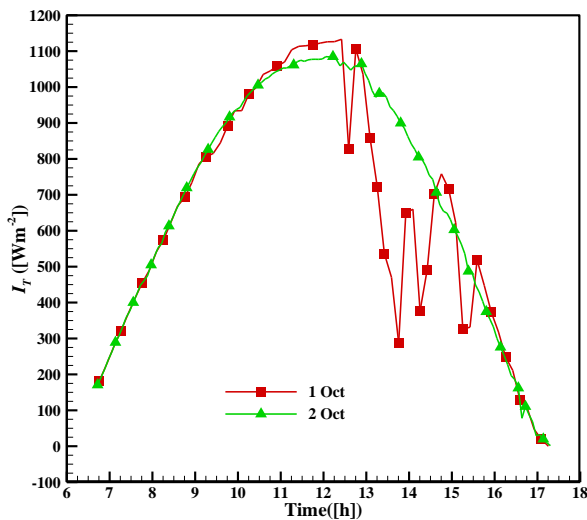
در آب‌شیرین‌کن بهبودیافته کندانسور در پشت صفحه جاذب قرار می‌گیرد. البته از آنجاکه مطلوب این است که تمام انرژی حرارتی که از انرژی خورشید به صفحه جاذب می‌رسد برای تبخیر آب به کارگیری شود یک عایق به ضخامت یک سانتی‌متر بین این دو قرار گرفته است تا از انتقال حرارت و اتلاف انرژی از صفحه جاذب به کندانسور جلوگیری کند. در زیر عایق یک صفحه فلزی به ضخامت ۰/۷ میلی‌متر قرار گرفته است که لوله‌های مبدل به آن متصل شده‌اند. یک فاصله هوایی به اندازه ۲۰ سانتی‌متر برای کندانسور در نظر گرفته شده است و یک ورق آهن به ضخامت ۰/۷ میلی‌متر به عنوان صفحه زیرین قسمت کندانسور قرار داده شده است. قسمت بیرونی این صفحه در معرض هوای محیط بوده می‌تواند به عنوان صفحه تقطیر به کار گرفته شود. مبدل حرارتی از جنس لوله آلومینیومی با قطر یک سانتی‌متر و طول حدوداً ۷ متر و به صورت مارپیچ ساخته شده است. عکسی از لوله‌های مبدل حرارتی در زیر صفحه جاذب در فضای کندانسور در شکل ۳ نشان داده شده است.



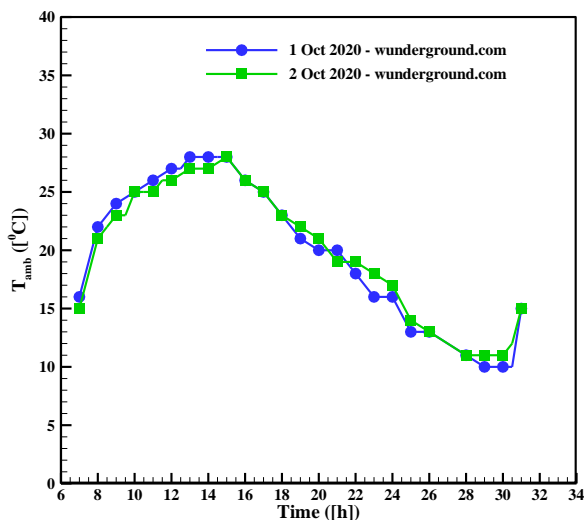
شکل ۳- عکسی از مبدل حرارتی در فضای بالای کندانسور

دستگاه‌های اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری دما از ترموکوپل‌های نوع K استفاده شده است این ترموکوپل‌ها قابلیت اندازه‌گیری دما در محدوده دمایی ۲۰۰- تا ۱۳۵۰ درجه سانتیگراد را دارند. در آزمایش‌ها دمای آب درون حوضچه‌ها، دمای شیشه و دمای صفحه جاذب در سه محل به ترتیب بالا، وسط و پایین صفحه جاذب اندازه‌گیری شده‌اند. در شکل ۴ به صورت شماتیک محل قرارگیری ترموکوپل‌های دما (سنسورها) نشان داده شده است.



شکل ۵- نمودار تغییرات شدت تابش خورشید در روزهای ۱۰ و ۱۱ مهرماه ۱۳۹۹ مصادف با ۱ و ۲ اکتبر ۲۰۲۰



شکل ۶- دمای هوا در روزهای آزمایش

مقایسه بین دمای پایین و وسط صفحه جاذب آب شیرین کن‌های استاندارد و بهبودیافته به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در دستگاه آب شیرین کن بهبودیافته مقدار بیشتری از انرژی دریافتی برای تبخیر آب به کار گرفته می‌شود دمای قسمت‌های مختلف صفحه جاذب در این آب شیرین کن کمتر از دمای صفحه جاذب در آب شیرین کن استاندارد می‌باشد. بررسی شکل‌ها نشان می‌دهد که دمای صفحه جاذب در قسمت پایین آن کمتر از دمای وسط آن می‌باشد که احتمالاً به دلیل سایه اندازی لبه‌های قسمت تبخیر کننده می‌باشد.

که A_S مساحت قسمت دریافت کننده تابش یا همان مساحت شیشه و برابر $1.42 \times 0.54 = 0.767 \text{ m}^2$ می‌باشد. میزان آب شیرین تجمیعی V_F^{cum} نشان دهنده میزان آب شیرین تولیدی از ابتدای اندازه گیری تا زمان t می‌باشد و برحسب میلی لیتر بیان می‌شود. میزان آب شیرین تولیدی کل یا روزانه (روز + شب) با V_F^T نمایش داده می‌شود. برای ارزیابی عملکرد آب شیرین کن‌های استاندارد و بهبودیافته از بازده استفاده می‌شود. بازده نشان دهنده نسبت انرژی خروجی مفید به میزان انرژی ورودی به دستگاه می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{V_F^T \rho h_{fg}}{E_S^D} \times 100 \quad (2)$$

که $h_{fg} = 2450 \text{ kJ/kg}$ آنتالپی نهان تبخیر آب و ρ چگالی آب می‌باشد.

پارامتر دیگری که برای مقایسه آب شیرین کن استاندارد با آب شیرین کن بهبودیافته مورد استفاده قرار می‌گیرد نسبت عملکرد می‌باشد که به صورت نسبت میزان آب شیرین تولیدی توسط آب شیرین کن بهبودیافته بر میزان آب شیرین تولیدی توسط آب شیرین کن استاندارد می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RP = \frac{V_F^{T,ISS}}{V_F^{T,SSS}} \quad (3)$$

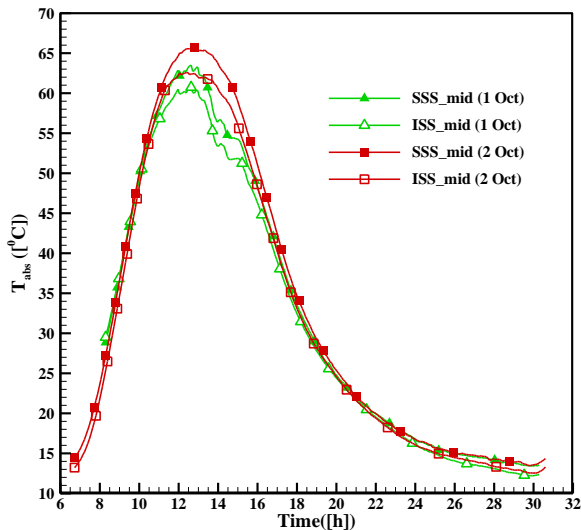
در معادله فوق، بالانویس‌های ISS^2 و SSS^3 به ترتیب برای نشان دادن آب شیرین کن استاندارد و آب شیرین کن بهبودیافته می‌باشند. با توجه به اینکه آب شور در محل آزمایش در دسترس نبوده است. از آب شبکه لوله کشی دانشگاه به عنوان آب شور ورودی استفاده شده است.

بررسی عملکرد دستگاه‌ها در روزهای ۱۰ و ۱۱ مهرماه ۱۳۹۹ مصادف با ۱ و ۲ اکتبر ۲۰۲۰ آزمایش‌هایی بر روی دستگاه‌ها انجام شده است. در این آزمایشات دبی حجمی آب شور برابر ۴۰ میلی لیتر بر دقیقه و ضخامت شیشه ۴ میلی متر می‌باشد. شدت تابش خورشید در طول روز و دمای محیط برای روزهای آزمایش به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ ترسیم شده است.

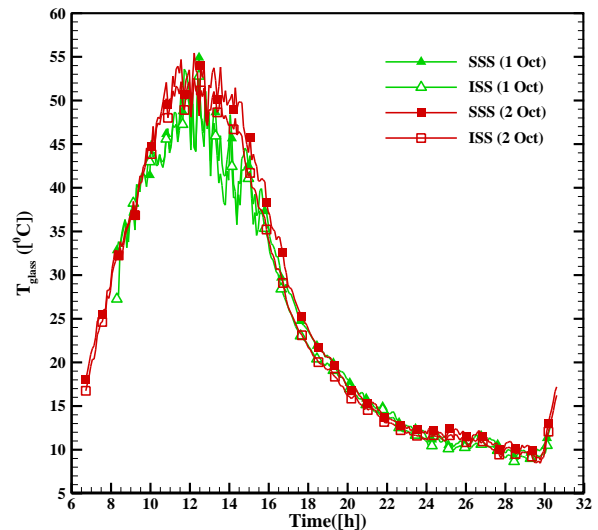
تغییرات دمای لایه بیرونی شیشه در طول آزمایش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای شیشه دارای نوساناتی می‌باشد که به دلیل نصب ترموکوپل در لایه بیرونی شیشه و در معرض باد بودن این ترموکوپل می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود دمای شیشه آب شیرین کن استاندارد بیشتر از دمای شیشه آب شیرین کن بهبودیافته می‌باشد که به دلیل وجود کندانسور در آب شیرین کن بهبود یافته می‌باشد که باعث می‌شود قسمتی از حرارت به سمت کندانسور زیرین منتقل شود.

^۲ Improved Step Solar still (ISS)

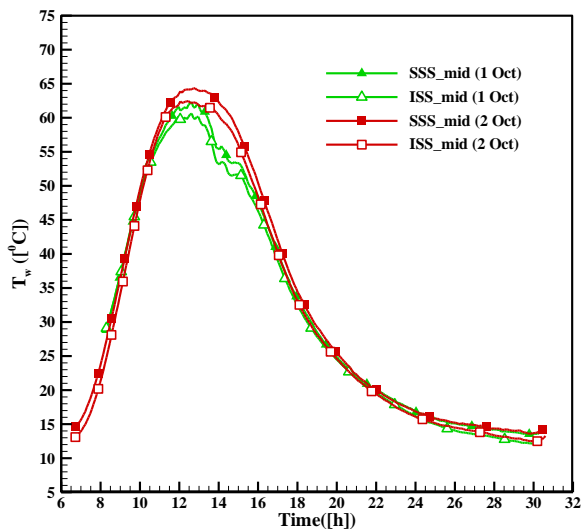
^۳ Standard Step Solar still (SSS)



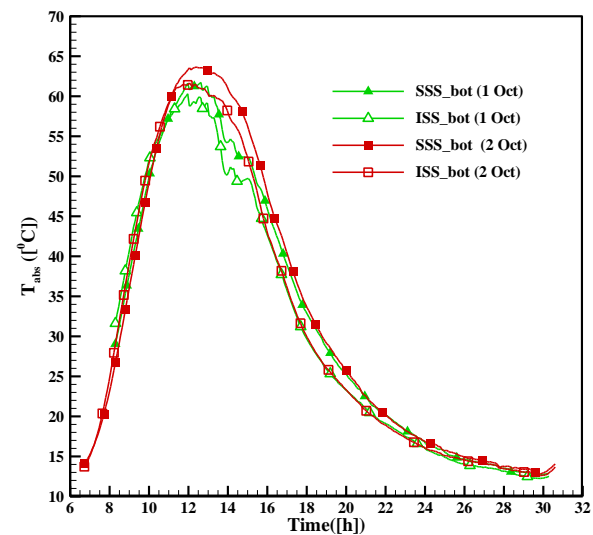
شکل ۹- دمای وسط صفحه جاذب آب شیرین کن‌های استاندارد و بهبودیافته در روزهای آزمایش



شکل ۷- دمای لایه بیرونی شیشه در روزهای بررسی عملکرد دستگاه‌ها



شکل ۱۰- دمای آب در حوضچه وسط آب شیرین کن‌های استاندارد و بهبودیافته



شکل ۸- دمای پایین صفحه جاذب آب شیرین کن بهبودیافته در روزهای آزمایش

در جدول ۱ خلاصه عملکرد دو دستگاه در این آزمایش‌ها ارائه شده است. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد در همه آزمایش‌ها آب شیرین کن بهبودیافته عملکرد بسیار بهتری نسبت به آب شیرین کن استاندارد دارد. به طوری که در بسیاری از روزها بیشتر از دو برابر دستگاه استاندارد آب شیرین تولید کرده است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود مقایسه بازده دستگاه آب شیرین کن بهبودیافته با دستگاه آب شیرین کن استاندارد نشان می‌دهد که بازده آب شیرین کن استاندارد در محدوده ۱۵ تا ۱۸ درصد می‌باشد در حالی که بازده آب شیرین کن بهبودیافته بین ۳۴ تا ۳۷ درصد می‌باشد که به وضوح عملکرد بهتر آب شیرین پیشنهادی در این تحقیق را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۰ دمای آب در حوضچه وسط آب شیرین کن استاندارد و بهبودیافته نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای هر دو آب شیرین کن، دمای آب حوضچه‌های وسط کمتر ولی بسیار نزدیک به دمای صفحه جاذب می‌باشد.

مهم‌ترین ویژگی آب شیرین کن‌های خورشیدی میزان آب شیرین تولیدی آن‌ها می‌باشد در شکل ۱۱ میزان جمعیتی آب شیرین تولیدی آب شیرین کن بهبودیافته و استاندارد باهم مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان آب شیرین تولیدی توسط آب شیرین کن بهبودیافته در همه‌روزهای آزمایش بیشتر از آب شیرین کن استاندارد می‌باشد.



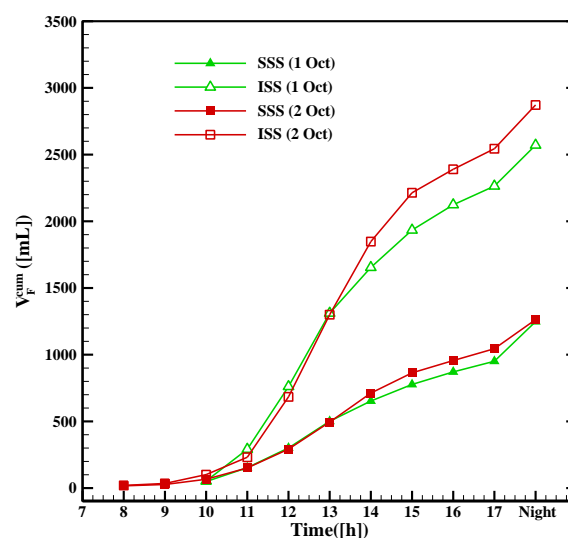
استاندارد نیز با همان مشخصات و ابعاد ساخته شد. نتایج به دست آمده نشان داد که آب شیرین کن بهبود یافته تا بیش از دو برابر آب شیرین کن استاندارد آب شیرین تولید کرده است. میزان آب شیرین تولیدی آب شیرین کن بهبود یافته در این روزها حداقل ۳/۳ و حداکثر ۳/۷ لیتر بر روز بوده است و بیشینه و کمینه بازده این آب شیرین کن به ترتیب ۳۶ و ۳۳ درصد بوده است.

مراجع

- [1] H. M. Qiblawey and F. Banat, "Solar thermal desalination technologies," *Desalination*, vol. 220, no. 1-3, pp. 633-644, 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.01.059.
- [2] A. Kabeel, A. Khalil, Z. Omara, and M. Younes, "Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still," *Desalination*, vol. 289, pp. 12-20, 2012.
- [3] Z. Omara, A. Kabeel, and M. Younes, "Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors," *Desalination*, vol. 314, pp. 67-72, 2013.
- [4] S. El-Agouz, "Experimental investigation of stepped solar still with continuous water circulation," *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 186-193, 2014.
- [5] A. Kabeel, Z. Omara, and M. Younes, "Techniques used to improve the performance of the stepped solar still—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 46, pp. 178-188, 2015.
- [6] A. Madhlopa and C. Johnstone, "Numerical study of a passive solar still with separate condenser," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 7, pp. 1668-1677, 2009/07/01/ 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.032>.
- [7] A. A. F. Al-Hamadani and S. K. Shukla, "Performance of Single Slope Solar Still with Solar Protected Condenser," *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, vol. 28, no. 2, pp. 6-28, 2013/04/01 2013, doi: 10.1080/21563306.2013.10677548.
- [8] R. Bhardwaj, M. V. ten Kortenaar, and R. F. Mudde, "Maximized production of water by increasing area of condensation surface for solar distillation," *Applied Energy*, vol. 154, pp. 480-490, 2015/09/15/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.060>.
- [9] H. E. S. Fath, S. Elsherbiny, and A. Ghazy, "A naturally circulated humidifying/dehumidifying solar still with a built-in passive condenser," *Desalination*, vol. 169, no. 2, pp. 129-149, 2004/10/01/ 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.014>.

جدول ۱- مقایسه عملکرد دستگاه های آب شیرین کن

| روز آزمایش | E_S^D ([MJ]) | نوع | V_F^T ([mL]) | η (%) | RP |
|------------------|------------------|-----|------------------|------------|-----|
| ۱۰ مهر (۱ اکتبر) | ۱۹/۲ | SSS | ۱۲۴۸ | ۱۵/۹ | - |
| | | ISS | ۲۵۷۱ | ۳۲/۸ | ۲/۱ |
| ۱۱ مهر (۲ اکتبر) | ۲۰/۵ | SSS | ۱۲۶۳ | ۱۵/۱ | - |
| | | ISS | ۲۸۷۲ | ۳۴/۳ | ۲/۳ |



شکل ۱۱- مقایسه میزان تجمعی آب شیرین تولیدی آب شیرین کن های استاندارد و بهبود یافته در دبی های مختلف

نتیجه گیری

در این تحقیق یک دستگاه آب شیرین کن جدید برای شیرین سازی آب های شور با استفاده از انرژی خورشیدی ارائه شده است. این آب شیرین کن از اضافه کردن یک کندانسور خارجی به صورت یکپارچه به یک آب شیرین کن شیب دار استاندارد به وجود آمده است. کندانسور خارجی در زیر صفحه جاذب قرار داشته و به نحوی ساخته شده است که یک دستگاه یکپارچه را ایجاد کرده است. فضای کندانسور از طریق دو فاصله هوایی در پایین و بالای صفحه جاذب به قسمت بالای آب شیرین کن مرتبط می باشد. گردش هوا بین قسمت تبخیر و قسمت کندانسور به صورت طبیعی (جریان آزاد) صورت می گیرد که این گردش به دلیل نیروی بویانسی (تغییر چگالی هوا با تغییر دما) می باشد.

در این تحقیق ابتدا آب شیرین کن بهبود یافته در نرم افزار سالیدورک طراحی شد و سپس مطابق نقشه طراحی شده ساخته شد. به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد آب شیرین کن جدید، یک آب شیرین کن

ACEC2021-23510

شبیه‌سازی عملکرد مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در یخچال و فریزرهای صنعتی

هستی پهلوان‌زاده^۱، سیدمحمدحجت محمدی^۲، امیربابک انصاری^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته؛ h.pahlavanzade1997@gmail.com

^۲ استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته؛ smh.mohammadi@kgut.ac.ir

^۳ استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته؛ a.b.ansari@kgut.ac.ir

چکیده

حمل و نقل و نگهداری مواد غذایی در دمای پایین یک مسئله مهم در سراسر جهان بوده و به علت رشد جمعیت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای ذخیره‌سازی و افزایش ماندگاری مواد غذایی، به یخچال و فریزرهای خانگی و تجاری نیاز است. این تجهیزات بخش عمده‌ای از توان الکتریکی مصرفی در بخش تجاری، به خصوص در ساعات پیک مصرف را به خود اختصاص می‌دهند. از طرفی دیگر، مواد غذایی یخ زده باید در دمایی زیر صفر درجه سانتی‌گراد نگهداری شوند. اما نوسانات دمایی در طول دوره نگهداری در فریزر می‌تواند موجب کاهش کیفیت غذای منجمد شود. مشکل دیگر در یخچال و فریزرهای تجاری ناشی از باز شدن در آن‌ها در مکان‌های تجاری توسط مصرف‌کنندگان است، که اثر قابل توجهی بر روی سیستم سرمایش دارد و موجب تغییر درجه حرارت در فریزر می‌گردد. یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد یخچال و فریزرهای تجاری، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده^۱ (PCM) است. از فواید بکارگیری PCM می‌توان به گرمای ذوب بالا و تغییر فاز (ذوب / انجماد) در محدوده دمایی مناسب برای کاربردهای ذخیره‌سازی سرمایشی، اشاره کرد. همچنین، به دلیل گرمای نهان بالا، اندازه کوچکی از سیستم‌های ذخیره‌سازی قابل دستیابی است. محل قرارگیری PCM در سیستم‌های سرمایش می‌تواند اوپراتور، کندانسور یا بخش محفظه نگهداری مواد غذایی باشد. در این تحقیق، اثربکارگیری مواد تغییر فاز دهنده مختلف در اوپراتور یک سیستم ذخیره‌سازی سرمایش مورد مطالعه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: یخچال فریزرهای تجاری، مواد تغییر فاز دهنده، ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، کاهش مصرف انرژی

مقدمه

کاربرد مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در یخچال‌ها و فریزرها سابقه‌ای طولانی دارد. در واقع استفاده از یخ به منظور نگهداری طولانی‌تر مواد غذایی، به سال‌های اولیه حضور انسان در این کره خاکی برمی‌گردد. امروزه از PCM بیشتر به منظور بهبود عملکرد، کاهش میزان مصرف انرژی و جابجایی پیک بار مصرفی سیستم استفاده می‌شود. در این زمینه کارهای تحقیقاتی بسیاری، اعم از تجربی و شبیه‌سازی انجام شده است که در ادامه برخی از آنها مختصراً بیان شده‌اند. در بسیاری از تحقیقات انجام شده، مواد تغییر فاز دهنده در قسمت اوپراتور یخچال/فریزرهای خانگی قرار گرفته است. کوفر-تولدو و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۸ به بررسی رفتار یک اوپراتور یکپارچه در یک یخچال خانگی با دو نوع مواد تغییر فاز دهنده مختلف با استفاده از آزمون‌های استاندارد پرداخته‌اند. به طور کلی، نتایج تجربی آنها نشان داد که استفاده از PCM به افزایش بهبود عملکرد یخچال‌های خانگی از نظر مصرف توان و تغییرات دمای داخلی کمک می‌کند. یک مرور تحقیقاتی در مورد استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در یخچال خانگی توسط بیستا و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۸ انجام شده است. آن‌ها اظهار داشتند که موقعیت PCM در یخچال، یا سیستم فشرده‌سازی بخار، تاثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی الکتریکی، عملکرد انرژی و توزیع دما دارد. ماریانو و همکاران [۳]، PCM را در داخل اوپراتور یخچال قرار دادند. طبق مطالعات ایشان که در زمینه گرادیان حرارتی در داخل کابینت انجام شد، نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی PCM، نوسانات دمایی را کنترل و زمان خاموشی کمپرسور را افزایش می‌دهد.

همچنین عملکرد انرژی یخچال‌های تجاری نیز می‌تواند با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بهبود یابد. شاون تالکدار و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۹ از PCM در اوپراتور به عنوان سیستم پشتیبانی برای ذخیره

^۱ Phase Change Material

کشور در ساعات پیک مصرف برق مخصوصاً در تابستان و با توجه به اینکه یخچال-فریزرهای صنعتی بخش عمده‌ای از مصرف انرژی الکتریکی را در تابستان به خود اختصاص می‌دهند، استفاده از PCM می‌تواند تأثیر بسزایی در عملکرد یخچال/فریزرهای صنعتی و میزان مصرف انرژی بگذارد. برای این منظور، در گام اول نیاز به شبیه‌سازی و آنالیز رفتار حرارتی مواد تغییر فاز دهنده در این نوع یخچال‌ها است، بطوریکه بتوان از نتایج آن در تحلیل انرژی یخچال/فریزرهای صنعتی استفاده نمود. لذا هدف اصلی این مطالعه استفاده از انواع مختلف مواد تغییر فاز دهنده در اواپراتور یخچال-فریزرهای صنعتی و بررسی و آنالیز رفتار حرارتی این مواد است.

مدل‌سازی عددی

در شکل (۱) یک برش از اواپراتور به صورت سه بعدی نشان داده شده است. با توجه به تقارن موجود در هندسه سه‌بعدی، شبیه‌سازی انجام شده در این مطالعه در حالت دو بعدی و با دقت بسیار خوبی انجام شده است. در این مطالعه از آب و n-octadecane به عنوان PCM استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول (۱) بیان شده است. فرضیات در این تحقیق به این صورت است که PCM در محفظه در حالت شارژ و دشارژ حرکتی نداشته است و دارای ورودی و خروجی نیست. همچنین در جدول (۲) شرایط مرزی برای دیواره‌های محفظه PCM ذکر شده، مشخص شده است. در مدل شارژ (انجماد)، PCM در حالت مایع و در دمای اولیه 30.2 K قرار دارد. برای شبیه‌سازی از نرم افزار ANSYS-FLUENT 2021 استفاده شده است. شبیه‌سازی رفتار دینامیکی PCM با حل معادلات حاکم تارسیدن به دقت 10^{-1} انجام شده است.

| Properties | PCM | | |
|-------------------------------|------|------|--------------|
| | آب | یخ | n-octadecane |
| Melting Point (K) | 273 | 273 | 300.85 |
| Freezing point (K) | 273 | 273 | 300.85 |
| Latent heat of fusion (kJ/Kg) | 335 | 335 | 243.5 |
| Thermal conductivity (W/m-K) | 0.6 | 2.2 | 0.148 |
| Specific Heat (J/Kg-K) | 4186 | 2060 | 2660 |
| Density (Kg/m ³) | 998 | 915 | 785 |

جدول ۱. مشخصات انواع PCM مورد استفاده در شبیه‌سازی

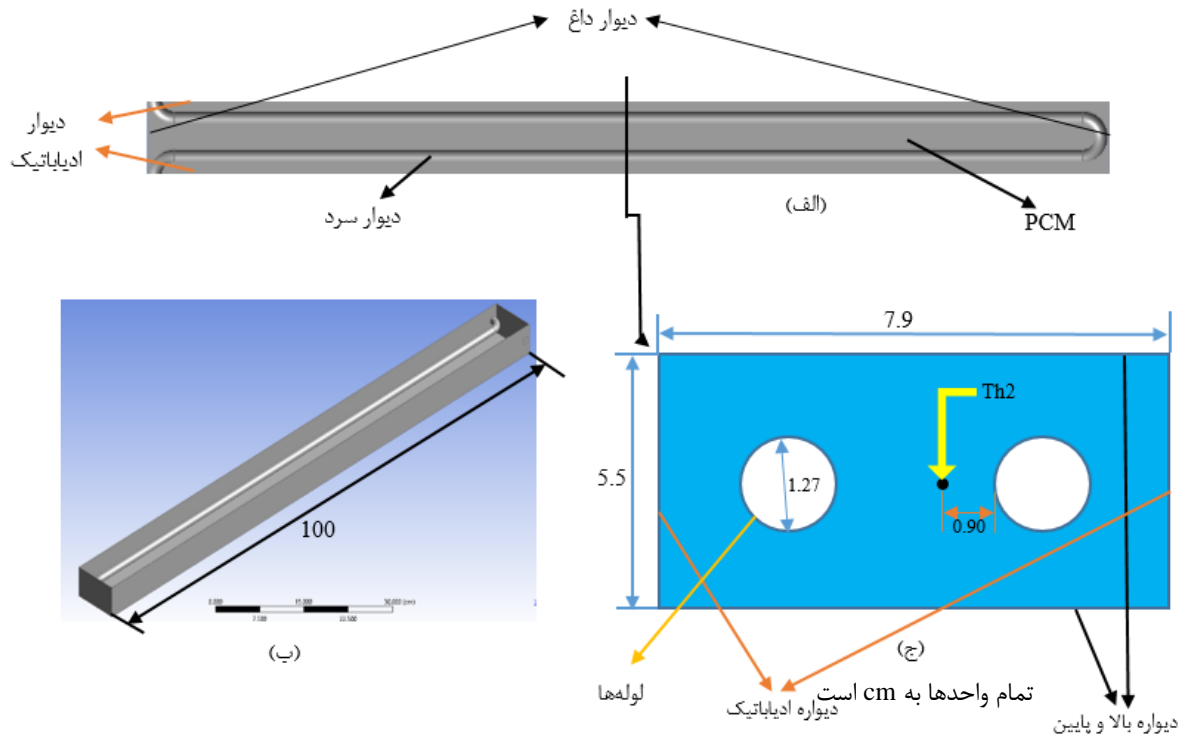
جدول ۲. شرایط مرزی برای آب و n-octadecane

| PCM | water | n-octadecane |
|--------------------|--------------|--------------|
| شرط مرزی | شارژ(انجماد) | |
| دیوار ادیاباتیکی | symmetry | |
| دیوار بالا و پایین | Heat flux =0 | |
| لوله‌ها | T=260 k | |

انرژی سرمایه‌گذاری خورشیدی استفاده کردند بطوریکه که در زمان اوج تقاضا برق یا عدم وجود برق یا در شرایطی که نور خورشید وجود ندارد، سیستم دچار مشکل نگردد. همچنین آنها با استفاده از شارژ و دشارژ PCM، عملکرد سیستم ذخیره‌سازی انرژی را بررسی کردند. در بسیاری از تحقیقات انجام شده در یخچال-فریزرهای خانگی، مواد تغییر فاز دهنده در قسمت کندانسور قرار گرفته است. بخشی پور [۵] در سال ۲۰۱۷ پژوهشی پارامتریک بر روی یک مدل سیکل تبرید همراه با مبدل حرارتی PCM انجام داد که به بررسی جایگاه قرارگیری PCM، ضخامت آن، نوع آن و همچنین بهبود ضریب عملکرد یخچال پرداخته است. پیرورام و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۹ پژوهشی در مورد یخچال‌های خانگی با قرار دادن دو نوع PCM در سطح پشتی کندانسور یخچال انجام دادند که در چهار شرایط این آزمایش انجام شد. در حالتی که از یک نوع PCM استفاده شد، زمان کارکرد کمپرسور کاهش پیدا کرد و زمانی که از دو نوع PCM استفاده شد، مصرف انرژی تا ۱۳٪ کاهش پیدا کرد. اومارا و همکاران [۷] در سال ۲۰۲۰ تحقیقاتی در زمینه کاربرد و تأثیرات PCM در یخچال‌ها انجام دادند. در این تحقیق به بررسی پارامترهای مختلف PCM و تأثیرات آن بر مصرف برق، COP یخچال و محل بارگذاری PCM (اواپراتور و کندانسور) پرداخته‌اند.

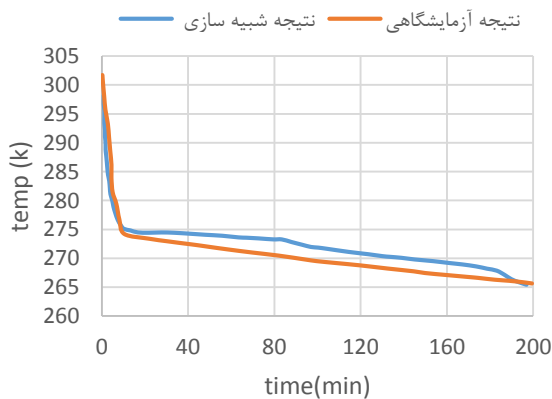
علاوه بر یخچال فریزرهای خانگی، استفاده از PCM در یخچال-فریزرهای صنعتی نیز بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته و تاکنون مطالعات متعددی نیز در این زمینه انجام شده است. ارو و همکاران [۸] استفاده از PCM در یک فریزر تجاری را مورد بررسی قرار دادند که در به حداقل رساندن افزایش درجه حرارت فریزر و محصول داخل آن، تأثیر بسزایی داشت. این افزایش دما به دلیل باز شدن مکرر درب و قطع برق الکتریکی اتفاق می‌افتاد. ماده تغییر فاز دهنده مورد مطالعه در این کار Climsel C-18 با دمای ذوب 18°C بود. نتایج آنها نشان داد که استفاده از PCM، دمای فریزر را 4 تا 6 درجه سلسیوس پایین‌تر نگه می‌دارد و همچنین این امکان را فراهم می‌کند که در طول 3 ساعت قطع برق الکتریکی دمای داخل فریزر حدود 2 درجه سلسیوس پایین‌تر باقی بماند. بن عبدالله و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۹ تحقیقی بر روی عملکرد یخچال‌های کابینتی در باز با استفاده از PCM انجام دادند. در این تحقیق سه نوع پیکربندی مورد بررسی قرار گرفت. PCM در این تحقیق در مبدل حرارتی قرار دارد که موجب انتقال حرارت و کمک به ذوب و انجماد PCM می‌کند. نتایج آنها نشان داد که مواد تغییر فاز دهنده برای مدت 2 ساعت توانایی نگهداری دمای محصولات و هوا زمانی که کمپرسور خاموش است را دارد. ماریانو و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۰ تحقیقاتی بر روی مواد تغییر فاز دهنده در یخچال‌های کابینتی تجاری به منظور انتقال پیک مصرف انرژی به بازه‌های زمانی که در آن‌ها مصرف انرژی کمتر می‌باشد، انجام دادند.

همانطور که مطالعات پیشین نشان می‌دهد، استفاده از PCM تا حد زیادی می‌تواند به بهبود عملکرد یخچال‌ها و فریزرها کمک کند. در سال‌های اخیر با توجه به شرایط بحرانی مصرف انرژی الکتریکی در



شکل ۱. الف) قسمتی از اوپراتور و شرایط مرزی (ب) اوپراتور در حالت سه بعدی (ج) اوپراتور در حالت دو بعدی (شبیه‌سازی شده)

بدست آمده در شکل (۲) مقایسه شده است. در این مطالعه بررسی افزایش انتقال حرارت در شارژ PCM برای سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان برای کاربردهای سرمایش خورشیدی انجام شد که شامل یک اوپراتور با ۲۰ لوله مسی U شکل به طول ۱۰۰ cm و قطر ۱/۲۷cm و محفظه مکعب مستطیل شکل است که شماتیک آن در شکل (۳) نشان داده شده است. PCM مورد استفاده در این مطالعه آب است که فرآیند شارژ آن انجام شد و با استفاده از ترموکوپل‌ها در نقاط مختلف PCM نمودار تغییرات دمای آن اندازه‌گیری شده است. همانطور که از شکل (۲) مشاهده می‌شود نتیجه شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی شاون تالکدار و همکاران [۴] از انطباق بسیار خوبی برخوردار است که نشان‌دهنده اعتبار مدل عددی است.



شکل ۲. مقایسه نتیجه اعتبارسنجی

معادلات حاکم

برای مدل شارژ و دشارژ PCM، روشی تحت عنوان تکنیک آنتالپی تخلخل^۲ استفاده شده است که در آن حجم کسر مایع^۳ محاسبه می‌شود. برای این منظور، در معادلات حاکم که در ادامه بیان شده‌اند، زمانی که $\beta=1$ در PCM در حالت مایع و $\beta=0$ در PCM در حالت جامد و زمانی که $0 < \beta < 1$ باشد در ناحیه دوفازی^۴ قرار دارد. جزئیات بیشتر از معادلات حاکم در راهنمای نرم‌افزار موجود است.

$$H = h + \Delta H \quad (1)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dt \quad (2)$$

$$\Delta H = \beta l \quad (3)$$

$$\beta = 0 \text{ if } T < T_{solidus} \quad (4)$$

$$\beta = 1 \text{ if } T < T_{liquidus} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \text{ if } T_{liquidus} < T < T_{solidus} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot u \cdot H) = \nabla \cdot (K \cdot \nabla T) + S \quad (7)$$

اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل عددی ارائه شده در مطالعه حاضر، یک اوپراتور با محفظه مستطیل شکل که توسط شاون تالکدار و همکاران [۴] مورد مطالعه قرار گرفته بود، شبیه‌سازی شد و نتایج

^۲ enthalpy-prosity

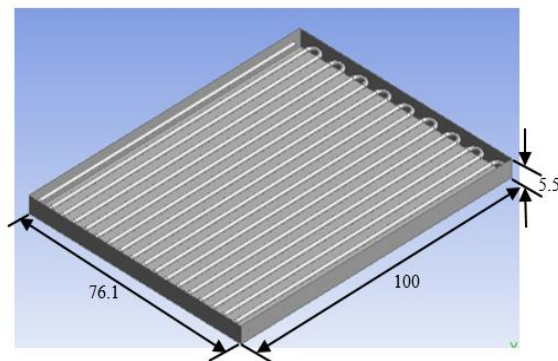
^۳ Liquid fraction

^۴ mushy zone

دمای ۲۹ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای اولیه PCM و همچنین دمای ۸- درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای اولیه لوله‌های اواپراتور در نظر گرفته شده است. فریزر بمدت ۲۰۰ دقیقه کار کرده و در این مدت پروسه شارژ PCM انجام شده است. نتایج حاصل از رفتار حرارتی PCM در پروسه شارژ بصورت کانتورها و نمودارهای خطی در ادامه ارائه شده است.

برای درک بهتر از رفتار حرارتی و نحوه تغییر فاز PCM، در شکل ۵ PCM آب مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور در شکل ۵-الف توزیع دما در داخل آب در مدت زمان شارژ به ازای هر ۵۰ دقیقه ترسیم شده است. با توجه به خواص آب و همچنین شرایط عملکردی یخچال-فریزر، در زمان شروع پروسه شارژ، PCM به صورت مایع (آب) بوده است. در نتیجه پس از شروع شارژ، تغییر فاز از مایع به جامد شروع شده و با توجه به اینکه لوله‌های اواپراتور دفع حرارت را انجام می‌دهند شروع تولید فاز جامد (یخ) از ناحیه اطراف این لوله‌ها شروع می‌شود. همانطور که از کانتورهای دما در شکل ۵-الف مشاهده می‌گردد، با گذشت زمان نفوذ سرما از لوله‌های اواپراتور به داخل ناحیه PCM بیشتر شده و حجم بیشتری از آن سرد می‌شود. مطابق خواص آب در جدول ۱، با توجه به اینکه دمای انجماد صفر درجه سانتی‌گراد است، لذا در نقاطی که دمای کمتر از ۲۷۳ کلوین دارند، فاز جامد تشکیل شده است. برای درک بهتر از میزان تغییر فاز انجام شده و میزان یخ تولید شده، رسم کانتور کسر مایع می‌تواند کمک بسزایی کند. لذا برای مشاهده تغییر فاز رخ داده در PCM آب، کانتورهای کسر مایع در شکل ۵-ب نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با توجه به اینکه در زمان شروع فرآیند شارژ دمای PCM از دمای ذوب آن بیشتر بوده، لذا کل PCM در حالت مایع بوده و در نتیجه با گذشت زمان و در طی پروسه شارژ، فرآیند انجماد صورت می‌گیرد و کسر حجمی مایع کاهش می‌یابد بطوریکه در انتهای فرآیند شارژ بخش زیادی از آن به یخ تبدیل شده است.

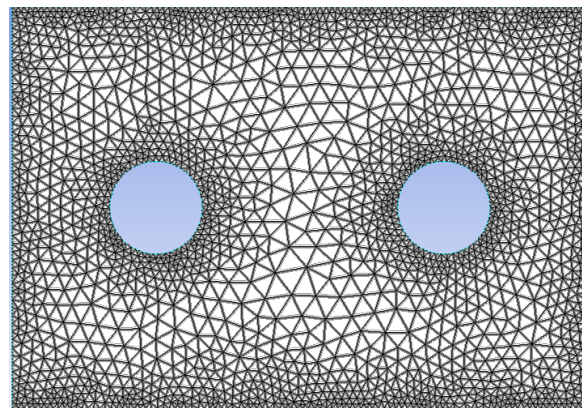
برای بررسی بیشتر رفتار حرارتی PCM در شرایط عملکردی یخچال-فریزر مورد نظر، n-octadecane نیز به عنوان PCM در شرایط مرزی یکسان مورد آنالیز قرار گرفته است. مطابق قبل، فرض بر این است که کل محفظه مورد نظر از این ماده پر شده باشد و دمای اولیه آن نیز ۲۹ درجه سانتی‌گراد باشد. با توجه به اینکه این PCM خواص ترموفیزیکی متفاوتی نسبت به PCM آب دارد، لذا انتظار رفتار متفاوتی از آن در ذخیره انرژی وجود دارد. برای این منظور مطابق قبل، رفتار دینامیکی-حرارتی n-octadecane در شکل ۶ در زمان‌های مختلف با رسم کانتورهای دما و کسر مایع مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که از خواص این PCM (جدول ۱) مشاهده می‌گردد، دمای انجماد آن اختلاف بسیار کمی با دمای محیط دارد و در نتیجه با توجه به شرایط اولیه (دمای ۳۰۲ کلوین)، این PCM در شروع فرآیند شارژ، حالت مایع دارد. همانطور که از شکل ۶-الف مشاهده می‌گردد، با گذشت زمان دفع حرارت از طریق لوله‌های اواپراتور انجام گرفته و نفوذ سرما در داخل PCM افزایش



شکل ۳. نمای سه بعدی از هندسه مقاله اعتبارسنجی شده [۴]

مطالعه شبکه

برای بررسی دقت نتایج و همچنین اطمینان از استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه محاسباتی، یک مطالعه شبکه گسترده انجام شده است. برای این منظور تعداد شبکه‌های مختلفی به ترتیب از شبکه درشت تا شبکه ریز مورد استفاده قرار گرفته و نتایج بدست آمده در این شبکه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که یک شبکه با ۵۲۰ المان محاسباتی، شبکه بهینه بوده بطوریکه با ریزتر کردن شبکه تغییراتی در نتایج ایجاد نمی‌شود. شماتیک شبکه محاسباتی مورد استفاده در این مطالعه در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌گردد، برای کاهش تعداد شبکه محاسباتی و افزایش دقت محاسبات، شبکه مورد استفاده در نزدیکی مرزهای صلب که گرادینان متغیرهای وابسته (مانند دما) زیاد است، متمرکز شده است.



شکل ۴. شبکه‌بندی مطالعه حاضر

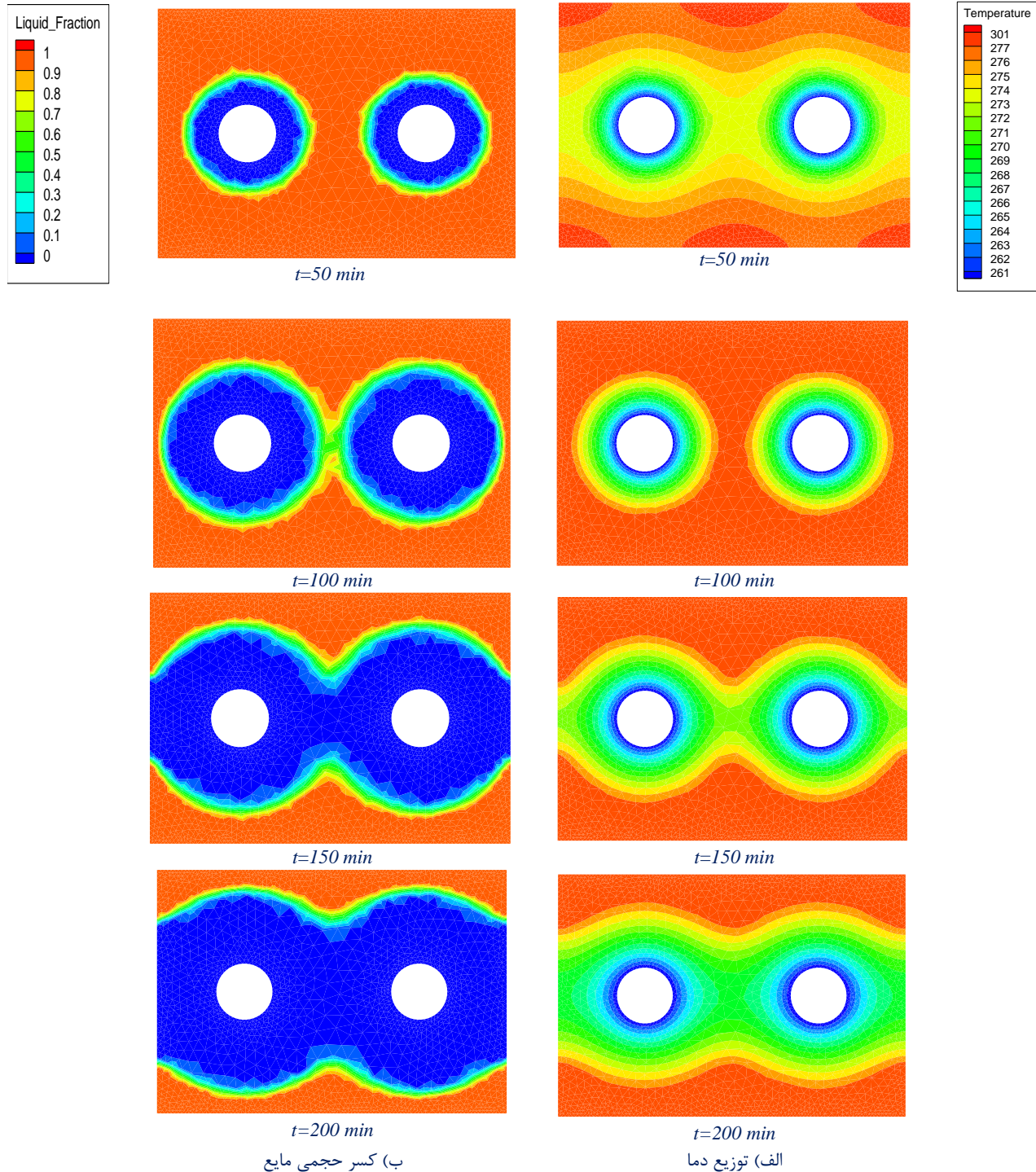
نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد مواد تغییر فاز دهنده مختلف در یخچال فریزرهای صنعتی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. همانطور که قبلاً نیز بیان شد با توجه به تقارن موجود در هندسه، برش مقطع میانی محفظه اواپراتور شبیه‌سازی شده است. برای آنالیز انجام شده، دو PCM مختلف شامل آب و n-octadecane در شرایط عملکردی یکسان و در فرآیند شارژ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به شرایط عملکردی سیستم سرمایشی،



می‌گردد اما در انتهای فرآیند شارژ بخش بسیار کمی از PCM در فاز مایع قرار دارد در صورتی که در PCM آب بعد از گذشت ۲۰۰ دقیقه بخش کمتری از آن تغییر فاز داده بود.

می‌یابد. در مقایسه با آب، در انتهای پروسه شارژ، در این PCM نفوذ سرما بسیار بیشتر بوده است. برای درک بهتر از این موضوع، کانتورهای کسر مایع نیز در شکل ۶-ب ترسیم شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌گردد، با گذشت زمان تبدیل فاز مایع به جامد انجام



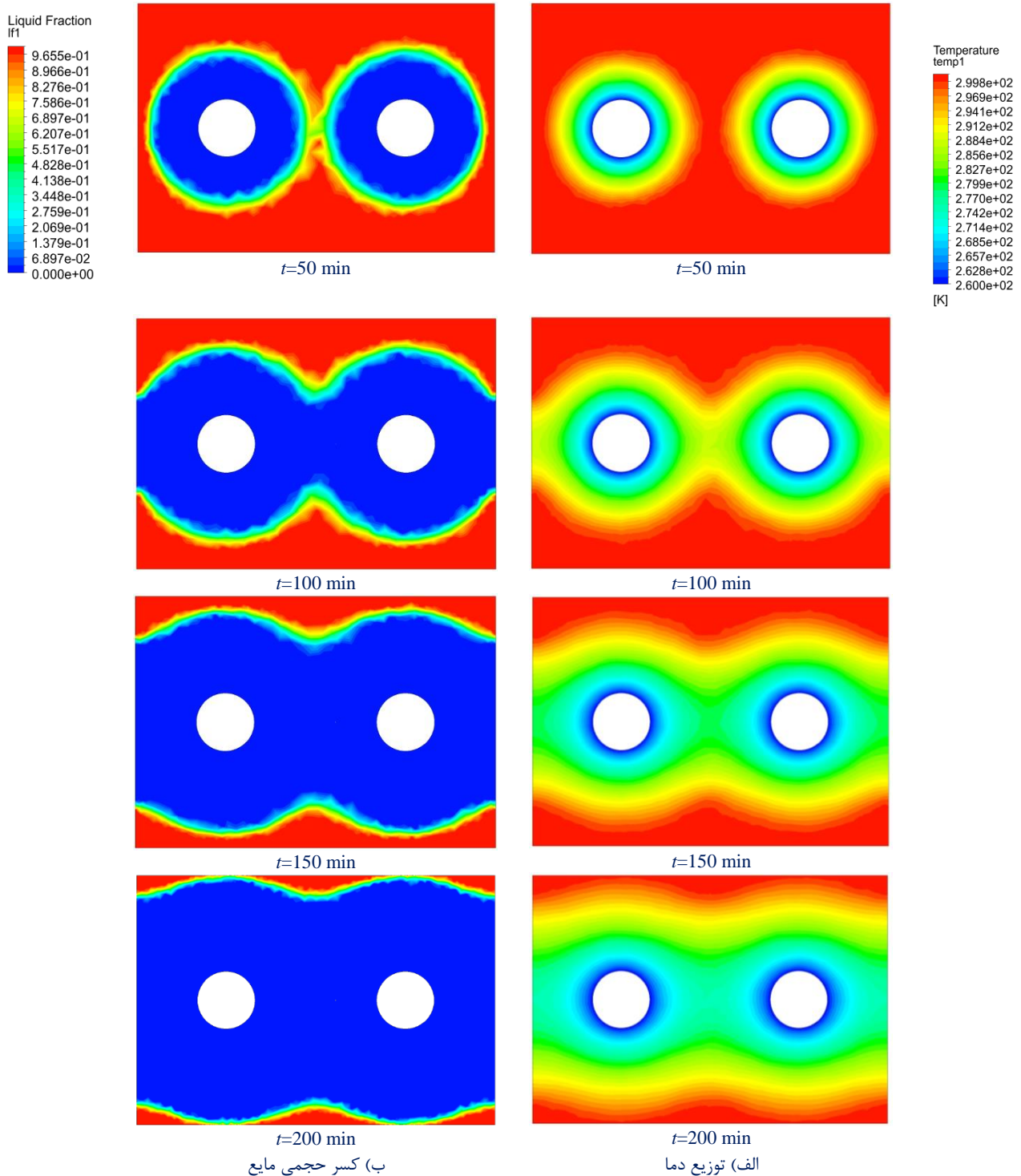
شکل ۵: تغییرات الف) توزیع دما و ب) کسر حجمی مایع در داخل pcm آب با گذشت زمان در فرآیند شارژ (انجماد)

دمای لوله‌های اواپراتور می‌رسد. اما در n-octadecane بر خلاف آب، دمای نقطه مورد نظر با شیب نسبتا ملایمی کاهش می‌یابد. در واقع این نمودار نشان می‌دهد که در ابتدای پروسه شارژ نفوذ سرما در PCM آب سرعت بسیار بیشتری نسبت به n-octadecane داشته است. دلیل اصلی این اتفاق که از مقایسه کانتورهای دما و کسر مایع نیز مشاهده شد، تفاوت در خواص ترموفیزیکی دو PCM است.

اگرچه شکل‌های ۵ و ۶ دید نسبتا خوبی را نسبت به رفتار حرارتی و دینامیکی PCM نشان می‌دهد، اما برای بررسی دقیق‌تر رفتار آنها، نحوه تغییرات دمای نقطه Th2 که در شکل ۱-ج مکان آن مشخص شده است، در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، در PCM آب دمای نقطه مورد نظر با شیب بسیار زیادی کاهش یافته و سپس با شیب بسیار کم کاهش می‌یابد تا زمانیکه به

مواد تغییر فاز دهنده مختلفی را انتخاب کرد که این موضوع به نوع طراحی سیستم، شرایط عملکردی آن و سایر پارامترهای مربوط به PCM بستگی دارد.

همانطور که از جدول ۱ مشاهده می‌گردد، پخش حرارتی دو PCM با هم متفاوت است که دلیل اصلی این موضوع است. بنابراین بطور کلی و با توجه به رفتار حرارتی دو PCM، مشاهده می‌گردد که بسته به مدت زمان مورد نیاز برای شارژ PCM، می‌توان



شکل ۶: تغییرات (الف) توزیع دما و (ب) کسر حجمی مایع در داخل pcm n-octadecane با گذشت زمان در فرآیند شارژ (انجماد)



household refrigerator evaporator with two eutectic phase-change materials. *International Journal of Refrigeration*, 93, 29-37.

[2] Bista, S., Hosseini, S. E., Owens, E., & Phillips, G. (2018). Performance improvement and energy consumption reduction in refrigeration systems using phase change material (PCM). *Applied Thermal Engineering*, 142, 723-735.

[3] Maiorino, A., Del Duca, M. G., Mota-Babiloni, A., Greco, A., & Aprea, C. (2019). The thermal performances of a refrigerator incorporating a phase change material. *International Journal of Refrigeration*, 100, 255-264.

[4] Talukdar, S., Afroz, H. M. M., Hossain, M. A., Aziz, M. A., & Hossain, M. M. (2019). Heat transfer enhancement of charging and discharging of phase change materials and size optimization of a latent thermal energy storage system for solar cold storage application. *Journal of Energy Storage*, 24, 100797.

[5] Bakhshipour, S., Valipour, M. S., & Pahamli, Y. (2017). Parametric analysis of domestic refrigerators using PCM heat exchanger. *International journal of refrigeration*, 83, 1-13.

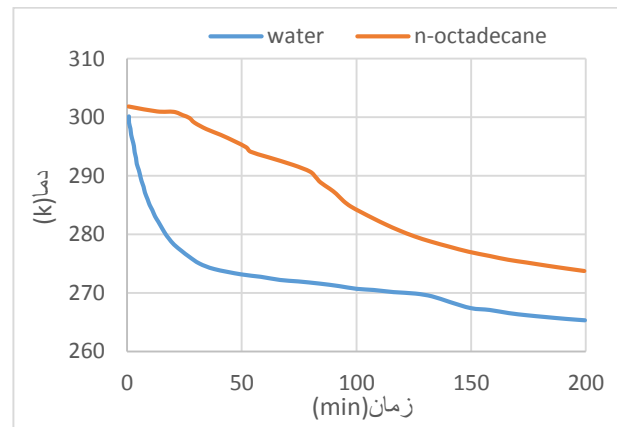
[6] Pirvaram, A., Sadrameli, S. M., & Abdolmaleki, L. (2019). Energy management of a household refrigerator using eutectic environmental friendly PCMs in a cascaded condition. *Energy*, 181, 321-330.

[7] Omara, A. A., & Mohammedali, A. A. (2020). Thermal management and performance enhancement of domestic refrigerators and freezers via phase change materials: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 102522.

[8] Oró, E., Miro, L., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). Thermal analysis of a low temperature storage unit using phase change materials without refrigeration system. *International journal of refrigeration*, 35(6), 1709-1714.

[9] Ben-Abdallah, R., Leducq, D., Hoang, H. M., Fournaison, L., Pateau, O., Ballot-Miguet, B., & Delahaye, A. (2019). Experimental investigation of the use of PCM in an open display cabinet for energy management purposes. *Energy Conversion and Management*, 198, 111909.

[10] Maiorino, A., Del Duca, M. G., Mota-Babiloni, A., & Aprea, C. (2020). Achieving a running cost saving with a cabinet refrigerator incorporating a phase change material by the scheduling optimisation of its cyclic operations. *International Journal of Refrigeration*, 117, 237-246.



شکل ۷. مقایسه نمودار شارژ (انجماد) آب و n-octadecane

فهرست علائم

| | |
|------------------------------|----------|
| گرمای ویژه، J/kg.k | C_p |
| قطر، cm | D |
| آنتالپی، J | H |
| آنتالپی مخصوص، J/kg | h |
| هدایت حرارتی، w/m.k | K |
| طول، cm | L |
| گرمای نهان kJ/kg | ι |
| شعاع، cm | R |
| منبع انرژی، W/m ³ | S |
| دمای، k | T |
| زمان، min | t |
| دمای ترموکوپل افقی ۲ | Th_2 |
| بردار سرعت، m/s | u |
| عرض، cm | w |
| حروف یونانی | |
| کسر مایع | β |
| چگالی، kg/m ³ | ρ |
| زیرنویس | |
| مرجع | ref |
| مایع | Liquidus |
| جامد | solidus |

مراجع

[1] Cofré-Toledo, J., Vasco, D. A., Isaza-Roldán, C. A., & Tangarife, J. A. (2018). Evaluation of an integrated

ACEC2021-24299

مطالعه اثرات سطح مقطع غیر یکنواخت کانال کاتد بر توزیع واکنشگرها در پیل سوختی غشا پلیمری

ابراهیم افشاری^۱، سید علی اطیابی^۲، نبی جهانتیغ^۳

^۱دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، e.afshari@eng.ui.ac.ir

^۲دکتری مکانیک گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

^۳دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل

چکیده

در این مقاله، یک مدل عددی که درک کاملی از اصول اساسی پدیده‌های انتقال در پیل سوختی غشا پلیمری با کانال جریان گاز کاتد غیر یکنواخت فراهم می‌کند، معرفی شده است. مسئله به صورت سه بعدی و حالت پایا در سیستم مختصات کارتزین با استفاده از یک دامنه کلی و روش حجم محدود حل شده است. مدل شامل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای همبسته شده غیر خطی بقاء جرم، مومنتوم، بقا اجزا، بار الکتریکی و انرژی همراه با واکنش‌های الکتروشیمیایی است که برای کانال‌ها، صفحات قطبی، الکترودهای پخش گاز، لایه‌های کاتالیست و ناحیه غشا معتبر می‌باشد. این مدل پیل سوختی غشا پلیمری با کانال جریان گاز مخروطی کاتد نتایجی هم چون توزیع کسر گونه‌های جرمی و پتانسیل در نواحی مختلف را در بر دارد و مشاهده می‌شود که عملکرد بهتری برای پیل سوختی غشا پلیمری به همراه دارد.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی غشا پلیمری، کانال کاتد شیب‌دار، توزیع اکسیژن، مدل‌سازی عددی

مقدمه

پیل‌های سوختی غشا پلیمری دستگاه‌هایی الکتروشیمیایی هستند که مستقیماً انرژی شیمیایی حاصل از واکنش یک سوخت و اکسیدکننده (معمولاً هیدروژن و اکسیژن) را به الکتریسیته و گرما تبدیل می‌کنند. پیل سوختی غشا پلیمری یک منبع انرژی امیدوارکننده به‌ویژه برای استفاده در وسایل قابل حمل الکترونیکی به دلیل بهره‌وری انرژی بالا، درجه حرارت عملیاتی کم (معمولاً ۸۰ درجه سلسیوس)، بازده بالا و سر و صدای کم می‌باشد. این نوع پیل‌ها، جذاب‌ترین مولدهای تبدیل انرژی می‌باشند و می‌توانند با یک راندمان بالا و برای یک مدت طولانی کار کنند؛ زیرا بازده آنها محدود به چرخه کارنو نیست. این مزایا، این نوع پیل را به یک گزینه مناسب برای مولدهای انرژی قابل حمل و

کاربردهای حمل و نقلی و همچنین برای تولید ایستگاه‌های توزیع انرژی الکتریکی، تبدیل می‌نماید [۱ و ۲]. از آنجا که پیل سوختی غشا پلیمری به طور همزمان نیاز به شبیه‌سازی‌هایی شامل واکنش‌های الکتروشیمیایی، توزیع چگالی جریان، مسائل هیدرودینامیکی و پدیده‌های انتقال جرم چند مؤلفه‌ای دارد؛ برای به‌دست آوردن درک اساسی از تعامل این پدیده‌ها و ارائه ابزاری مناسب به‌وسیله رایانه برای طراحی و بهینه‌سازی آن، یک مدل جامع ریاضی لازم است. در واقع پیش‌بینی مدل ریاضی به کاهش تعداد آزمایش‌های تجربی برای مطالعه پیل‌های سوختی به طور سامانمند کمک می‌کند. با توجه به این موارد، استفاده از شبیه‌سازی عددی برای بررسی عملکرد پیل سوختی یک ابزار مناسب برای پیش‌بینی اثر تغییر پارامترهای خاص نظیر فشار، رطوبت نسبی گازهای ورودی، ضریب استوکیومتری و حتی هندسه پیل می‌باشد [۳-۴].

شکل و هندسه میدان جریان تأثیر مستقیمی بر توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر و مدیریت مناسب آب تولیدی و خارج ساختن آن از کانال میدان جریان دارد. به طور کلی طرح‌های مختلفی برای میدان جریان پیل سوختی غشا پلیمری وجود دارد. طراحی میدان جریان یک موازنه‌ی پیچیده بین قیدهای وابسته به هم بسیاری است که اغلب آنها نقش معکوسی روی عملکرد پیل سوختی خواهند داشت و این مطلب ارزیابی این پارامترها را با اهمیت می‌نماید. قیدهای طراحی شامل: افت فشار، انتقال الکترون‌ها، انتقال حرارت و مدیریت آب می‌باشد. یک میدان جریان ایده‌آل دارای ویژگی‌های اساسی زیر می‌باشد.

(۱) انتقال جرم مناسب واکنشگرها به لایه کاتالیست که اولاً واکنشگرها به میزان مورد نیاز در لایه کاتالیست فراهم شوند و ثانیاً گازها به طور یکنواخت در لایه کاتالیست در دسترس باشند.

(۲) خروج محصولات از کانال و هدایت آنها به خارج از پیل سوختی

(۳) مبادله‌ی الکترونی مناسب با لایه‌های کاتالیست

(۴) افت فشار حداقل که در اثر وجود اختلاف فشار در ورودی و خروجی پیل آب جمع شده در کانال کاتد به بیرون رانده می‌شود.

لایه پخش گاز و صفحات دو قطبی باعث افزایش عملکرد پیل سوختی می‌شود. یوان و همکاران [۱۸] اثرات انتقال جرم در جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته و همچنین انتقال حرارت در شرایط مرزی حرارتی در داخل کانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای با سطح مقطع‌های مختلف را بررسی کردند. بونمارک و همکاران [۱۹] نشان دادند که طراحی سطح مقطع کانال به تنهایی می‌تواند منجر به بهبود عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری شود. آنها همچنین دریافته‌اند که از نظر عملکرد، پیل سوختی با کانال آندی همراه با شیب نزولی پیل تحت شرایط رطوبت بالا، بسیار بهبود یافته است. آنها همچنین دریافته‌اند که توان خروجی در مقایسه با یک پیل بدون کانال اصلاح شده و تحت شرایط رطوبت کمتر، افزایش یافته است. کو و چن [۲۰] اثر نیروهای شناوری در یک کانال جریان موجی شکل روی سرعت، دما و توزیع غلظت گاز در داخل کانال و بر روی بازده واکنش الکتروشیمیایی و عملکرد الکتریکی پیل سوختی غشا پلیمری را بررسی کردند. به طور کلی، نتایج آنها نشان می‌دهد که کانال جریان موجی شکل، چگالی توان حداکثر را در حدود ۴۰٪ بیش از یک کانال جریان گاز معمولی بهبود می‌بخشد.

اثر کانال‌هایی با سطح مقطع غیر یکنواخت بسیار کم مورد مطالعه قرار گرفته است. کانال‌هایی با سطح مقطع مخروطی باعث افزایش غلظت اکسیژن در لایه کاتالیست کاتد می‌شوند؛ ولی با اثر نامطلوب افزایش افت فشار در طول کانال همراه می‌باشد. اثر زاویه شیب کانال عمدتاً در ولتاژ عملکردی پایین و چگالی جریان بالا قابل مشاهده می‌باشد؛ زیرا در این ناحیه مصرف واکنش‌دهنده‌ها بالاتر است. باوجود پیشرفت‌هایی که در جریان و ولتاژ در زوایای بالا اتفاق می‌افتد، افت فشار بالا یک پارامتر محدودکننده به شمار می‌رود. به همین دلیل به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد پیل یک نقطه تعادلی باید معین شود [۲۱-۲۳]. در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی به‌منظور بررسی اثر کانال جریان با سطح مقطعی غیریکنواخت بر روی انتقال جرم در داخل پیل سوختی غشا پلیمری صورت گرفته است. بررسی تأثیر شیب‌های مختلف کانال جریان بر انتقال گازها و عملکرد پیل و مقایسه عملکرد پیل با شیب‌های مختلف کانال و پیل با کانال موازی ساده، از دیگر اهداف این تحقیق است که تاکنون به آن پرداخته نشده است. طرح ارائه‌شده باعث بهبود انتقال جرم در داخل پیل سوختی شده و بازده واکنش الکتروشیمیایی واکنش‌دهنده‌ها و کنترل نرخ توزیع محصولات واکنش را به‌خصوص در ولتاژهای پایین بهبود می‌بخشد. با مدل‌سازی سه بعدی همه نواحی پیل (از جمله لایه کاتالیست) بسیاری از اثرات سه بعدی که در مدل یک یا دو بعدی لحاظ نمی‌شود، ارزیابی می‌شوند؛ زیرا در مدل‌های یک و دو بعدی تأثیر دیواره‌های جانبی و توزیع غیریکنواخت اضافه ولتاژ که به وجود می‌آید، نادیده گرفته می‌شود. هدف اصلی از این مطالعه، تعیین وابستگی مصرف واکنش‌دهنده‌ها و تولید انرژی الکتریکی به شیب کانال جریان گاز کاتد می‌باشد. انتظار می‌رود که نتایج، اطلاعات دقیقی در مورد پدیده‌های انتقال در داخل پیل سوختی غشا پلیمری ارائه کنند و درکی بهتر از توزیع واکنش‌دهنده‌ها در داخل پیل سوختی ارائه نماید.

در سال‌های گذشته در زمینه طراحی و انتخاب کانال‌های جریان پیل سوختی غشا پلیمری کوشش‌های زیادی انجام شده است. ساختارهای مختلفی برای کانال‌های جریان از قبیل کانال‌های موازی، مارپیچی تک، مارپیچی چندتایی، کانال‌های به هم پیوسته، کانال‌های مسدود شده، کانال‌های پینی و کانال‌های با شکل‌های خاص برای پیل‌های سوختی توسعه و استفاده گردیده است. هر کدام از طرح‌های مختلف کانال‌ها، مشخصات و پی‌آمدهایی دارند. میزان و توزیع غلظت واکنشگرها و به تبع آن نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی در سطح کاتالیست و همچنین توزیع دما داخل الکترودها وابسته به نوع کانال‌ها می‌باشد. از این‌رو طراحی کانال‌ها در پیل سوختی غشا پلیمری از اهمیت زیادی برخوردار است و طراحی که ویژگی‌های آن به چهار ویژگی فوق نزدیک باشد ما را به یک پیل با عملکرد مناسب رهنمون می‌سازد. استفاده از کدهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی نیز اجازه تحقیقات روی تأثیر کانال‌های جریان به شکل غیرمرسوم بدون نیاز به ساخت آزمایشگاهی یک مدل فیزیکی و با حذف هزینه‌های تولید و ماشین‌کاری را می‌دهد.

تعدادی از مدل‌های ریاضی، مجموعه‌ای از اطلاعات دقیق درباره سازوکارهای مختلف انتقال که در داخل پیل با طرح‌های مختلف کانال-های جریان، اتفاق می‌افتد می‌دهد را توسعه داده‌اند [۹-۱۲]. اگر چه، مدل‌های ریاضی پیل سوختی به‌صورت مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل غیرخطی و بسیار پیچیده و همچنین معادلات جبری است؛ یکی از چالش‌ها در مدل‌سازی پیل سوختی، استفاده از روش‌های مورد اطمینان گسسته سازی عددی برای حل می‌باشد.

باواریا و همکاران [۱۳] معادلات حاکم بر پیل را گزارش کرده‌اند و یک مدل عددی از پیل سوختی ارائه نمودند. کومار و ردی [۱۴] مقاطع نیم‌دایره، مثلث و مستطیلی را از نظر تئوری بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که مقطع نیم‌دایره بیشترین افت فشار را دارد و پس از آن به ترتیب مقاطع مثلثی و مستطیلی بیشترین افت را دارند. همچنین درصد مصرف هیدروژن در سه سطح مقطع مقایسه شده است که درصد مصرف هیدروژن در سطح مقطع نیم دایره‌ای بیشینه و پس از آن مقاطع مثلثی و مستطیلی بیشترین مصرف هیدروژن را دارند. کیو و همکاران [۱۵] یک مطالعه مقایسه‌ای بین یک کانال جریان گاز مستقیم معمولی و یک میدان با کانال جریان گاز موجی شکل انجام دادند نتایج آنها نشان می‌داد که اثرات جابه‌جایی در کانال موجی شکل در مقایسه با یک کانال جریان معمولی مستقیم گاز کانال موجی شکل عملکرد بهتری در انتقال جرم و جابه‌جایی اجباری واکنش‌دهنده‌ها، سرعت جریان گاز بالاتر و توزیع یکنواخت تر دما را فراهم می‌کند.

روشندل و همکاران [۱۶] مطالعه مقایسه‌ای روی طرح یک صفحه دو قطبی با الهام از الگوهای زیستی موجود با جریان سیال موازی - مارپیچ انجام داده‌اند. نتایج نشان داده که در این طرح جدید نرخ پروفیل فشار سوخت در سطح کاتالیست یکنواخت‌تر است و چگالی توان به‌دست آمده از کانال‌های مارپیچ و موازی جریان بالاتر بوده است.

خزاعی و همکاران [۱۷] عملکرد پیل سوختی با سطح مقطع حلقوی را بررسی کردند نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش سطح تماس بین

توصیف مدل پیل سوختی

شکل ۱ شماتیک دو بعدی از یک تک سل پیل سوختی غشا پلیمری با کانال شیبدار کاتد را نشان می‌دهد. پیل شامل کانال جریان آند، لایه پخش گاز آند، لایه کاتالیست آند، غشا، لایه کاتالیست کاتد، لایه پخش گاز کاتد و کانال جریان کاتد می‌باشد. برای وضوح نمایش تصویر کانال کاتد بدون جمع کننده جریان آمده است. هوای مرطوب وارد کانال کاتد و گاز هیدروژن وارد کانال آند می‌شود. به علت پخش بالای هیدروژن نیاز به شیبدار کردن کانال‌های سمت آند نیست. پخش هیدروژن از میان لایه پخش گاز آند به طرف لایه کاتالیست انجام می‌شود. در لایه کاتالیست آند، مولکول‌های هیدروژن به دو یون هیدروژن و دو الکترون تبدیل می‌شوند. پروتون‌ها از میان غشاء به طرف لایه کاتالیست کاتد حرکت کرده و الکترون‌ها نیز از طریق مدار خارجی به سمت کاتد منتقل می‌شوند و یک جریان الکتریکی خارجی به وجود می‌آید که باعث تولید کار الکتریکی می‌شود.



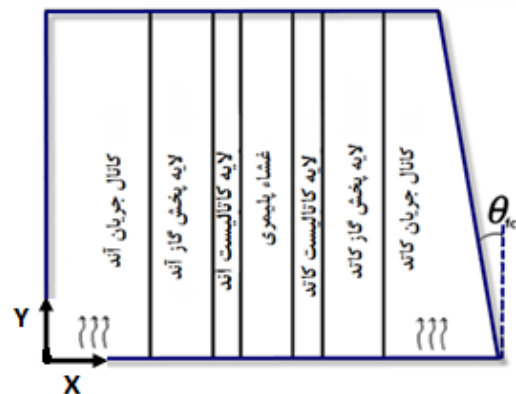
در طرف کاتد، اکسیژن با عبور از کانال مخروطی، از میان لایه پخش گاز کاتد به طرف سطح کاتالیست منتقل شده و با پروتون‌ها و الکترون‌ها واکنش داده و آب تشکیل می‌شود.



واکنش (۱) کمی گرماگیر و واکنش (۲) به شدت گرمازا است و نهایتاً در پیل سوختی گرما تولید می‌شود. از مجموع دو واکنش بالا در یک پیل سوختی غشا پلیمری می‌توان نوشت:



جریان الکتریکی تولیدی در پیل وابسته به ابعاد فیزیکی پیل می‌باشد. این جریان بر مبنای هندسه پیل و به عبارت دیگر دانسیته جریان بیان می‌شود [۳].



شکل ۱. شماتیک از یک پیل سوختی غشا پلیمری با کانال شیبدار کاتد

معادلات حاکم

در توسعه مدل پیل سوختی، به منظور ساده کردن روند حل معادلات حاکم، فرضیاتی در این مدل اعمال می‌گردد.

- (۱) مخلوط‌های گاز ایده‌آل هستند.
 - (۲) لایه پخش گاز، کاتالیست و غشا همسانگرد و همگن هستند.
 - (۳) جریان سیال آرام و غیرقابل تراکم است.
 - (۴) افت‌های ناشی از مقاومت تماسی در الکترودها و لایه‌های کاتالیست قابل صرف نظر است.
 - (۵) فرض تک فاز برای انتقال آب در نظر گرفته شده است.
- فرض ۴ باعث صرف نظر از گرمای اهمی ایجاد شده در جمع کننده جریان، لایه پخش گاز و لایه‌های کاتالیست به علت هدایت الکتریکی بالای آن است. فرض ۵ باعث می‌شود که آب در صورت وجود در فاز گاز، فوق بخار باشد. گرمای آزاد و جذب شده ناشی از تغییر فاز آب نیز شامل فرض ۵ می‌شود. با این فرضیات مدل شامل معادلات بقای جرم، مومنتم، گونه‌های شیمیایی، بار الکتریکی و انرژی است. تمامی معادلات حاکم به طور همزمان در کل ۸ ناحیه پیل (جمع کننده‌های جریان، کانال‌ها، لایه‌های پخش گاز، لایه‌های کاتالیست و غشا) با در نظر گرفتن یک مدل تک ناحیه‌ای و به روش حجم کنترل محدود حل شده است. مزیت مدل تک ناحیه‌ای عدم نیاز به مشخص کردن شرایط مرزی در فصل مشترک بین نواحی مختلف پیل می‌باشد و شرایط مرزی فقط در مرزهای بیرونی مدل مورد نیاز است. عدم اعمال این شرایط مرزی به دقت مسئله افزوده و حل معادلات را آسان می‌کند؛ هر چند که زمان محاسبات رایانه‌ای طولانی می‌شود. در این روش توزیع غیر پیوسته از حل عددی در سیستم وجود دارد. به عنوان نمونه کسر جرمی (کسر مولی) هیدروژن تنها در ۳ ناحیه لایه کاتالیست آند، لایه پخش گاز آند و کانال آند وجود دارد. معادلات حاکم در جدول ۱ همراه به ترم‌های چشمه حجمی مشخص برای نواحی مختلف پیل سوختی غشا پلیمری خلاصه شده است.

جدول ۱. معادلات اساسی جریان سیال و معادلات الکتروشیمیایی به همراه عبارات‌های چشمه و چاه

| معادله | فرم ریاضی معادله | ترم‌های چشمه و یا چاه |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (۴) جرم | $\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$ | 0 |
| (۵) مومنتوم | $\frac{1}{\varepsilon} \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + S_u$ | در لایه‌های پخش گاز و کاتالیست: $S_u = \frac{\mu}{k} \vec{u}$ |
| (۶) گونه‌های جرمی | $\nabla \cdot (\vec{u} C_k) = \nabla \cdot (D_k^{eff} \nabla C_k) + S_k$ | واکنشگرها در لایه‌های کاتالیست: $S_k = -\frac{s_k j}{nF}$ |
| (۷) پتانسیل الکتریکی | $\nabla \cdot (\kappa^{eff} \nabla \phi_e) + S_\phi = 0$ | در لایه‌های کاتالیست: $S_\phi = j$ |
| (۸) انرژی | $\nabla \cdot (\rho C_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) + S_T$ | در لایه‌های کاتالیست: $S_T = j(\eta + T \frac{dU_0}{dT}) + \frac{I^2}{\kappa^{eff}}$ در غشا: $S_T = \frac{I^2}{\kappa^{eff}}$ |
| (۹) واکنش الکتروشیمیایی | $\sum_k s_k M_k^z = ne^-$ | |

$$ai_{0,c}^{ref}(T) = ai_{0,c}^{ref}(353k) \times \exp\left[-16456\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{353.15}\right)\right] \quad (۱۵)$$

ترم‌های چشمه در معادلات گونه‌ها بیانگر تولید و یا مصرف گونه‌های k ام با واکنش‌های الکتروشیمیایی و درگ الکترو - اسمزیک آب از آند به کاتد است. ضریب پخش جرمی جز k ام یعنی D_k در کانال‌های گاز آند و کاتد بر اساس تابعی از دما و فشار محاسبه شده است. برای نواحی متخلخل پیل سوختی غشا پلیمری مانند لایه‌های پخش گاز و لایه کاتالیست، عبارت پخش‌پذیری موثر اجزا D_k^{eff} با استفاده از رابطه اصلاحی بریگمن اصلاح می‌شود [۲۵].

$$D_k = D_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \left(\frac{P_0}{P}\right) \quad (۱۶) \text{ در کانال‌های گاز}$$

$$D_k^{eff} = \varepsilon_i^{1.5} \cdot D_k \quad (۱۷) \text{ در نواحی متخلخل}$$

سه ترم چشمه حرارتی در معادله انرژی قابل نیز توجه است. آنها نشان‌دهنده گرمای غیر قابل برگشت حاصل از واکنش الکتروشیمیایی، گرمای آنتروپی برگشت‌پذیر و حرارت ناشی از مقاومت اهمی می‌باشند. علاوه بر این، ظرفیت حرارتی موثر در مواد متخلخل متشکل از فاز جامد و مایع با رابطه زیر قابل بیان است.

$$\rho C_p = \varepsilon(\rho C_p)_f + (1 - \varepsilon)(\rho C_p)_s \quad (۱۸)$$

در رابطه بالا، ظرفیت‌های گرمایی ρC_p با زیرنویس f و s به ترتیب مربوط به سیال و جامد است. خواص انتقالی از الکتروولیت توسط اسپرینگر و همکاران داده شده است [۲۱]. برای غشا رسانایی پروتونی، κ_{mem} و ضریب درگ الکترو - اسمزیک آب n_d ، تابعی از رطوبت نسبی غشا بوده که خود تابع فعالیت آب است.

$$\kappa_{mem} = (0.5139\lambda - 0.326) \exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (۱۹)$$

در معادله ۹، M_k فرمول شیمیایی جزء k ام، s_k ضریب استوکیومتری و n تعداد الکترون‌های منتقل شده می‌باشد.

در نواحی متخلخل، ترم‌های چشمه در معادلات مومنتوم برای بازیابی معادله دارسی در شرایط حدی که نفوذپذیری کوچک و سرعت پایین است در نظر گرفته شده است. ترم چشمه در معادله بار الکتریکی برای توصیف جریان الکتریکی عبوری بین فاز جامد و فاز الکتروولیت در هر یک از لایه‌های کاتالیست آند و کاتد به کار می‌رود.

$$j_a = aj_{0,a}^{ref} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}}\right)^{1/2} \left(\frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT}\right) \cdot F\eta \quad (۱۰) \text{ آند}$$

$$j_c = -aj_{0,c}^{ref} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,ref}}\right)^{1/2} \cdot \exp\left(\frac{-\alpha_c}{RT}\right) \cdot F\eta \quad (۱۱) \text{ کاتد}$$

واکنش‌های اکسایش هیدروژن و کاهش اکسیژن با معادله کلی باتلر - ولمر ساده‌سازی شده است. مقدار $(\alpha_a + \alpha_c)$ در واکنش اکسایش هیدروژن برابر ۲ بوده؛ درحالی‌که $\alpha_c = 1$ بوده در واکنش کاهش اکسیژن وابسته به شیب معادله تافل است. با فرض این که ولتاژ مدار باز مرجع پتانسیل آند صفر فرض شود و در سمت کاتد تابعی از دما باشد، عبارت اضافه ولتاژ برای طرف آند و کاتد را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود.

$$U_0 = \phi_s - \phi_e - U_0 \quad (۱۲)$$

$$U_0 = 0 \quad (۱۳) \text{ آند}$$

$$U_0 = 1.23 - 9.0 \times 10^{-4} (T - 298.15) \quad (۱۴) \text{ کاتد}$$

پتانسیل تعادلی برای پیل سوختی غشا پلیمری از اطلاعات ترمودینامیکی آنتالپی واکنش و تغییرات آنتروپی بر اساس داده‌های تجربی داده شده توسط پارساتی و همکاران محاسبه می‌شود [۲۴].

گاز آند و کاتد به کار می‌رود. در ورودی آند و کاتد، غلظت گونه‌های ورودی، $C_{k,in}$ ، با فشار ورودی و شرایط رطوبت تعیین می‌شود. سرعت‌های ورودی را می‌توان با نسبت جریان استوکیومتری مربوطه ξ_a و ξ_c محاسبه نمود که به‌عنوان نسبت مقدار واکنش‌دهنده ورودی به مقدار واکنش‌دهنده مورد نیاز واکنش الکتروشیمیایی برای تولید مشخص چگالی جریان مرجع، I_{ref} تعریف نمود.

$$V_{a,in} = \xi_a * \frac{I_{ref}}{2F * C_{H_2,in}} * \frac{A_{react}}{A_{a,in}} \quad (30)$$

$$V_{c,in} = \xi_c * \frac{I_{ref}}{4F * C_{O_2,in}} * \frac{A_{react}}{A_{c,in}}$$

شرایط سرعت و گونه‌های خروجی، کاملاً توسعه یافته است. بدین معنی که گرادیان هر یک از متغیرها صفر است. برای شرط مرزی حرارتی ورودی‌های گاز آند و کاتد به‌عنوان سطوح جریان آند و کاتد، درجه حرارت ثابت به کار برده می‌شود.

روش حل عددی

با در نظر گرفتن یک مدل سه بعدی، چون هندسه کانال‌ها و دیگر نواحی پیل پیچیدگی ندارند؛ المان‌های شش گوش برای مش بندی استفاده می‌شود. برای عدم وابستگی جواب‌ها تعداد شبکه، ۱۱۹۶۸۰ انتخاب شده است. در نواحی ورودی و خروجی لایه پخش گاز، لایه کاتالیست و ابتدا و انتهای کانال، شبکه ریزتر شده است. این شبکه بندی در شکل ۲ نشان داده شده است. یک روند تکراری برای حل دستگاه معادلات همبسته در کل دامنه با استفاده از الگوریتم سیمپل، برای حل همبسته شده فشار - سرعت و روش مرتبه دوم پیشرو به عنوان تابع تقریبی به کار گرفته می‌شود. معادلات حاکم که در قسمت قبل اشاره شد به صورت عددی با استفاده از نرم افزار تجاری فلوینت حل شده است. این نرم افزار با استفاده از روش حل عددی حجم محدود مدل ریاضی را حل می‌نماید.

برای سرعت بخشیدن به همگرایی، یک روش جبری چند شبکه استفاده می‌شود. سپس راه حل در بیش از یک سطح شبکه برای بین بردن خطاهای فرکانسی بالا و پایین محاسبه می‌شود. برای تدوین روش چند شبکه، چرخه F با روش تثبیت شیب دو مزدوج استفاده شده است. حداکثر تعداد چرخه‌ها ۶۰ تعیین می‌شود. فاکتورهای مناسب زیر تخفیف برای هر متغیر نیز به کار رفته است.

$$n_d = \frac{2.5\lambda}{22} \quad (20)$$

در دو رابطه اخیر، فعالیت آب، a و رطوبت نسبی غشا، λ ، به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$a = \frac{C_W^g RT}{P^{sat}} \quad (21)$$

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3 & 0 < a \leq 1 \\ 14 + 1.4(a-1) & 1 < a \leq 3 \end{cases} \quad (22)$$

نفوذپذیری آب در غشا بر اساس رابطه تجربی (۲۳) توسط موتاپالی و همکاران به دست آمده است [۲۶].

$$D_{w,mem} = \begin{cases} 3.1 * 10^{-7} \lambda (e^{0.28\lambda} - 1) e^{(-2346/T)} & \text{for } 0 \leq \lambda \leq 3 \\ 4.17 * 10^{-8} \lambda (1 + 161e^{-\lambda}) * e^{(-2346/T)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

غلظت معادل آب در غشا به شکل رابطه (۲۴) تعریف می‌شود.

$$C_{w,mem} = \frac{\rho_{dry,mem} * \lambda}{EW} \quad (24)$$

هدایت پروتونی و نفوذپذیری آب در غشا به صورت زیر است.

$$K_{mem}^{eff} = \frac{1}{2} * k_{mem} = \frac{1}{2} * (0.5139\lambda - 0.326) * \exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (25)$$

$$D_{w,mvm}^{eff} = \frac{1}{2} D_{w,mem} \quad (26)$$

هدایت موثر پروتونی آند و کاتد لایه‌های کاتالیست غشا نافون از طریق رابطه بریگمن به دست می‌آید [۲۲].

$$k_{cat}^{eff} = \varepsilon_{mc}^{1.5} * k_{mem} \quad (27)$$

که، ε_{mc} کسر حجمی یونی در کاتالیست آند و کاتد است. هنگامی که پتانسیل الکترولیت فاز، ϕ_e و هدایت پروتونی غشا k_{mem}^{eff} ، به دست آمده است، چگالی جریان موضعی را می‌توان محاسبه کرد.

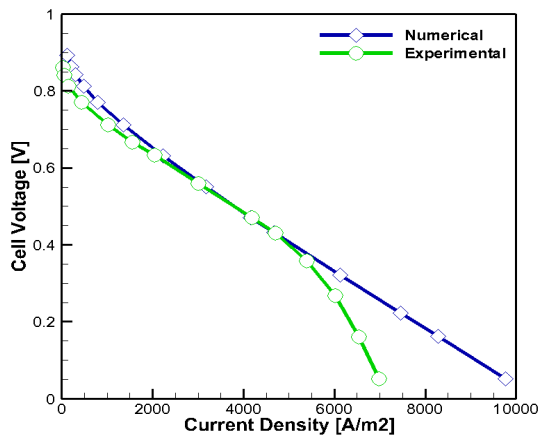
$$I = -k_{mem}^{eff} \nabla \phi_e \quad (28)$$

چگالی جریان متوسط را می‌توان با در نظر گرفتن سطح متوسط چگالی جریان محلی روی کل غشا به دست آورد.

$$I_{avg} = \frac{1}{A_{mem}} \int IdA \quad (29)$$

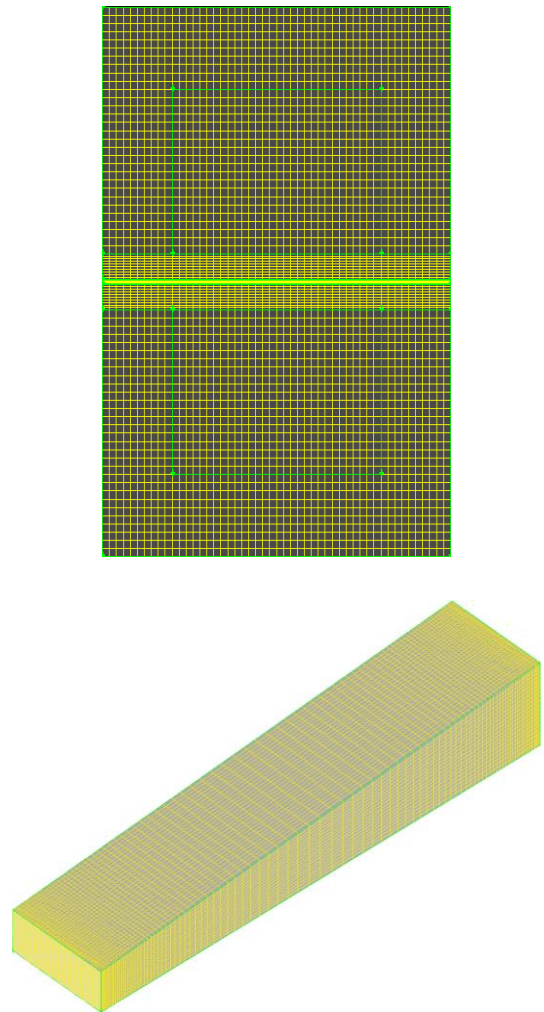
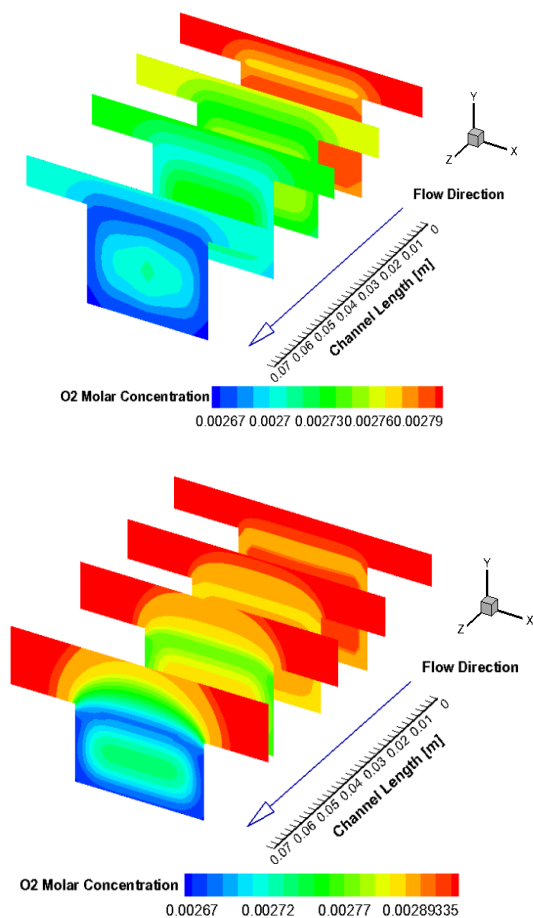
شرایط مرزی

معادلات ۴ تا ۹ در جدول ۱ به صورت یک مجموعه کامل از معادلات حاکم برای مشخص کردن مجهولات شامل: مؤلفه‌های سرعت، فشار، دما، غلظت‌های هیدروژن و اکسیژن و آب و پتانسیل الکتروود را تشکیل می‌دهند. با استفاده از روش تک دامنه‌ای، شرایط مرزی فقط در سطوح خارجی دامنه محاسباتی مورد نیاز است. شرط شار صفر برای سطوح خارجی، به جز برای ورودی‌ها و خروجی‌های کانال‌های



شکل ۳. مقایسه منحنی قطبش تجربی و حل عددی

در کانال شیب‌دار نسبت به کانال ساده، مصرف اکسیژن در طول کانال بالا می‌رود، همان‌طور که در شکل ۴ پروفیل‌های سه بعدی اکسیژن نشان داده شده است، اثر طراحی کانال جریان در توزیع اکسیژن نیز به وضوح قابل بررسی است. برای کانال شیب‌دار، توزیع یکنواخت‌تر واکنش‌دهنده اکسیژن در طول کانال کاتد مشاهده می‌شود. یعنی علاوه بر این که در کانال شیب‌دار غلظت اکسیژن افزایش یافته است؛ توزیع غلظت اکسیژن نیز یکنواخت‌تر شده است. توزیع یکنواخت‌تر اکسیژن منجر به توزیع یکنواخت‌تر واکنش‌های الکتروشیمیایی در داخل پیل می‌شود.



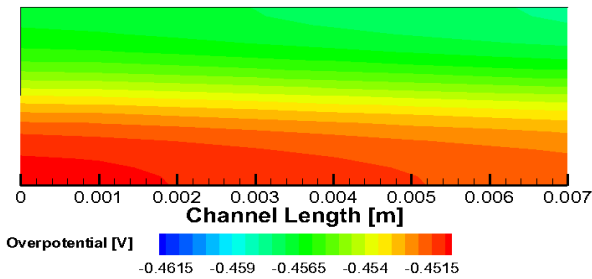
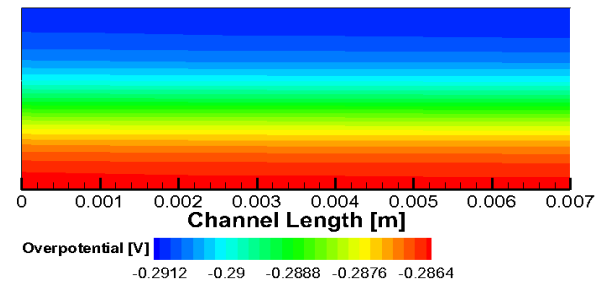
شکل ۲. الف) شبکه‌بندی دامنه حل، ب) نمایی از شبکه‌بندی کانال شیب‌دار کاتد

نتایج

به منظور صحت‌گذاری بر نتایج، منحنی قطبش پیل برای کانال ساده با نتایج تجربی تیکنالی [۲۳] که آن هم با کانال ساده می‌باشد، مقایسه شده است. منحنی‌های قطبش به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و تجربی در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج عددی با نتایج تجربی برای کانال ساده در دانسیته جریان‌های پایین و متوسط توافق بسیار خوبی دارد؛ ولی در چگالی‌های جریان بالا، مدل تک فاز حاضر با نتایج تجربی اختلاف دارد. عمده اختلاف در دانسیته جریان‌های بالا که افت‌های غلظتی در پیل اهمیت می‌یابند مربوط به میزان آب مایع بوده که باعث شنواری لایه پخش گاز شده و انتقال گازهای واکنشگر به لایه کاتالیست را مختل می‌کند. در اثر پدیده شنواری عملکرد پیل به شدت افت می‌یابد. البته به علت پیچیدگی زیاد بحث تغییر فاز آب در پیل سوختی، در این مقاله فرض شد که آب تغییر فاز نداده و به صورت بخار باقی می‌ماند.



این، افزایش زاویه کانال اضافه ولتاژ در نزدیکی خروجی را کاهش می‌دهد. توزیع اضافه ولتاژ کاملاً شبیه به توزیع اکسیژن است.



شکل ۶. الف) توزیع اضافه ولتاژ در مرکز لایه کاتالیست برای کانال بدون شیب، ب) برای کانال شیب‌دار برای ولتاژ ۰/۸۶ ولت

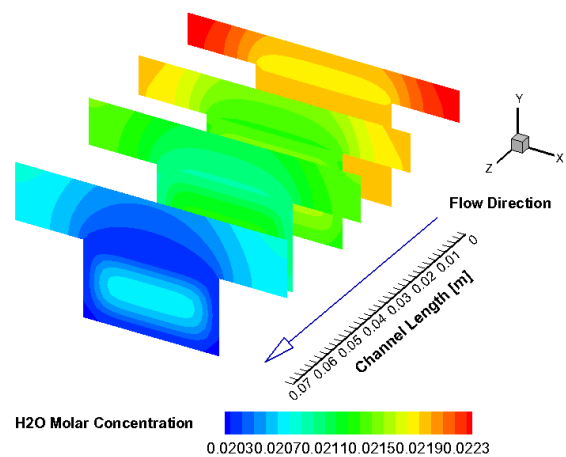
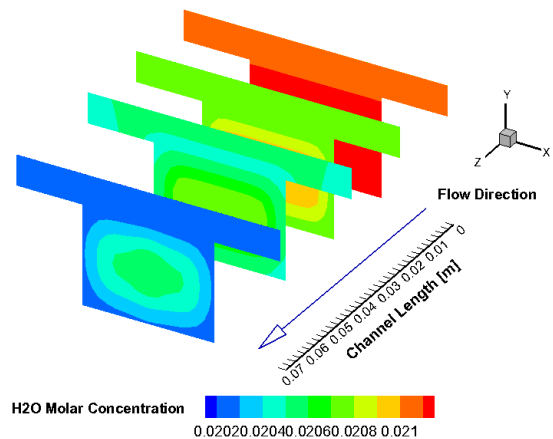
جمع‌بندی

در این مطالعه، یک مدل سه بعدی به منظور بررسی اثرات غیر یکنواختی مقطع کانال‌های جریان در عملکرد پیل سوختی مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل اجازه بررسی تأثیر غیر یکنواختی دیواره‌های جانبی در توزیع اضافه ولتاژ و پخش به لایه کاتالیست را می‌دهد. بررسی منحنی‌های سرعت مربوط به کانال‌های شیب‌دار نشان می‌دهد که کانال شیب‌دار موجب افزایش سرعت در انتهای کانال می‌شود که مطلبی خوشایند در جهت توزیع یکنواخت واکنش‌دهنده اکسیژن در طول کانال کاتد در لایه کاتالیست توزیع می‌باشد. علاوه بر افزایش غلظت آب در لایه کاتالیست، توزیع یکنواخت آب در پیل با کانال‌های شیب‌دار نسبت به پیل با کانال ساده، دستاورد استفاده از کانال شیب‌دار است.

۱- مراجع

- [1] P. Corbo, G. Migliardini, O. Veneri, Experimental analysis of a 20 kWe PEM fuel cell system in dynamic conditions representative of automotive applications, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp.2477-2491, 2008.
- [2] D. Ramirez, L.F. Beites, F. Blazquez, J.C. Ballesteros, Distributed generation system with PEM fuel cell for electrical power quality improvement, *Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 4433-4444, 2008.
- [3] Y. Wang, Fundamental models for fuel cell engineering, *Chemical Reviews*, Vol. 4, pp. 4727-4766, 2004.

شکل ۴. الف) توزیع غلظت اکسیژن در MEA در طول کانال کاتد برای کانال بدون شیب، ب) کانال شیب‌دار با زاویه ۰/۲ برای ولتاژ ۰/۸۶ ولت در کانال شیب‌دار همان طور که در شکل ۵ پروفیل‌های سه بعدی بخار آب نشان داده شده است، اثر طراحی کانال جریان در توزیع بخار آب به وضوح قابل بررسی است. به تبع توزیع یکنواخت اکسیژن در پیل سوختی غشا پلیمری با کانال شیب‌دار، برای کانال شیب‌دار، توزیع یکنواخت‌تر بخار آب در طول کانال کاتد مشاهده می‌شود. توزیع یکنواخت‌تر بخار آب منجر به افزایش هدایت یونی غشا و کارایی بهتر پیل می‌شود.



شکل ۵. الف) توزیع غلظت بخار آب در MEA در طول کانال کاتد برای کانال بدون شیب، ب) کانال شیب‌دار با زاویه ۰/۲ برای ولتاژ ۰/۸۶ ولت

در شکل ۶ با بررسی ولتاژ ۰/۸۶ ولت، توزیع اضافه ولتاژ در مرکز لایه کاتالیست کاتد برای پیل با زاویه کانال جریان و کانال بدون شیب نشان داده شده است. باید توجه شود که اضافه ولتاژ در این مکان منفی است؛ بنابراین یک مقدار کمتر اضافه ولتاژ (در مدول بزرگ‌تر)، نشان‌دهنده از دست دادن ولتاژ بیشتر و در نتیجه عملکرد ضعیف تری می‌باشد. همان طور که در شکل دیده می‌شود، ناحیه بالایی که در آن لایه نفوذ گاز در تماس با صفحات جمع‌کننده جریان است ولتاژ بیشتری را از دست می‌دهد و در مرکز، به خصوص در نزدیکی ورودی، اضافه ولتاژ کمتری مشاهده می‌شود. علاوه بر



- [16] R. Roshandel, F. Arbabi, G. Karimi Moghaddam, Simulation of an innovative flow_field design based on a bio inspired pattern for PEM_fuel cells, *Renewable Energy*, Vol. 41, pp. 86-95, 2012.
- [17] I. Khazaei, M. Ghazikhani, Performance improvement of proton exchange membrane fuel cell by using annular shaped geometry, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, pp. 2661-2668, 2011.
- [18] J. Yuan, M. Rokni, B. Sundén, Simulation of fully developed laminar heat and mass transfer in fuel cell ducts with different cross-sections, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 4047-4058, 2001.
- [19] N. Bunmarck, S. Limtrakul, M.W. Fowler, T. Vatanatham, J. Gostick, Assisted water management in a PEMFC with modified flow field and its effect on performance, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, pp.6887-6896, 2010.
- [20] J.K. Kuo, C.K. Chen, The effects of buoyancy on the performance of a PEM fuel cell with a wave-like gas flow channel design by numerical investigation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 4166-4179, 2007.
- [21] H.C. Liu, W.M. Yan, C.Y. Soong, F. Chen, H.S. Chu, Reactant gas transport and cell performance of proton exchange membrane fuel cells with tapered flow field design, *Journal of Power Sources*, Vol. 158, pp. 78-87, 2006.
- [22] Z. Zhenzhong, C. Junxun, Z. Pingji, Enhancement of proton exchange membrane fuel cell performance using a novel tapered gas channel, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 17, pp. 286-297, 2009.
- [23] S.W. Perng, H.W. Wu, Non-isothermal transport phenomenon and cell performance of a cathodic PEM fuel cell with a baffle plate in a tapered channel, *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 52-67, 2011.
- [24] W.B. Gu, C.Y. Wang, Thermal-electrochemical modeling of battery systems, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 147, pp. 2910-2922, 2000.
- [25] T.E. Springer, T.A. Zawodinski, S. Gottesfeld, Polymer electrolyte fuel cell model, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 136, pp. 2334-2341, 1991.
- [25] R.E. Meredith, C.W. Tobias, *Conduction in heterogeneous systems* advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering, New York, Interscience Publishers, 1962.
- [26] E.A. Ticianelli, C.R. Derouin, A. Redondo and S. Srinivasan, Methods to Advance Technology of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 135, pp. 2209-2214, 1988.
- [4] W. Yuan, Y. Tang, M. Pan, Z. Li, B. Tang, Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance, *Journal of Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 656-666, 2010.
- [5] H.Y. Park, J.W. Hwang, K.T. Park, S. Kim, Y.U. Jeong, H.W. Jung, S.H. Kim, Effect of process conditions on dynamics and performance of PEMFC: comparison with experiments, *Thin Solid Films*, Vol. 518, pp.6505-6509, 2010.
- [6] M.G. Santarelli, M.F. Torchio, Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC, *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 40-51, 2007.
- [7] C.H. Cheng, H.H. Lin, G.J. Lai, Design for geometric parameters of PEM fuel cell by integrating computational fluid dynamics code with optimization method, *Journal of Power Sources*, Vol. 165, pp. 803-813, 2007.
- [8] A. Su, Y.M. Ferng, J.C. Shih, CFD investigating the effects of different operating conditions on the performance and the characteristics of a high-temperature PEMFC, *Energy*, Vol. 35, pp. 16-27, 2010.
- [9] D.H. Scharwz, S.B. Beale, Calculations of transport phenomena and reaction distribution in a polymer electrolyte membrane fuel cell, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 4047-4081, 2009.
- [10] J. Hwang, P.Y. Chen, Heat/mass transfer in porous electrode, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 2327-2351, 2006.
- [11] Y. Wang, S. Cho, R. Thiedmann, V. Schmidt, W. Lehnert, X. Feng, Stochastic modeling and direct simulation of the diffusion media for polymer electrolyte fuel cells, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1128-1138, 2010.
- [12] I.B. Sprague, P. Dutta, Modeling of diffuse charge in a micro fluidic based laminar flow fuel cell, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 59, pp. 1-27, 2011.
- [13] M. Bavarian, M. Soroush, I.G. Kevrekidis, J.B. Benzinger, Mathematical modelling steady-state and dynamic behavior, and control of fuel cells: a review, *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 49, pp. 7922-7950, 2011.
- [14] A. Kumar, G. Reddy, Effect of gas flow-field design in the bipolar/end plates on the steady and transient state performance of polymer electrolyte membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 155, pp. 264-271, 2006.
- [15] J. Kuo, T. Yen, K. Chen, Threedimensional numerical analysis of PEM fuel cells with straight and wave-like gas flow fields channels, *Journal of Power Sources*, Vol. 177, pp. 96-103, 2008.



هفتمین کنفرانس سالانه انرژی پاک



7th Annual Clean Energy Conference (ACEC2021)

۳-۴ آذرماه ۱۴۰۰، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

ACEC2021-24753

Technical and Economic Assessment of the Implementation of Energy Management strategies for a substation

Mahdi Mozaffari legha^{1*}, Mohammad Mozaffari Legha², Sanaz Rashidifard³

1 Department of Electrical Engineering, Kahnooj Branch, Islamic Azad University, Kahnooj, Iran

2 Department of Electrical Engineering, Kahnooj Branch, Islamic Azad University, Kahnooj, Iran

3 Department of Computer Engineering, Kahnooj Branch, Islamic Azad University, Kahnooj, Iran

*Corresponding Author:

Email: mozaffarilegha.m@kahnoojiau.ac.ir

ABSTRACT

Nowadays, the request for electricity consumption is increasing sharply due to the expansion of various technologies and population growth. The energy management system is responsible for managing and prioritizing loads and generators optimally to maintain a stable collection system in the event of network disruptions or potential threats to the energy system. In this paper, a dual-purpose energy management system for managing and reducing the peak load consumption of the complex as well as optimizing energy production for the next day operation in a substation. The operation strategy of this system is focused on production scheduling and consumer management. The proposed model specifies the regulatory power for energy-dispersive units and the amount of power exchange between producers and consumers on an hourly basis for the day ahead. The components used in the studied system include solar panels, wind turbines, and loads with different prioritization. In the following, the results of the simulation of the proposed model are analyzed and the result of the work is presented.

Keywords: Microgrid, Energy Management, Photovoltaic System, Wind Turbine, Uncertainty

1. INTRODUCTION

Pollution from fossil resources and their scarcity has led to special attention in recent years to the use of renewable resources. The use of renewable energy sources as sources to provide electrical power in power grids has long been the focus of human attention. Micro-grids are a set of loads, distributed generation sources, and storage equipment that act as a controllable load or generator and can provide power and heat to a local area [1].

Electricity is produced and distributed at exorbitant costs, and its loss causes great damage to the country's economy. Meanwhile, regional electricity

companies should be at the forefront of reducing consumption and optimizing it. The above distribution and transmission substations are one of the most important places of energy waste in the structure of regional electricity companies, which often consume significant amounts of energy due to the wrong culture in lighting, cooling, and heating monthly.

For this purpose, it is necessary to first have an estimate of the different costs available in the posts and the share of each of them so that the potential for reducing domestic consumption during the year can be calculated based on standard consumption values. Sharing the monthly energy consumption of substations between different uses is important in several ways. First, the geographical location and climatic conditions of different substations are different, which has a direct impact on the amount of heating and cooling consumption of the substation. Second, the available information from the above distribution and transfer Substations does not create a distinction between different uses. Third, the share of different uses such as lighting, application of gene algorithm in measuring the potential of reducing internal consumption in the above distribution of cooling and heating in different months of the year is different, and therefore determining the consumption standard for different months requires determining the current consumption and standard values for the details of consumption. Various methods and solutions have been proposed to reduce the costs of wind and solar power plants. In some articles, these sources are used in hybrid and off-grid systems to provide electrical charge, and in other cases, these sources are used in the micro-grid connected to the mains to supply electrical charge or sell electricity to the upstream grid. The off-grid hybrid system includes a wind/solar/fuel cell source in which, the fuel cell with electrolyze and hydrogen tank has been studied as storage to improve the performance of wind and solar sources [2]. N.L. Diaz et al. have used the nonlinear



programming method to select the optimal location and capacity of grid-connected wind power plants to maximize energy density and minimize costs. To attract consumers' attention to smart energy consumption and the use of intelligent equipment for production and energy consumption management, there is another important parameter in addition to reducing consumption costs, which is cost risk. Cost risk is a standard deviation of the estimated cost in the presence of uncertainty, such as uncertainty in forecasting energy production and consumption. Studies so far show that the lower the cost and risk of forecasting costs causes the faster the spread of smart micro-grids among consumers [4]. A micro-grid has been discussed in energy management methods for commercial consumers. Energy management is discussed methods for commercial consumers of a micro-grid in [5]. This reference proposes an energy management system for a micro-grid that includes solar cells, energy storage units, and gas micro-turbines. This system consists of two parts, the first part based on central energy management and the second one based on local energy management on the consumer side. Local and central management systems exchange information through a communication network. K. Shimomachi et al., most use of Renewable Energy Sources (RES) has been provided by grid-connected vehicles to reduce pollution and the cost of electricity generation networks and the electric transportation industry. They prepare a successful program to control vehicles by using the Particle swarm optimization method (PSO). Also, a fuzzy PSO self-adaptation algorithm is presented for load distribution in a specific micro-grid considering economic and environmental issues [7]. The results indicate that with the high participation of renewable resources, the reduction of pollution and micro-grid costs is serious and the energy exchange between the micro-grid and network connected to it has many benefits. B. Lin et al. [8] provide a multi-agent system for intelligent demand-side energy management for the micro-grid, which includes predictive algorithms to improve system management. The simulation results show that the intelligent demand-side management system has met all design objectives and also led to an effective operation in boundary conditions in the micro-grid. The simulation results show that the intelligent demand-side management system has met all design objectives and has also led to an effective operation in boundary conditions in the micro-grid. C. Dou et al. presented, the applications of PSO to find real-time energy management solutions for hybrid systems and the results show that the proposed method can combine a wide range of solutions to integrate many objectives such as cost reduction, wind turbine (WT) efficiency and reduces environmental pollution. Due to the problems of traditional networks and the tendency towards scattered products and especially towards micro-grids has increased. But the issue that is very important in this regard is the issue of energy management in the micro-grid. In the micro-grid, there are several production resources and storage resources, each of which has its own cost of power generation, pollution, and its own limitations. These resources must

be controlled in such a way as to minimize the costs of energy production as well as environmental pollution, taking into account the constraints. The study of various sources shows that the analysis of energy consumption has not been done focusing on the internal consumption of substations, but energy consumption in buildings, offices, and factories has been studied in different ways. These methods are sometimes based on measuring the amount of consumption in long periods of time in different parts of a building [10, 11] and sometimes with a combination of the above methods and intelligent methods [12, 13]. Consumption such as lighting, heating, and cooling is often analyzed in watts per square meter. This unit is used to remove the area factor from energy consumption. But this unit cannot be used for applications such as home appliances and postal equipment such as panel heaters, home batteries, and chargers, etc. Because these costs do not depend on the area of the building or other parts of the post. The expenses of each substation are divided into seven sections including yard lighting, site lighting, building lighting, heating, cooling, home appliances, and other expenses based on the information collected from the above distribution and transfer substations in Markazi, Hamedan, and Lorestan provinces. The purpose of this classification is to provide the possibility of determining the areas of reducing electricity consumption in different substations so that optimization plans can be presented with better accuracy [14]. L. Xu et al. [15] suggested a grid-connected combination including fuel cell and solar panel and battery system. This multiple photovoltaic (PV) system, Fuel Cell (FC) and battery as input sources in an integrated structure using a DC-DC amplifier converter provide three new inputs of a network. This paper attempts to provide some corrections to duty period restrictions and switch control independently. As a result, a high-level output voltage is additionally obtained to track the maximum power of the PV source, adjust the power of the FC source, and charge or discharge the battery. The input is managed to supply a residential load network with all the power of the system and in defined operating modes. A dual-purpose energy management system for managing and reducing the peak load of the complex as well as optimizing energy production for the next day operation in a substation. The operation strategy of this system is focused on production scheduling and consumer management.

2. MATHEMATICAL MODEL

2.1. OBJECTIVE FUNCTION

In the studied micro-grid, each component of the system under study is modeled separately based on the relevant features and constraints to be used to examine various concepts such as the design of control methods and implementation of the energy management system (EMS). The goal of optimal energy management is to minimize the total operating cost of the micro-grid by optimally adjusting the generation capacity of distributed generation units while meeting the various operating constraints of the system. The objective



function of this problem is expressed according to Equation (1).

$$F(x) = \sum_{t=1}^{24} \left[\sum_a P_{WT}^t B_{WT}^t + \sum_b P_{PV}^t B_{PV}^t \right] + P_{GRID}^t B_{GRID}^t \quad (1)$$

In this relation a is the number of WTs, b is the number of PVs. $P_{pv(t)}$ is the active power generation of i_{th} PV unit. $B_{pv(t)}$ is the bid of i_{th} PV unit at hour t . $P_{wt(t)}$ is the active power generation of i_{th} WT unit. $B_{wt(t)}$ is the bid of i_{th} WT unit at hour t . $P_{grid(t)}$ is the active power generation of ntwork. $B_{grid(t)}$ is the bid of ntwork at hour t .

2.2. CONSTRAINTS

The total output power of the distributed generation sources and the injected power from the network must cover the total requested load at each time interval t . Equation (2) shows this equilibrium of power:

$$\sum_{i=1}^{N_S} P_{Gi}^t + P_{Grid}^t = \sum_{D=1}^{N_D} P_{LD}^t \quad (2)$$

In this relation N_S is the number of DGs, N_D is the number of loads. In P_{Gi}^t is the active power generation of i_{th} DG unit, P_{Grid}^t is the active power of network and P_{LD}^t is the active power of loads. For sustainable operation, the actual output power of the units along with the main network is in the range shown as inequalities (3):

$$P_{Gi,min}^t \leq P_{Gi}^t \leq P_{Gi,max}^t \quad (3)$$

$$P_{Grid,min}^t \leq P_{Grid}^t \leq P_{Grid,max}^t$$

In this relation P_{Gi}^t is the active power generation of i_{th} DG unit, $P_{Gi,min}^t$ is the minimum active power generation and , $P_{Gi,max}^t$ is the maximum active power generation, P_{Grid}^t is the active power generation of network, $P_{Grid,min}^t$ is the minimum active power network and , $P_{Grid,max}^t$ is the maximum active power network.

3. RESEARCH METHOD

3.1. ENERGY OPTIMIZATION MANAGEMENT

The implementation of the PSO technique for solving the best energy optimization management briefly occurs through the following.

Step 1: Define the configuration of the proposed scheme.

Step 2: Define the system data including DG units, loads, and the control strategy.

Step 3: Define the active power of DGs and their limitations.

Step 4: Define the real power traded off with the utility.

Step 5: Define the objective function that is required to be optimized (1).

Step 6: Initialize PSO parameters such as the rate of acceleration each particle closer to the position P_{best} (C1), rate of acceleration each particle closer to the position G_{best} (C2), gravity force (G), the inertia weight (W), and the ultimate number of iterations (i).

Step 7: Generate an initial random generation.

Step 8: Evaluate the real power traded off with the utility for each search agent in the current population and check their constraints.

Step 9: Evaluate the fitness function for each search agent using (1).

Step 10: The position of particle is evaluated according to (6).

Step 11: The number of the iterations is then compared with the population size.

Step 12: Check the position achievement.

Step 13: Repeat steps 9–12 until the best solution is achieved.

Step 14: Return the optimal solution gained in the last iteration; stop.

3.2. OVERVIEW OF PSO ALGORITHM

None of the particles alone has the power to solve any problem in a particle clustering algorithm, but one can hope to solve the problem when they connect and constructively interact with each other. In fact, the ability to solve a problem for a mass of particles is a social concept that arises from the behavior of individual particles and the interaction between them. The best position found by all particles is denoted by \hat{Y} , which is selected by comparing the values of $f^{i,best}$ for all particles and among Y_i , and the value of the objective function in \hat{Y} is denoted by $f^{i,best}$. The best location detected by the n_{th} particle In this algorithm is selected as P_{best} . One of the advantages of this method is to obtain the best value for each particle in the current population. This optimal value is the best value throughout the optimization known as g_{best} . Each particle uses its speed and distance relative to p , g to try to correct and improve its location. Each particle tries to correct its position by using its speed and distance relative to P_{best}, g_{best} . This position correction process is shown in Equations (4) and (5). X and V specify respectively the position and velocity of each particle in the search space.

$$V_{i+1} = (W \times V_i) + C_1 \times \text{rand}(P_{best} - X_i) + C_2 \times \text{rand}(g_{best} - X_i) \quad (4)$$

$$X_{i+1} = X_i + V_{i+1} \quad (5)$$

Constants C_1 and C_2 show the rate of acceleration that brings each particle closer to the position P_{best} and g_{best} . The value of inertia w determines how much of the previous velocity from the previous step must be maintained. Linear decreasing inertia is used here. The above equations can be summarized as (6) for all dimensions:

$$V_i[t+1] = WV_i[t] + C_1 R_1 \otimes Y_i[t] - X_i[t] + C_2 R_2 \otimes Y^*[t] - X_i[t] \quad (6)$$

$$X_i[t+1] = X_i[t] + V_i[t+1]$$

Where R_1 and R_2 are two vectors equal in size to the search space (number of decision variables) whose components are independent random numbers with a uniform distribution in the range $[0, 1]$. The \otimes symbol also indicates the multiplication operation for the matrices.

The amount of particle velocity components in the range $[-V_{max}, V_{max}]$ is considered to limit the amount of motion of each particle. Of course, it is assumed that the width of the search space, in all dimensions, is constant and equal to s . In this case, where is $P \in [0.1, 1]$ to be usually considered $V_{max} = Ps$.

4. RESULTS and DISCUSSION

In this work, the simulation and the results of the proposed scheme were utilized to be compared with those referred in the literature based on a standard MG [4, 10, 11, 25] at low voltage level.

The computer used to simulate this proposed scheme has the specifications of a processor with speed 2.60 GHz, a memory of 8 GB ram. All the simulations were carried out on Matlab.

The studied system includes a solar panel, wind turbines, and loads with different priorities. The micro-grid diagram under study is shown in Figure 1 and the power range of each of the distributed generation elements is in Table (1). This micro-grid is also connected to the national electricity grid.

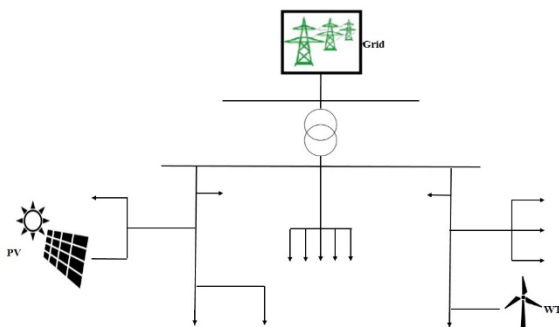


Figure 1. Overview of the micro-grid studied

Table 1. Power generation intervals in distributed micro-grid generation units understudy

| Unit | Pmin [kw] | Pmax [kw] |
|------|-----------|-----------|
| PV | 0 | 25 |
| WT | 5 | 15 |
| Grid | -30 | 30 |

The considered building is located at a latitude of 14.67 (North), longitude of 58.86 (East). It experiences a combination of tropical wet and dry climate [16]. The place is blessed with around 5.3 kWh/m² yearly average daily solar radiation and more than 6 kWh/m² maximum radiation in March, April and May. The monthly average of solar radiation and clearness index is shown in Figure (2). Also Recorded data shows that the monthly wind speed in a year is 4.141 m/s. Figure (3) illustrates the wind speed variation throughout the year.

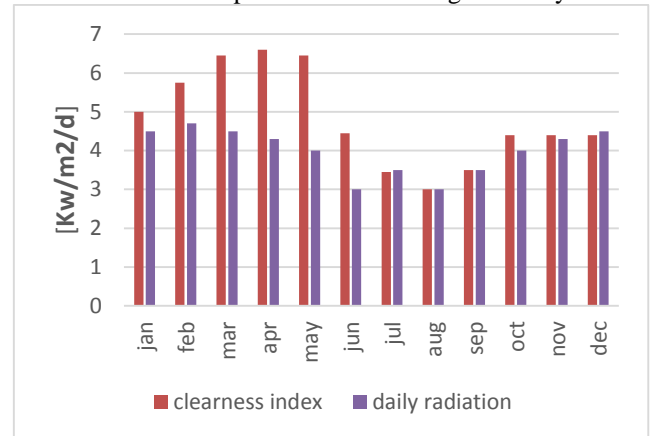


Figure 2. Profile of solar radiation and clearness index in a year

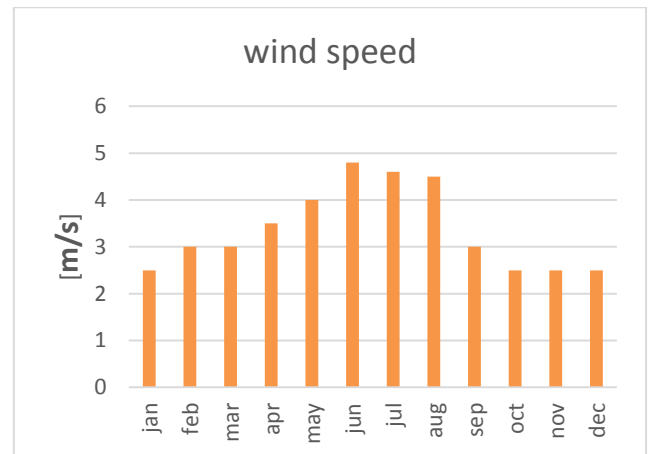


Figure 3. Monthly profile of wind resource in a year

4.1. Scenario I

Assuming that the wind turbine and the photovoltaic system produce their maximum power output at their output every hour, the upstream network produces power within the range specified in their constraints. Therefore, the optimal power distribution in the micro-grid is shown in table 2 by using the particle aggregation algorithm. This algorithm aims to optimize the problem variables (production capacities of distributed generation resources), to minimize the



objective function. All system components must do the problem constraints. Variables are divided into two types of dependent variables and independent variables. Grid power is considered a dependent variable and photovoltaic power and wind are considered independent variables. Wind and photovoltaic production sources are considered as non-dispatch production sources and their output is changeable with changing weather conditions online and is independent of load capacity or other production sources. Regarding distributed generation sources, it is assumed that all work with a single power factor so that they produce only active power. Micro-grid is power management for the next 24 hours.

Table 2. Optimal production capacities and costs in the sample micro-grid using the particle clustering algorithm

| Time | PV [kw] | WT [kw] | Grid [kw] |
|------|---------|---------|-----------|
| 1 | 0 | 0 | 30 |
| 2 | 0 | 0 | 30 |
| 3 | 0 | 0 | 30 |
| 4 | 0 | 0 | 30 |
| 5 | 0 | 0 | 30 |
| 6 | 0 | 0 | 30 |
| 7 | 0 | 0 | 30 |
| 8 | 0 | 0 | 9 |
| 9 | 3 | 1.7 | -15.7 |
| 10 | 7.5 | 3.1 | -20.6 |
| 11 | 9.2 | 8.7 | -30 |
| 12 | 3.5 | 10.4 | -30 |
| 13 | 4 | 3.9 | -21.9 |
| 14 | 9.6 | 2.3 | -30 |
| 15 | 7 | 1.7 | -15.7 |
| 16 | 0 | 1.3 | -11.3 |
| 17 | 0 | 0 | -5 |
| 18 | 0 | 0 | 22 |
| 19 | 0 | 0 | 30 |
| 20 | 0 | 0 | 21 |
| 21 | 0 | 0 | -13.3 |
| 22 | 0 | 0 | -19 |
| 23 | 0 | 0 | 30 |
| 24 | 0 | 0 | 30 |

All distributed generation sources within their production limits produce power, in other words, all the constraints of (the equations and inequalities) are solved, and the excess energy produced is exchanged (through the common base between the micro-grid and the main network) with the network.

The total cost of power generation is 155, 11333; which is in € / h. The results of table 2 show that between 1 to 8 and 23 to 24 o'clock, a large part of the load is supplied by the network, which is due to the lower cost of power generation by these units compared to other units. The market price is higher at 9 to 17 and 21 to 22 o'clock and the excess production capacity is sent from the micro-grid to the network. The total cost will be reduced (due to the high power generation tariff of these two units) by reducing the presence of wind turbines and photovoltaic power generation.

4.2. Scenario II

Assuming that there is uncertainty in the production of wind turbines and photovoltaic systems, the two-point estimation method is used to model the uncertainty of wind and solar units. It is assumed that the output power of the photovoltaic system has a

normal distribution with a standard deviation of 5%. And the output power of wind turbines is considered with Weibull distribution with a standard deviation of 5%. Therefore, using the particle aggregation algorithm, the expected optimal production capacity and the expected optimal production cost are shown in Table 3. Table 3. Optimal expected power generation and costs in the sample micro-grid using the particle clustering

| Time | PV [kw] | WT [kw] | Grid [kw] |
|------|---------|---------|-----------|
| 1 | 0 | 1.7 | 30 |
| 2 | 0 | 1.7 | 30 |
| 3 | 0 | 1.7 | 30 |
| 4 | 0 | 1.7 | 30 |
| 5 | 0 | 1.7 | 30 |
| 6 | 0 | 0.9 | 30 |
| 7 | 0 | 1.7 | 30 |
| 8 | 0.2 | 1.3 | 6.5 |
| 9 | 3.7 | 1.7 | -19.5 |
| 10 | 7.5 | 3.1 | -20 |
| 11 | 10.4 | 8.7 | -30 |
| 12 | 11.9 | 10.4 | -30 |
| 13 | 23 | 3.9 | -30 |
| 14 | 21 | 2.3 | -30 |
| 15 | 8.7 | 1.7 | -23 |
| 16 | 4.2 | 1.3 | -15 |
| 17 | 0.5 | 1.7 | -7 |
| 18 | 0 | 1.7 | 21 |
| 19 | 0 | 1.3 | 30 |
| 20 | 0 | 1.7 | 15.2 |
| 21 | 0 | 1.3 | -13 |
| 22 | 0 | 1.3 | -20 |
| 23 | 0 | 0.9 | 30 |
| 24 | 0 | 0.6 | 30 |

It can be seen to increase the expected cost that considering the uncertainty by comparing Table 2 and Table 3. These results show that the proposed method can also answer the problem of energy management and operation in conditions of uncertainty.

The obtained results from both scenarios were compared with other techniques of solving EOM problems as we mentioned before in literature [4, 10, and 11]. According to Figures 4 and 5, the proposed Particle swarm optimization (PSO) proves its efficiency in getting optimal solutions for EOM problems in the two scenarios. In the first scenario, the best obtained result in the literature was equal to 256.76 cent/h by SGSA technique as proposed in [10] and the proposed PSO gave a lower cost of 251.9951 cent/h. In similar manner, the second scenario best result in literature was 190.3628 cent/h at the time the proposed PSO gave a much lower overall cost of 101.0924.

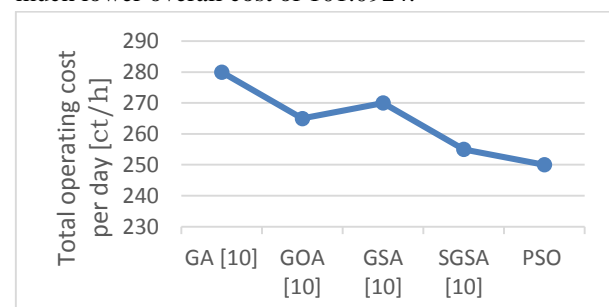


Figure 4. Comparison of the simulation results for the first scenario

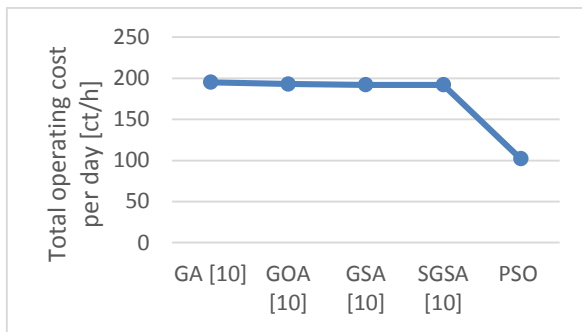


Figure 5. Comparison of the simulation results for the second scenario

4.3. Discussion

There are three main factors that could have implications of the proposed method:

1- The first factor is the ability of the Particle swarm optimization (PSO) to avoid falling in local optimum value and this can clearly appear in the results mentioned in this section as it gave in all hours (both cases) best optimized results.

2- The second factor is the high convergence rate, and this clearly appears in the quick convergence that occurs in both cases as it converges in only 300.

3- The third factor is the computational complexity, the PSO has small computational burden especially that although the application of the energy management is considered high dimensional and a complex problem, and the PSO succeeded in solving this problem.

5. conclusion

In this paper, a nature inspired technique was used to solve an EOM problem and applied on a standard MG which is the Particle swarm optimization algorithm. The MG comprises different types of DG units as well as the loads as we mentioned before in Section 4. The energy management system to manage and reduce the peak load of the complex and also optimize energy production for the next day operation in a substation.

Two scenarios were considered in this work. In the first scenario considered, all the DG units, and the utility operated within their limits except the renewable DG units which generated their maximum power. While in the second scenario, all of the DG units, and the utility operated within their limits taking into consideration their limits and the surplus of energy in both scenarios are traded off with utility. The obtained results from both scenarios were compared with other different optimization techniques available in previous research. The PSO algorithm produced lower cost in both scenarios and could efficiently find the optimal solutions for solving EOM.

REFERENCES

- [1] C. Hee-Jun, C. Jin-Young, W. Dong-Jun" Smart Load Management in Demand Response using Microgrid EMS" energy conference (ENERGYCON),20014 IEEEinternational,833-837, 10. 1109/ENERGYCON. 2014. 6850522.
- [2] G. Shehata, S. Gaber, M. Salama" Implementation of an energy management algorithm in DC MGs using multi-agent system". Int Trans Electr Energy Syst. 2018.
- [3] Diaz, N.L.; Luna, A.C.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. Centralized control architecture for coordination of distributed renewable generation and energy storage in islanded AC microgrids. IEEE Trans. Power Electron. 2017, 32, 5202–5213.
- [4] Mohammadi, S.; Mozafari, B.; Solimani, S.; Niknam, T. An Adaptive Modified Firefly Optimisation Algorithm based on Hong's Point Estimate Method to optimal operation management in a microgrid with consideration of uncertainties. Energy 2013, 51, 339–348.
- [5] M. Marzband, F. Azarinejadian, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero, "An Optimal Energy Management System for Islanded Microgrids Based on Multiperiod Artificial Bee Colony Combined With Markov Chain," 2014.
- [6] K. Shimomachi, M. Noritake, R. Hara, H. Hoshi, H. Kita, K. Hirose, M. Noritake, H. Hoshi, and K. Hirose, "Development of energy management system for DC microgrid for office building:-Day Ahead operation scheduling considering weather scenarios," in Power Systems Computation Conference (PSCC), 2014, 2014, pp. 1–6.
- [7] T. A. Tarique, M. A. Zamee, and M. I. Khan, "A new approach for pattern recognition with Neuro-Genetic system using Microbial Genetic Algorithm," in Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT), 2014 International Conference on, 2014, pp. 1–4.
- [8] B. Lin, M. Zhou, W. Du, and C. Liu, "Improved PSO algorithm for microgrid energy optimization dispatch," in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2013 IEEE PES Asia-Pacific, 2013, pp. 1–6.
- [9] C. Dou, X. Jia, Z. Bo, F. Zhao, and D. Liu, "Optimal management of MicroGrid based on a modified particle swarm optimization algorithm," in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific, 2011, pp. 1–8.
- [10] Anvari-Moghaddam, A.; Seifi, A.; Niknam, T.; Pahlavani, M.A. Multi-objective Operation Management of a Renewable Micro Grid with Back-up Micro Turbine/Fuel



- Cell/Battery Hybrid Power Source. *Energy Int. J.* 2011, 36, 6490–6507.
- [11] Niknam, T.; Golestaneh, F.; Malekpour, A. Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind/photovoltaic/fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm. *Energy* 2012, 43, 427–437.
- [12] B. Esmailnezhad and H. Shayeghi, “Simultaneous Distribution Network Reconfiguration and DG allocation for loss reduction by Invasive Weed Optimization algorithm,” 2013 Smart Grid Conf., pp. 166–172, Dec. 2013.
- [13] M. Jamil and S. Kirmani, “Optimal allocation of SPV based DG system for loss reduction and voltage improvement in radial distribution systems using approximate reasoning,” 2012 IEEE 5th India Int. Conf. Power Electron., pp. 1–5, Dec. 2012.
- [14] J. Elizondo and J. L. Kirtley, “Effect of inverter-based DG penetration and control in hybrid microgrid dynamics and stability,” 2014 Power Energy Conf. Illinois, pp. 1–6, Feb. 2014.
- [15] L. Xu, S. Member, and D. Chen, “Control and Operation of a DC Microgrid With Variable Generation and Energy Storage,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 26, no. 4, pp. 2513–2522, 2011.
- [16] Mahdi Mozaffarilegha, Sanaz Rashidifard, Mohammad Mozaffarilegha. Optimum Implementation Renewable Energy Systems in Remote Areas. in 2020, Iraqi Journal for Electrical And Electronic Engineering.
- [17] Farzin, H., et al., A market mechanism to quantify emergency energy transactions value in a multi-microgrid system. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017.
- [18] Elifuraha Reuben Mmary, Boonruang Marungs, Integration of Renewable Energy Distributed Generation and Battery Energy Storage in Radial Power Distribution System. *International Energy Journal* 19 (2019) 27 – 36.
- [19] Lu, S., et al. Control strategies for distributed energy resources to maximize the use of wind power in rural microgrids. in 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. IEEE.
- [20] Jiang, Z. Agent-based control framework for distributed energy resources microgrids. in Proceedings of the IEEE/WIC/ACM international conference on Intelligent Agent Technology. 2006. IEEE Computer Society.
- [21] Jian, Z., et al. The application of multi agent system in microgrid coordination control. in 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. 2009. IEEE.
- [22] Waleed Obaid, Abdul-Kadir Hamid, and Chaouki Ghenai, Hybrid Solar/Diesel Power System Design for Electric Boat with MPPT System. *International Energy Journal* 19 (2019) 37 – 46.
- [23] Lin, B., et al. Improved PSO algorithm for microgrid energy optimization dispatch. in 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). 2013. IEEE.
- [24] Bui, V.-H., A. Hussain, and H.-M. Kim, A multiagent-based hierarchical energy management strategy for multi-microgrids considering adjustable power and demand response. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018. 9(2): p. 1323-1333.
- [25] M. Mozaffari Legha, E. Farjah, “IoT Based Load Management of a Micro-Grid Using Arduino and HMAS,” *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2019.

ACEC2021-27730

ارزیابی اقتصادی نیروگاه خورشیدی (فتوولتائیک) با استفاده از نرم افزار رت اسکرین و سازگاری نرم افزار با تعرفه های جدید وزارت نیرو (مطالعه موردی: نیروگاه ۱۰ مگاواتی متصل به شبکه اصفهان)

محمد پرهام فر^۱، امیرمحمد عادل^۲، ملک ارسلان صدیقی^۳

۱- کارشناس ارشد انرژی های تجدیدپذیر؛ مشاور صنعت برق و انرژی، شرکت سامان انرژی اصفهان؛ en.parhamfar@gmail.com

۲- کارشناس ارشد مهندسی برق، برنامه ریزی و مدیریت سیستم های انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران؛ a.adeli@mail.sbu.ac.ir

۳- دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه امپریال کالج لندن، عضو هیئت مدیره شرکت سامان انرژی اصفهان

چکیده

استفاده از فناوری های انرژی پاک - یعنی فناوری های بهره وری انرژی و فناوری های انرژی تجدیدپذیر، طی چند دهه گذشته بسیار افزایش یافته است. این فناوری ها، راه حل های مقرون به صرفه ای برای مشکلات سیستم های تولید برق سنتی و مبتنی بر سوخت های فسیلی و مسائل مربوط به انتشار گازهای گلخانه ای، هزینه های بالای بهره برداری و آلودگی های زیست محیطی این سیستم ها هستند. از فناوری های انرژی تجدیدپذیر پرکاربرد در جهان، می توان به سیستم های فتوولتائیک اشاره کرد. یکی از پارامترهای مهم در ارتباط با این سیستم ها، دوام اقتصادی آنها است. ارزیابی دوام اقتصادی یک پروژه بالقوه فتوولتائیک، سهم بسزایی در تصمیم گیری برای سرمایه گذاری در آن پروژه دارد. نرم افزار رت اسکرین یکی از نرم افزارهای شناخته شده در زمینه انجام محاسبات اقتصادی و تهیه مطالعات امکان سنجی مقدماتی پروژه های انرژی پاک می باشد. همچنین، این نرم افزار یکی از ابزارهای پرکاربرد تحلیل اقتصادی نیروگاه های خورشیدی در ایران است. اما با توجه به آخرین تغییراتی که توسط وزارت نیرو در نرخ خرید تضمینی برق از نیروگاه های تجدیدپذیر صورت گرفته است، عملاً استفاده دقیق از این نرم افزار و تحلیل های آن برای نیروگاه های خورشیدی در ایران غیر ممکن می باشد. لذا، در این مقاله تلاش شده تا با ایجاد تغییراتی در امکانات و منوی نرم افزار رت اسکرین، موانع موجود بر سر راه استفاده از این نرم افزار برای تحلیل اقتصادی دقیق نیروگاه های خورشیدی در ایران برداشته شود. اعمال این تغییرات و تعرفه های جدید وزارت نیرو در نرم افزار، با شبیه سازی یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی خورشیدی در ایران مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۱- مقدمه

غلظت گازهای گلخانه ای^۱ با سرعت نگران کننده ای در حال افزایش است. تولید انرژی از منابع انرژی تجدیدپذیر^۲، مثل انرژی باد، فتوولتائیک خورشیدی، انرژی زیست توده، زمین گرمایی، نیروگاه برق آبی و غیره می تواند نرخ افزایش گازهای گلخانه ای را کاهش دهد. بر اساس گزارش ایرنا، ظرفیت تجمعی انرژی تجدیدپذیر در جهان ۲۴۷۰،۶۷۴ گیگاوات در سال ۲۰۱۹ می باشد [۱]. ظرفیت منابع بادی و خورشیدی روی هم ۴۸،۶۸ درصد از کل این ظرفیت تجدیدپذیر نصب شده را تشکیل می دهند. ظرفیت تجمعی فتوولتائیک خورشیدی در سال ۲۰۱۹ به حدود ۵۸۰،۱۵۹ گیگاوات رسیده که حدود ۲۲ درصد از ظرفیت نصب شده سیستم های تجدیدپذیر را به خود اختصاص داده است [۲].

به طور کلی، فناوری های انرژی پاک، شامل فناوری های بهره وری انرژی^۳ و فناوری های انرژی تجدیدپذیر^۴ می باشند. هر دوی این موارد، باعث کاهش استفاده از منابع "متعارف" انرژی^۵ (به عنوان مثال سوخت های فسیلی) می شوند اما از جهات دیگر متفاوت هستند. فناوری های انرژی تجدیدپذیر، یک منبع انرژی تجدیدپذیر را به حرارت، برودت، الکتریسیته و یا انرژی مکانیکی مفید تبدیل می کنند. منبع انرژی تجدیدپذیر منبعی است که استفاده از آن، بر قابلیت دسترسی آن در آینده تأثیری نداشته باشد. به عنوان مثال، سوزاندن هر واحد گاز طبیعی برای گرم کردن ساختمان، منجر به کاهش یک واحد گاز طبیعی برای نیازهای آینده می شود. در مقابل، استفاده از انرژی خورشیدی برای گرم کردن یک ساختمان یا تولید برق، چیزی نیست که نور خورشید را در آینده کاهش دهد. [۳]

¹ Greenhouse Gases

² Renewable Energy

³ Energy Efficiency

⁴ Renewable Energy Technologies

⁵ Conventional Energy Sources



ارزیابی و بهینه سازی کنند. این بستر نرم افزاری هوشمند، به مدیران و تصمیم گیرندگان یک پروژه این امکان را می دهد تا به سادگی عملکرد واقعی تاسیسات خود را اندازه گیری و تایید کنند و به فرصت های جدیدی برای صرفه جویی و یا تولید انرژی بیشتر دست یابند. [7]

با توجه به مصوبه جدید وزارت نیرو [8] و تعیین تعرفه های جدید برای کلیه نیروگاه های تجدیدپذیر و اعمال ضریب سه پله ای کاهش نرخ خرید در ابتدای سال های هشتم، دوازدهم و شانزدهم که برابر با 60 درصد می باشد، عملاً استفاده از این نرم افزار در ایران غیر ممکن شده است. از این رو ما قصد داریم در این مقاله، به بررسی تغییرات اعمال شده در تنظیمات و ضرایب پیش فرض نرم افزار، که کاربران ایرانی را قادر به استفاده از آن خواهد کرد بپردازیم. ضمن مکاتباتی که با مدیران ارشد موسسه رت اسکرین صورت گرفته است، مجموعه ای از راهکارهای اختصاصی برای اعمال این ضرایب مطابق با شرایط ایران در نظر گرفته شد و پیشنهاد بروزسانی این نرم افزار با توجه به شرایط متفاوت در قراردادهای خرید تضمینی برق^۲ کشورهایی مانند ایران و ایتالیا، به متخصصان موسسه رت اسکرین ارائه گردید.

در این مقاله، مطابق با نرخ خرید تضمینی ۸۹۱۸ ریال بر کیلووات ساعت برای نیروگاه های خورشیدی با ظرفیت ۱۰ مگاوات و کمتر، یک مثال برای نشان دادن تغییرات اعمال شده در تنظیمات و ضرایب پیش فرض نرم افزار رت اسکرین ارائه شده است. نرم افزار رت اسکرین، گزینه ای برای ورود تعرفه های مختلف و ضرایب کاهش در سال های مختلف ندارد؛ بنابراین راهکار پیشنهادی، تقسیم قیمت ها در سال های مختلف می باشد که می توان از گزینه سایر درآمدها (هزینه ها)^۳ و انرژی پاک^۴ برای این کار کمک گرفت. با در نظر گرفتن این شرایط، باز هم امکان تخصیص قیمت فقط برای ۲ بازه زمانی وجود دارد و بازه زمانی سوم را نمی توان برای شرایط ایران شبیه سازی کرد. بنابراین، قیمت های سال دوازدهم تا بیستم بصورت میانگین در نظر گرفته شده است. این شبیه سازی در ۳ مرحله، یعنی شبیه سازی در سال اول تا هشتم، هشتم تا دوازدهم و دوازدهم تا بیستم انجام شده است.

مطابق معادله (۱)، نرخ خرید تضمینی برق برای نیروگاه های خورشیدی با ظرفیت ۱۰ مگاوات، تقریباً ۸۹۲ تومان به ازای هر کیلووات ساعت می باشد [۸]. در ابتدای سال هشتم، ضریب ۰.۶ اعمال می گردد، بنابراین این نرخ تا ابتدای سال دوازدهم برابر با ۵۳۵ تومان خواهد بود. در بازه سال دوازدهم تا شانزدهم مجدداً ضریب ۰.۶ اعمال شده و قیمت خرید برق به مقدار ۳۲۱ تومان می رسد و در ابتدای سال شانزدهم با تاثیر مجدد ضریب ۰.۶، این مقدار

فناوری فتوولتائیک خورشیدی به دلیل تطبیق پذیری و ماژولار بودن سیستم، طیف گسترده ای از کاربردها را در بر می گیرد. ماژول های خورشیدی فتوولتائیک را می توان بر روی پشت بام، دیوار ساختمان ها، روی زمین، بالای پارکینگ ها و روی آب نیز نصب کرد. انرژی تولید شده از چنین پروژه های خورشیدی را می توان به تاسیسات و یا ساختمان های مجاور تزریق کرد. مقدار گاز گلخانه ای کاهش یافته توسط سیستم فتوولتائیک خورشیدی، می تواند به عنوان یک کالای قابل معامله در بازار بین المللی عرضه شود. انتشار کل گازهای گلخانه ای معمولاً به صورت معادل دی اکسید کربن (انتشار کربن) بیان می شود. از این رو هر دوی این اصطلاحات به صورت متناوب در این مطالعه مورد استفاده قرار می گیرند. قیمت گذاری کربن یک انگیزه اقتصادی واضح برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای ایجاد می کند و بنابراین به عنوان یک راه موثر برای مهار تغییرات آب و هوایی دیده می شود.

عملکرد فنی نصب یک سیستم فتوولتائیک خورشیدی به عوامل مختلفی بستگی دارد که عبارتند از: محل نصب و شرایط جوی و هواشناسی مرتبط با سیستم، کارایی اجزای اصلی سیستم و واکنش آنها در شرایط محیطی مختلف و همچنین زوایای نصب ماژول ها. علاوه بر این، دوام اقتصادی یک سیستم فتوولتائیک، تابعی از هزینه های اجزای اصلی آن، نیروی کار و هزینه های زمین (که به مکان سایت بستگی دارد)، سایر هزینه های مربوط به عملیات و تعمیر و نگهداری و مسائل کلان اقتصادی مرتبط با پروژه است. بنابراین، برای ارزیابی اقتصادی بودن سیستم های فتوولتائیک متصل به شبکه، هر دو پارامتر اقتصادی و زیست محیطی محل نصب سیستم باید در نظر گرفته شود [۴]. اگرچه، عملکرد فنی و اقتصادی هر سیستم فتوولتائیک را می توان با استفاده از ابزارهای شبیه سازی ارزیابی کرد، اما بهترین راه انجام ارزیابی عملکرد در شرایط عملیاتی واقعی است. مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی عملکرد تاسیسات فتوولتائیک در سراسر جهان انجام شده است [5,6]. تمامی این مطالعات نشان می دهند که شاخص های عملکرد سیستم فتوولتائیک (مانند بازده نهایی، نسبت عملکرد، ضریب ظرفیت و انرژی ویژه) متفاوت است و به شرایط محیطی مکان پروژه بستگی دارد. ما در این مقاله قصد داریم تا مطالعات اقتصادی مربوط به یک نیروگاه فتوولتائیک ۱۰ مگاواتی را مورد ارزیابی قرار دهیم. برای این کار از نرم افزار رت اسکرین استفاده شده است.

نرم افزار رت اسکرین^۱ یک نرم افزار مدیریت پروژه های انرژی پاک برای تحلیل بهره وری انرژی، منابع انرژی های تجدیدپذیر و انجام مطالعات امکان سنجی اجرای پروژه های انرژی پاک و همچنین بررسی راندمان پروژه های در حال بهره برداری می باشد. نرم افزار رت اسکرین، متخصصان و تصمیم گیرندگان را قادر می سازد تا به سرعت، دوام فنی و مالی پروژه های بالقوه انرژی پاک را شناسایی،

² Power Purchase Agreement

³ Other Revenue (Cost)

⁴ Clean Energy (CE)

¹ RETScreen

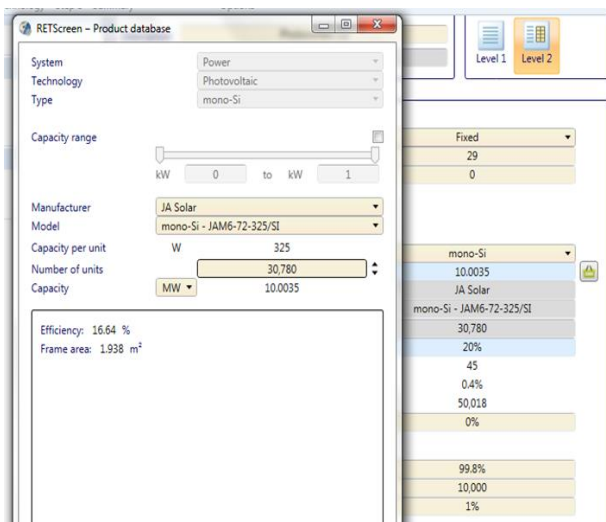


| GHG reduction revenue | | |
|--------------------------------------|----------------------|---------------|
| Net GHG reduction | tCO ₂ /yr | 9,367 |
| Net GHG reduction - 20 yrs | tCO ₂ | 187,344 |
| GHG reduction credit rate | IRR/tCO ₂ | 100 |
| GHG reduction revenue | IRR | 936,719 |
| GHG reduction credit duration | yr | |
| Net GHG reduction - yrs | tCO ₂ | |
| GHG reduction credit escalation rate | % | |
| Other revenue (cost) | | |
| Energy | kWh | 19,493,114 |
| Rate | IRR/kWh | 357 |
| Other revenue (cost) | IRR | 6,959,041,698 |
| Duration | yr | 7 |
| Escalation rate | % | 15% |
| Clean Energy (CE) production revenue | | |
| CE production | kWh | 19,493,114 |
| CE production credit rate | IRR/kWh | 278 |
| CE production revenue | IRR | 5,419,085,582 |
| CE production credit duration | yr | 11 |
| CE production credit escalation rate | % | 15.0% |
| Electricity exported to grid | | |
| Fuel type | kWh | Clean energy |
| Solar | 19,493,114 | Yes |

شکل ۲ نحوه ورود تعرفه‌های مختلف در نرم‌افزار

۳- مطالعات اقتصادی یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی خورشیدی

مکان پروژه مورد مطالعه در شهر اصفهان واقع شده و مطابق شکل ۳، با توجه به محدودیت‌های پایگاه داده‌های نرم‌افزار رت‌اسکرین، تعداد ۳۰۷۸۰ پنل ۳۲۵ وات JA SOLAR در نظر گرفته شده است که ظرفیت کل برابر با ۱۰ مگاوات می‌باشد. در صورتی که در حال حاضر پنل‌های ۵۵۰ وات نیز در بازار موجود می‌باشد.



شکل ۳ انتخاب پنل‌های مورد نیاز پروژه

به ۱۹۳ تومان به ازای هر کیلووات ساعت خواهد رسید. به دلیل محدودیت‌های ذکر شده در نرم‌افزار رت‌اسکرین، یک مقدار میانگین به عنوان نرخ خرید برق برای سال دوازدهم تا بیستم در نظر گرفته می‌شود. گرچه محاسبات به صورت دقیق در نظر گرفته نشده است، ولی برای یک برآورد اولیه و تهیه طرح توجیهی مقدماتی^۱ مناسب می‌باشد.

$$X = 892 \times 0.6 \rightarrow X = 535$$

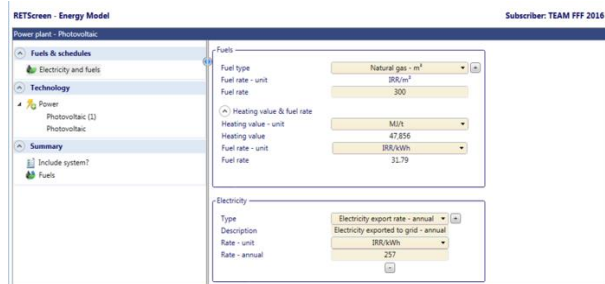
$$Y = 535 \times 0.6 \rightarrow Y = 321$$

$$Z = 321 \times 0.6 \rightarrow Z = 193$$

$$Z_{avr} = \frac{(X+Y)}{2} \rightarrow Z_{avr} = \frac{(193+321)}{2} = 257 \quad (1)$$

۲- وارد کردن اطلاعات در نرم‌افزار

در ابتدا مطابق شکل (۱)، مقدار نرخ خرید تضمینی برق را ۲۵۷ تومان به ازای هر کیلووات ساعت وارد می‌کنیم.



شکل ۱ نحوه ورود مبلغ خرید تضمینی برق

با توجه به اینکه قیمت در سال اول برابر ۸۹۲ تومان بر کیلووات ساعت است، با در نظر گرفتن مبلغ ۳۵۷ تومان برای X و ۲۸۷ تومان برای Y، ساختار گزینه‌ها را اصلاح کرده و در هشت سال اول با داشتن سه تعرفه، به مبلغ ۸۹۲ تومان بر کیلووات ساعت دست پیدا خواهیم کرد. با محدود کردن مبلغ ۳۵۷ تومان در ابتدای سال هفتم، به مبلغ ۵۳۵ تومان رسیده و با محدود کردن تعرفه سوم در قسمت انرژی پاک در هشت سال انتهایی، به مبلغ محاسبه شده در رابطه (۱)، که ۲۵۷ تومان بر کیلووات ساعت می‌باشد خواهیم رسید. یکی از مزیت‌های این روش این است که نرخ تعدیل^۲ در هر سه قسمت وجود دارد و می‌توانیم با اعمال تغییرات در هر زمان، تاثیرات آن را در تحلیل‌های مالی خود در نظر بگیریم. در شکل ۲، نحوه ورود اطلاعات بصورت کامل مشخص شده است.

¹ Pre Feasibility Studies

² Escalation Rate

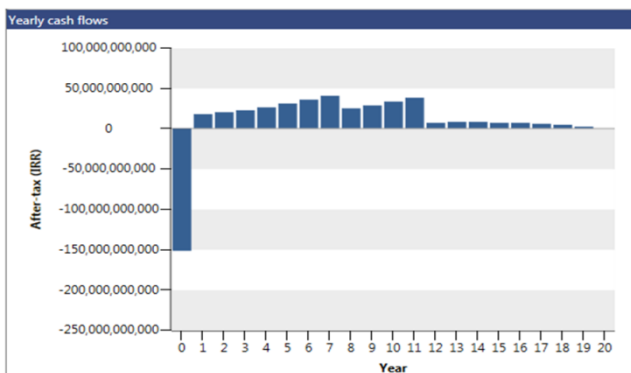


در این حوزه، با توجه به نرخ سود بانکی و میزان تورم، مقرون به صرفه نیست و هنوز باید بر روی افزایش قیمت های نرخ خرید تضمینی برق و نحوه اعمال پله های کاهش، مطالعات جامع تری صورت گیرد. [۹، ۱۰، ۱۱]

| Financial viability | | |
|---------------------------|----------------------|-----------------|
| Pre-tax IRR - equity | % | 14.9% |
| Pre-tax IRR - assets | % | 14.9% |
| After-tax IRR - equity | % | 14.9% |
| After-tax IRR - assets | % | 14.9% |
| Simple payback | yr | 9.5 |
| Equity payback | yr | 5.8 |
| Net Present Value (NPV) | IRR | -21,077,966,411 |
| Annual life cycle savings | IRR/yr | -3,937,785,289 |
| Benefit-Cost (B-C) ratio | | 0.86 |
| Debt service coverage | | No debt |
| GHG reduction cost | IRR/tCO ₂ | 420,381 |
| Energy production cost | IRR/kWh | 1,795 |

شکل ۶ نتایج تحلیل های مالی انجام شده در نرم افزار رت اسکرین

شکل های ۷ و ۸، به ترتیب نمودارهای میله ای و تجمعی میزان درآمد پروژه در طول مدت ۲۰ سال را نشان می دهند که نقطه سر به سر هزینه ها و درآمدها به وضوح در شکل ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۷ نمودار میله ای درآمد پروژه در طول ۲۰ سال

| Initial costs (credits) | Unit | Quantity | Unit cost | Amount | Relative costs |
|----------------------------|---------|----------|-----------|---------------|-----------------------|
| Feasibility study | cost | 1 | IRR | 30,000,000 | IRR |
| Subtotal: | | | | IRR | 30,000,000 0.0% |
| Development | cost | 1 | IRR | 100,000,000 | IRR |
| Subtotal: | | | | IRR | 100,000,000 0.1% |
| Engineering | cost | 1 | IRR | 200,000,000 | IRR |
| Subtotal: | | | | IRR | 200,000,000 0.1% |
| Power system | | | | | |
| Photovoltaic (1) | kw | 10,004 | IRR | 14,000,000 | IRR |
| Photovoltaic | kw | 0 | | | IRR |
| Road construction | km | 1 | IRR | 2,000,000,000 | IRR |
| Transmission line | km | 1 | IRR | 4,000,000,000 | IRR |
| Substation | project | 1 | IRR | 5,000,000,000 | IRR |
| Energy efficiency measures | project | | | IRR | |
| User-defined | cost | | | IRR | |
| Subtotal: | | | | IRR | 151,049,000,000 99.8% |

شکل ۴ هزینه های راه اندازی و نصب

در شکل ۴، هزینه های تخمین زده شده برای راه اندازی یک نیروگاه خورشیدی ۱۰ مگاواتی نشان داده شده است. با فرض کاهش هزینه ها در نیروگاه های مگاواتی نسبت به کیلوواتی، مبلغ ۱۷ میلیون تومان به ازای هر کیلووات ظرفیت نصب شده را به مبلغ ۱۴ میلیون تومان تغییر داده و با اضافه کردن هزینه های جانبی دیگر مانند احداث جاده، پست و هزینه های مهندسی، در مجموع هزینه راه اندازی این نیروگاه حدود ۱۵۱ میلیارد تومان برآورد خواهد شد. هزینه های سالیانه تعمیر و نگهداری و هزینه نگهداری نیز یک میلیارد و پانصد میلیون تومان در نظر گرفته شده است. لذا درآمد سالیانه نیروگاه مطابق شکل ۵ تعیین می شود.

| Costs Savings Revenue | | | |
|-----------------------------------------|-------------|------------|------------------------|
| Initial costs | | | |
| Feasibility study | 0.02% | IRR | 30,000,000 |
| Development | 0.07% | IRR | 100,000,000 |
| Engineering | 0.13% | IRR | 200,000,000 |
| Power system | 99.8% | IRR | 151,049,000,000 |
| Total initial costs | 100% | IRR | 151,379,000,000 |
| Annual costs and debt payments | | | |
| O&M | | IRR | 1,500,000,000 |
| Total annual costs | | IRR | 1,500,000,000 |
| Annual savings and revenue | | | |
| Electricity export revenue | | IRR | 5,009,730,197 |
| GHG reduction revenue | | IRR | 936,719 |
| Other revenue (cost) - 7 yrs | | IRR | 6,959,041,698 |
| CE production revenue - 11 yrs | | IRR | 5,419,085,582 |
| Total annual savings and revenue | | IRR | 17,388,794,196 |

شکل ۵ هزینه ها و درآمد نیروگاه

در شکل ۶، نتایج تحلیل های مالی انجام شده در نرم افزار رت اسکرین مشخص شده است. همانطور که مشاهده می شود، نرخ بازده داخلی^۱، تقریباً ۱۵ درصد و نرخ بازگشت سرمایه^۲ حدود ۶ سال می باشد. در این پروژه، ارزش خالص فعلی^۳ منفی و نسبت سود به هزینه کمتر از یک است. این حالت نشان می دهد که سرمایه گذاری

¹ Internal Rate of Return

² Return on Investment

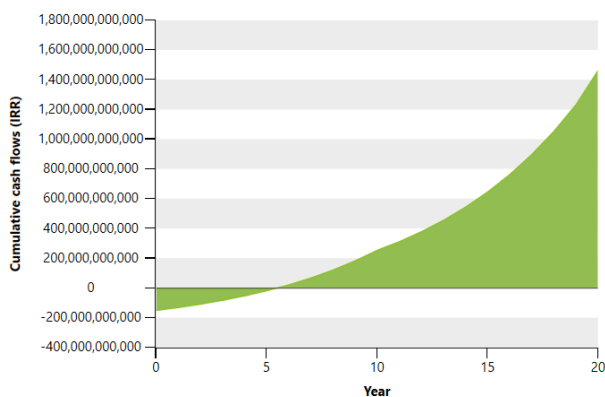
³ Net Present Value

۴- ارزیابی اقتصادی نیروگاه با ضریب تعرفه‌های قبلی

در صورتی که مطابق مصوبه قبلی، از ضریب ۰,۷ استفاده کنیم، نتایج تحلیل مالی مانند شکل‌های ۱۱ و ۱۲ خواهد بود، که در این حالت نرخ بازده داخلی ۲۵ درصد، ارزش خالص فعلی مثبت و بازگشت سرمایه ۵,۶ سال می‌باشد و نشان‌دهنده توجیه‌پذیر بودن پروژه است. پروژه‌هایی که با تعرفه‌های قبلی اجرا شده است، در حال حاضر به دلیل اعمال ضریب تعدیل، سوددهی مطلوبی دارند. بنابراین، در مقایسه با اعمال پله‌بندی سه مرحله‌ای در مصوبه جدید، ملاحظه می‌گردد که تاثیر تنها یک پله کاهشی با نرخ ۰,۷ در سال دهم در مصوبه قدیمی نسبت به مصوبه جدید، ایجاد رغبت بیشتری برای سرمایه‌گذاران جهت ورود به این بازار خواهد کرد.

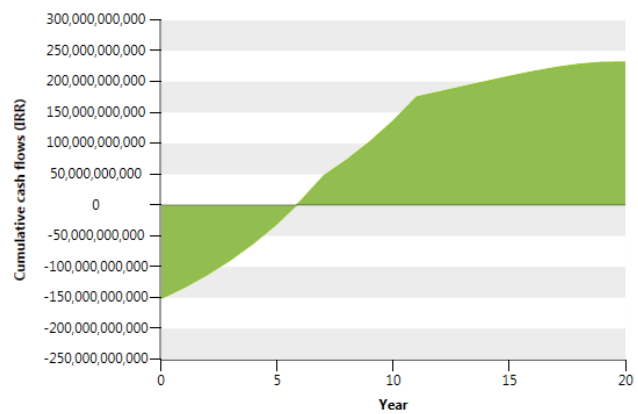
| Financial viability | | |
|---------------------------|----------------------|----------------|
| Pre-tax IRR - equity | % | 24.8% |
| Pre-tax IRR - assets | % | 24.8% |
| After-tax IRR - equity | % | 23.3% |
| After-tax IRR - assets | % | 23.3% |
| Simple payback | yr | 9.1 |
| Equity payback | yr | 5.6 |
| Net Present Value (NPV) | IRR | 63,602,871,765 |
| Annual life cycle savings | IRR/yr | 11,882,287,308 |
| Benefit-Cost (B-C) ratio | | 1.4 |
| Debt service coverage | | No debt |
| GHG reduction cost | IRR/tCO ₂ | -1,213,739 |
| Energy production cost | IRR/kWh | 1,749 |

شکل ۱۱ تحلیل اقتصادی نیروگاه با اعمال ضریب ۰,۷



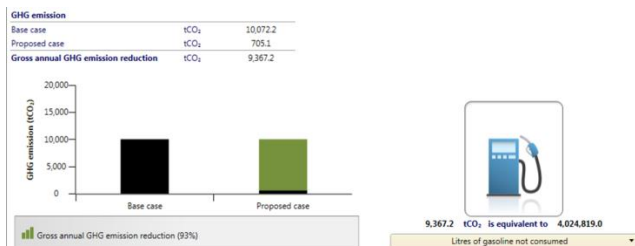
شکل ۱۲ نمودار درآمد و نقطه سر به سر با اعمال ضریب ۰,۷

در شکل ۱۳، نمودار جریان نقدی و درآمد بیست ساله نیروگاه با در نظر گرفتن تمام موارد و تنظیمات نرم‌افزار رت اسکرین نشان داده شده است. این یک طرح پیش امکان‌سنجی است که بر اساس آن، سرمایه‌گذار می‌تواند روند سوددهی پروژه را در طول مدت بیست سال مشاهده کند و با دید جامع‌تری نسبت به سرمایه‌گذاری خود تصمیم‌گیری و اقدام نماید. بنابراین کافی است که با در نظر گرفتن ریسک منطقه‌ای و شرایط حاکم بر کشور، سرمایه‌گذاری خود را انجام دهد.



شکل ۸ نمودار تجمعی درآمد پروژه در طول ۲۰ سال و نقطه سر به سر

در شکل ۹، میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مشخص شده است و همچنین نشان داده شده که به واسطه نصب این نیروگاه، تولید دی‌اکسید کربن به مقدار ۹۳۶۷,۲ تن کاهش می‌یابد. این عدد، معادل با ۴۰۲۴۸۱۹ لیتر بنزین می‌باشد که در مصرف آن صرفه‌جویی شده است. در صورتی که می‌توانستیم از مشوق‌های خارجی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای استفاده کنیم، قطعاً سوددهی پروژه و مطالعات اقتصادی آن با در نظر گرفتن این نرخ‌ها، مجدداً مورد تحلیل قرار می‌گرفت.



شکل ۹ نتایج تحلیل‌های مالی انجام شده در نرم‌افزار رت اسکرین

در شکل ۱۰، آنالیز حساسیت نیز نشان داده شده است که در بررسی انجام شده برای بازپرداخت حقوق صاحبان سهام^۱ و در بازه ۲۰ درصد مشاهده می‌گردد. زمان بازگشت سرمایه از ۴,۸ تا ۶,۹ سال متغیر می‌باشد.

| Sensitivity analysis | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Perform analysis on | Equity payback | | |
| Sensitivity range | 20% | | |
| Threshold | 20 | yr | |
| - Remove analysis | | Initial costs | |
| Electricity exported to grid | 121,103,200,000 | 151,379,000,000 | 181,654,800,000 |
| MWh | -20.0% | 0.0% | 20.0% |
| 15,594.49 | -20.0% | 5.2 | 6.1 |
| 19,493.11 | 0.0% | 5.0 | 5.8 |
| 23,391.74 | 20.0% | 4.8 | 5.6 |

شکل ۱۰ آنالیز حساسیت

¹ Equity Payback



های مالی یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی راه اندازی شده نیز مورد مطالعه قرار گرفت. اما با توجه به خروجی های نرم افزار، عواملی مانند پایین بودن نرخ بازده داخلی، منفی بودن ارزش خالص فعلی پروژه و نسبت نامناسب سود به هزینه، نشان دهنده عدم توجیه پذیری اقتصادی و پایین بودن رغبت سرمایه گذاران در این حوزه می باشد. به عنوان نمونه، با در نظر گرفتن همان ضرایب قبلی که نتایج آن نیز در این مقاله ارائه شده است، نتیجه می گیریم که نرخ خرید تضمینی برق از تولیدات تجدیدپذیر به ویژه سیستم های برق خورشیدی، می تواند باز هم مشوق مناسبی برای سرمایه گذاری در این حوزه باشد.

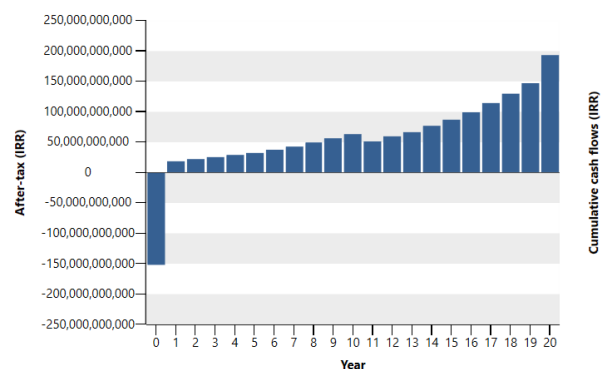
همانطور که در بخش های قبلی توضیح داده شد هزینه احداث یک نیروگاه ده مگاواتی خورشیدی به صورت خوش بینانه حدود ۱۵۰ میلیارد تومان می باشد و نرخ بازده داخلی آن ۱۵ درصد بوده که نسبت به سود بانکی کمتر می باشد. طبق نمودار میله ای درآمد پروژه، می بینیم که پروژه در سال های آخر حتی به سمت ضرردهی نیز می رود. نرخ خرید تضمینی تا قبل از اعمال ضریب کاهش اولیه نسبت به قبل بهتر شده است ولی عدم ثبات اقتصادی موجب شده تا قانون گذار با احتیاط بیش از اندازه ضرایبی در سال های مختلف ارائه نماید که باعث عدم توجیه پذیری پروژه خواهد شد. در صورتی که با اعمال همان ضریب قبلی (۰٫۷) در سال دهم مانند مصوبه قبلی، نرخ بازده داخلی تقریباً ۲۵ درصد می باشد که می تواند محرکی برای ورود سرمایه گذاران در این صنعت باشد.

بدیهی است که وزارت نیرو و سازمان انرژی های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی برق (ساتبا)، باید تدابیر بیشتری برای توسعه نیروگاه های تجدیدپذیر، بخصوص نیروگاه های خورشیدی اندیشیده و مطالعات جامع تری در این راستا انجام دهند تا سرمایه گذاران بخش خصوصی با رغبت بیشتری در این حوزه وارد شده و سبد انرژی کشور با نفوذ بیشتر نیروگاه های تجدیدپذیر تکمیل گردد و در آینده ای نزدیک، شاهد کاهش چشمگیر خاموشی ها و افزایش پایداری شبکه برق کشور باشیم.

| Yearly cash flows | | | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Year | Pre-tax | After-tax | Cumulative |
| # | IRR | IRR | IRR |
| 0 | -151,379,00... | -151,379,00... | -151,379,00... |
| 1 | 19,098,226,1... | 19,098,226,1... | -132,280,77... |
| 2 | 21,872,960,0... | 21,872,960,0... | -110,407,81... |
| 3 | 25,045,904,0... | 25,045,904,0... | -85,361,909,... |
| 4 | 28,673,189,7... | 28,673,189,7... | -56,688,719,... |
| 5 | 32,818,648,1... | 32,818,648,1... | -23,870,071,... |
| 6 | 37,554,821,3... | 37,554,821,3... | 13,684,749,6... |
| 7 | 42,964,095,8... | 42,964,095,8... | 56,648,845,4... |
| 8 | 49,139,971,6... | 49,139,971,6... | 105,788,817,... |
| 9 | 56,188,481,0... | 56,188,481,0... | 161,977,298,... |
| 10 | 64,229,769,7... | 64,229,769,7... | 226,207,067,... |
| 11 | 73,399,854,9... | 51,973,599,2... | 278,180,667,... |
| 12 | 83,852,576,9... | 59,278,630,6... | 337,459,297,... |
| 13 | 95,761,755,9... | 67,603,419,3... | 405,062,717,... |
| 14 | 109,323,570,... | 77,085,285,6... | 482,148,002,... |
| 15 | 124,759,166,... | 87,879,027,5... | 570,027,030,... |
| 16 | 142,317,515,... | 100,158,919,... | 670,185,949,... |
| 17 | 162,278,510,... | 114,120,882,... | 784,306,832,... |
| 18 | 184,956,329,... | 129,984,837,... | 914,291,669,... |
| 19 | 210,703,028,... | 147,997,218,... | 1,062,288,88... |
| 20 | 239,912,382,... | 192,688,503,... | 1,254,977,39... |

شکل ۱۳ نتایج جریان نقدی پروژه در طول ۲۰ سال با در نظر گرفتن ضریب ۰٫۷

در شکل ۱۴، نمودار میله ای درآمد سالیانه نیروگاه با در نظر گرفتن ضریب تعرفه قبلی یعنی ۰٫۷، قابل مشاهده است.



شکل ۱۴ نمودار میله ای درآمد پروژه در طول ۲۰ سال

۵- نتیجه گیری

مطابق مصوبه وزیر محترم نیرو در تاریخ ۱۴۰۰/۰۲/۲۵، نرخ خرید تضمینی برق از تولیدات تجدیدپذیر در سال جاری افزایش یافته است، اما شرکت ها و سرمایه گذاران خصوصی صنعت برق، همچنان نسبت به احداث نیروگاه های خورشیدی بی تفاوت هستند و این امر ناشی از عدم توجیه پذیری سرمایه گذاری در این صنعت در ایران، به دلیل اعمال ضریب سه پله ای کاهش نرخ خرید ۰٫۶ می باشد. در این مقاله، علاوه بر تغییراتی که در نرم افزار رت اسکرین برای سازگاری آن با تعرفه های جدید وزارت نیرو انجام شد، تحلیل-



۶- مراجع

- [6] Saeed Abdul-Ganiyu, David A. Quansah, Emmanuel W. Ramde, Razak Seidu, Muiyiwa S. Adaramola; Techno-economic analysis of solar photovoltaic (PV) and solar photovoltaic thermal (PVT) systems using exergy analysis; Sustainable Energy Technologies and Assessments Volume 47, October 2021, 101520.
- [7] www.irena.org
- [8] Minister of Energy's Decision (2021-05-15) on The Subject of Purchasing Electricity Generated By Renewable and Clean Power Plants.
- [9] satba.gov.ir (Website of Iran Renewable Energy Organization)
- [10] Seyed Mohammad Seyed Hoseini, Morteza Amuzgar; Engineering Economics and Decision Analysis; 5th ed; Science and Technology University of Iran; 2016.
- [11] Journal of Economic Modeling Research; No 11; 2013.
- [1] S. Sreenath, K. Sudhakar, Yusop AF; 7E analysis of a conceptual utility-scale land-based solar photovoltaic power plant; Energy Volume 219, 15 March 2021, 119610.
- [2] Renewable Energy Technologies. International renewable energy agency (IRENA). 2019. www.irena.org/Statistics/View-Data-By-Topic/Capacity-andGeneration/Technologies.
- [3] Retscreen User Manual
- [4] H. Vidal, M. Rivera, P. Wheeler, N. Vicencio, The analysis performance of a grid-connected 8.2 kwp photovoltaic system in the patagonia region, Sustain. Times 12 (2020) 1–16
- [5] Ivan T. Oloya, Tar JL. Gutu, Muiyiwa S. Adaramola; Techno-economic assessment of 10 MW centralised grid-tied solar photovoltaic system in Uganda; Case Studies in Thermal Engineering Volume 25, June 2021, 100928

ACEC2021-29534

بررسی اثر نانومواد بر بهبود خواص ترموفیزیکی ماده ذخیره کننده انرژی گرمایی (پارافین)

سیدامیرحسن بطحایی^۱، مسعود ایرامنش^۲

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی انرژی های تجدیدپذیر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان; amirhasan1372@gmail.com

^۲ دانشیار پژوهشگاه انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، ایران; m.iranmanesh@kgut.ac.ir

چکیده

ذخیره سازی انرژی حرارتی^۱ (TES) برای سیستم های حرارتی خورشیدی توجه فزاینده ای را به خود جلب می کند، زیرا در دسترس بودن انرژی خورشیدی متناوب است. از مواد آلی مانند موم های پارافین در بسیاری از سیستم های انرژی برای ذخیره سازی انرژی حرارتی گرمای نهان^۲ (LHTES) استفاده می شود. این مطالعه خواص ترموفیزیکی پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده^۳ (PCM) را بررسی می کند. سپس اثر نانولوله های کربنی چند جداره^۴ (MWCNTs) با دو قطر ۸ و ۱۰-۲۰ نانومتر بر خواص ترموفیزیکی پارافین برای بهبود این خواص بررسی شده است. اسکن کالریمتری تفاضلی^۵ (DSC) برای تعیین خواص حرارتی-فیزیکی سیستم دوتایی مانند دمای جامد و مایع ماده، ظرفیت گرمایی ویژه، آنتالپی تغییر فاز و گرمای محسوس استفاده شد. آزمایش ها برای این مواد برای هدایت حرارتی و الکتریکی نیز انجام می شود.

واژه های کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، ذخیره انرژی حرارتی، نانولوله های چندجداره کربنی، پارافین

مقدمه

مشکل اصلی مربوط به انرژی حرارتی خورشید ذخیره سازی آن است، یکی از بهترین راه حل ها PCM برای ذخیره انرژی توسط LHTES است. ذخیره گرمای نهان یکی از کارآمدترین ابزارهای ذخیره انرژی حرارتی است. با چگالی ذخیره سازی بالاتر و اختلاف دمای پایین بین فرآیند ذخیره سازی و انتشار گرما مشخص می شود. با توجه به در دسترس بودن انرژی خورشیدی متناوب، PCM ها یک تکنیک جایگزین مناسب برای ذخیره انرژی خورشیدی هستند [۱]. برای انتخاب کاندیداهای PCM مناسب در این روش، باید معیارهایی در نظر گرفته شود. به عنوان مثال، آنها باید محدوده دمای عملیاتی

LHTES، گرمای نهان زیاد همجوشی و گرمای ویژه قابل توجه را برآورده کنند تا از چگالی ذخیره سازی بالای سیستم اطمینان حاصل شود. از طرف دیگر، این ماده باید رسانایی حرارتی بالایی داشته باشد تا سرعت شارژ و دشارژ حرارتی را افزایش دهد. علاوه بر این معیارها، مواد با چگالی زیاد مورد علاقه است زیرا چگالی ذخیره انرژی را بهبود می بخشد و حجم سیستم TES را کاهش می دهد. علاوه بر این، PCM با قیمت پایین و در دسترس بودن فراوان مورد نظر است. با این حال، انتخاب PCM با مشخصات کامل ویژگی، مرزهای حرارتی و اهداف عملیاتی برای کاربرد مناسب یا مطابقت با شرایط و الزامات حرارتی در طراحی LHTES چالش برانگیز است.

ملاحظاتمانند خواص ترموفیزیکی، پایداری حرارتی در چرخه های ترمودینامیکی و ویژگی های محیطی برای یافتن یک PCM مناسب برای ذخیره انرژی خورشیدی باید در نظر گرفته شود. تحقیقات زیادی بر روی خواص ترموفیزیکی مواد مختلف برای یافتن مواد TES مناسب در فواصل دمایی مختلف انجام شده است. به عنوان مثال، در نیروگاه های خورشیدی متمرکز، انرژی متناوب خورشیدی می تواند تا حدی توسط PCM برای تولید برق پایدار ذخیره شود [۲]. گرما یا سرما را می توان در نیمه شب با استفاده از برق غیر پیک ارزان قیمت تولید و ذخیره کرد و سپس برای مصارف خانگی یا صنعتی در روزها کرد [۳]. فناوری های TES PCM دارای مزایایی مانند چگالی ذخیره انرژی بالا، فشردگی بالا، ساختار ساده و سهولت تعمیر و نگهداری است. علاوه بر این، PCM همچنین می تواند برای کنترل حرارتی دستگاه هایی که کار می کنند و به طور متناوب گرما تولید می کنند، مانند تراشه ها استفاده شود [۴، ۵]. استفاده از PCM ها در کلکتورهای خورشیدی مانند: صفحه تخت، لوله تخلیه، لوله حرارتی برای ذخیره انرژی از کلکتور و استفاده از آن در مواقعی که انرژی خورشیدی در دسترس نیست [۶-۱۰]. PCM ها دارای چگالی ذخیره سازی بالا

^۴ Multi-Walled Carbon Nano Tubes

^۵ Differential scanning calorimetry

^۱ Thermal Energy Storage

^۲ Latent Heat Thermal Energy Storage

^۳ Phase Change Material

جدول ۱: مشخصات اولیه مواد

| ماده | OD (nm) | سطح ویژه (m^2/g) | چگالی (g/cm^3) | نقطه ذوب ($^{\circ}C$) |
|-----------------|-----------|----------------------|--------------------|--------------------------|
| paraffin | - | - | ۰,۹۳۱ | ۵۹ |
| MWCNT (8nm) | ۸ | $500 <$ | ۲,۱ | |
| MWCNT (10-20nm) | -۱۰ ۲۰ | $200 <$ | ۲,۱ | |

نانوسیال به طور کلی به دو روش تهیه می شود. در روش تک مرحله ای، نانوذرات آماده شده و مستقیماً در سیال پراکنده می شوند. نانوذرات به صورت پودر تهیه می شوند و سپس به روش دو مرحله ای به سیال پایه اضافه می شوند. از سوی دیگر برای تثبیت نانوذرات و جلوگیری از تجمع و در نتیجه رسوب ذرات، از سوسپانسیون، سورفکتانت ها، کنترل کننده pH پخش کننده ها و نوسانات اولتراسونیک استفاده می شود. در این تحقیق از روش دوم برای تهیه نانوکامپوزیت استفاده شده است. همزن اولتراسونیک، همزن مکانیکی و تولوئن به عنوان حلال برای پخش و همگن کردن ترکیب استفاده شده است. پس از توزین مواد با ۵ گرم پارافین و درصد نانوذرات مورد نظر در ۵۰ میلی لیتر تولوئن حل شده و به مدت ۱۵ دقیقه با همزن اولتراسونیک (سه بار هر بار به مدت پنج دقیقه با فواصل یک دقیقه ای برای استراحت و اختلاط دستگاه) هم زده می شود. سپس محلول را با یک همزن مکانیکی به مدت ۲۰ دقیقه (دو بار، هر بار به مدت ده دقیقه در فواصل یک دقیقه ای برای استراحت دستگاه و مخلوط کردن) مخلوط می کنند. برای بهبود خواص ذخیره سازی حرارتی پارافین و یافتن ترکیب بهینه نانوذرات با PCM، درصد های مختلف MWCNT مانند وزنی ۰,۵٪، ۱٪، ۲,۵٪ و ۵٪، وزن ۲,۵٪ و وزنی ۵٪ برای افزودن PCM انتخاب شد. هر یک از مواد با مواد پایه (همانطور که ذکر شد) در یک محفظه شیشه ای استوانه ای با قطر ۵۲ میلی متر مخلوط شد. با توجه به تجمع بار الکتریکی در نقاط تیز و تأثیر منفی بر اندازه گیری هدایت الکتریکی، یک محفظه استوانه ای استفاده شده است. یک مدار الکتریکی برای آزمایش مقاومت الکتریکی تمام نمونه ها ترتیب داده شد. مقاومت ویژه ترکیب نانومقیاس با محدوده ولتاژ ۲۰۰ ولت تا ۲۰۰ کیلو ولت اندازه گیری شد. تعیین خواص ترموفیزیکی PCM اطلاعات اولیه مورد نیاز برای تحقیقات و کاربردها است. خواص عمدتاً شامل چگالی، نقطه ذوب، گرمای نهان همجوشی، هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه، ویسکوزیته، ضریب انبساط حرارتی است. به طور کلی، خواص تغییر فاز، مانند نقطه ذوب، گرمای نهان همجوشی، و ظرفیت گرمایی ویژه، را می توان با کالریمتری اسکن تفاضلی (DSC) اندازه گیری کرد [۳۷]. از DSC برای تعیین خواص حرارتی فیزیکی سیستم باینری استفاده شد. بسته به تنظیمات DSC در طول اندازه گیری ها، نتایج متفاوتی به دست آمد. به عنوان مثال، هنگامی که DSC با نرخ گرمایش/سرمایش بالا کار می کند، منجر به اطلاعات اشتباه می

(میزان انرژی ذخیره شده در واحد جرم) و محدوده دمایی باریکی برای شارژ و تخلیه ذخیره سازی هستند. این محدوده با دمای انتقال فاز PCM مطابقت دارد. فشرده بودن سیستم ذخیره سازی PCM به انعطاف پذیری بیشتری در انتخاب مکان برای سیستم ذخیره سازی اجازه می دهد [۱۱]. افزایش رسانایی حرارتی نانوذرات موضوع تحقیقات فعال بوده است، جایی که خواص ترموفیزیکی فاز پراکنده و محیط پراکندگی تحت بررسی شدید قرار گرفته است [۱۲-۱۴]. مکانیسم های مختلفی برای افزایش انتقال حرارت در نانو سیالات پیشنهاد شده است [۱۳-۱۶]. افزایش رسانایی حرارتی به کمک نانوذرات نیز برای توسعه PCM آلی برای TES استفاده شده است [۱۵، ۱۷، ۱۸].

اثر افزودن نانوذرات MWCNT به سیال پایه پارافین بر روی هدایت حرارتی بررسی شده است. مشخص شد که در هر دما و غلظت نانولوله، ادغام نانولوله ها در سیال پایه هدایت حرارتی را بهبود می بخشد [۱۹]. حضور نانوذرات به عنوان مواد افزودنی در PCM، اثر انتقال حرارت را با کاهش بار مربوطه و زمان اتلاف گرما افزایش می دهد [۲۰]. با توجه به نامناسب بودن برخی از خواص پارافین از جمله هدایت حرارتی، دو روش برای افزایش سطح تماس و افزودن نانوذرات قابل بررسی است. در این تحقیق از افزودن نانوذرات برای بهبود ضریب هدایت حرارتی استفاده شده است. به عنوان یک راه حل جایگزین، افزودن نانوذرات به PCM ها برای تهیه کامپوزیت های PCM با رسانایی حرارتی بالا در حال حاضر مورد توجه و توجه فزاینده ای قرار گرفته است [۲۱-۲۳]. ویژگی های ذخیره سازی حرارتی مواد ذخیره سازی گرمای نهان را می توان با پراکندگی مواد در سطح نانو افزایش داد. موادی مانند [۲۴] اکسیدهای فلزی [۲۵]، نانولوله های کربنی تک جداره [۲۶]، نانولوله های کربنی چند جداره [۲۷]، نانوالیاف کربن [۲۸] نانوپلاکت ها [۲۹] و گرافن [۳۰]. مشخص شد که در هر دما و غلظت نانولوله، ادغام نانولوله ها در سیال پایه هدایت حرارتی را بهبود می بخشد [۳۱]. نرخ نسبی بهبود در هدایت حرارتی به رسانایی حرارتی نانومواد اضافه شده، نسبت افزودن و کیفیت اختلاط بستگی دارد [۳۲]. این بهبود در هدایت حرارتی پارافین معقول است و هزینه های آن محدود و قابل قبول است [۳۳]. افزایش هم افزایی پرکننده های هیبریدی و کاهش مقاومت حرارتی رابط سیستم دو راه موثر برای بهبود هدایت حرارتی کامپوزیت است [۳۴]. نتایج تجربی نشان داد که ترکیب یک عامل تبدیل نور به گرما و یک ماده ذخیره سازی حرارتی تغییر فاز می تواند کارایی کاربردهای انرژی خورشیدی را در مقایسه با PCM های سنتی بهبود بخشد [۳۵]. افزودن نانوذرات MWCNT و Al_2O_3 به پارافین کمی دمای تغییر فاز را افزایش داد و مقاومت حرارتی را در مقایسه با پارافین خالص کاهش داد [۳۶].

مواد و متد آزمایش

به منظور انجام آزمایش ها از پارافین و نانولوله های کربنی چند جداره با دو قطر استفاده شده است که در جدول ۱ مشخصات اولیه این مواد قابل مشاهده است.



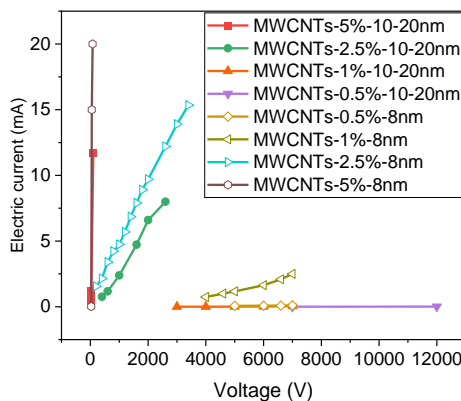
اندازه گیری میزان آزاد شدن حرارت مواد استفاده شد (فلاسک تا ضخامت ۶ سانتی متر از فوم پلی یورتان عایق بندی شد). ظرف فلاسک عایق شده با ۲۰۰ میلی لیتر آب پر شد و PCM در یک ظرف شیشه ای کروی ۱۰ میلی لیتری پر شد و در آب غوطه ور شد. از دو ترموکوپل نوع (K) برای اندازه گیری دما استفاده شد و توسط دیتالاگر ثبت شد، یکی در ظرف شیشه ای برای PCM و دیگری در فلاسک آب. پس از ذوب کامل PCM در ظرف شیشه ای در دمای ثابت، داخل فلاسک قرار داده شد و تغییرات دما ثبت شد. به دلیل عایق بودن فلاسک، تمام گرمای آزاد شده از PCM توسط آب جذب شده و در نهایت به دمای تعادل رسیده است. در شکل ۱ دستگاه های آزمایش آمده است.

شود. بنابراین در این تحقیق از سرعت ۵ درجه در دقیقه استفاده شده است. همچنین، محدوده دمایی انتقال فاز صحیح را نمی توان به سادگی از اندازه گیری DSC بدست آورد. ترکیب ملاحظات تعادل فاز با اندازه گیری های DSC یک روش طراحی قابل اعتماد برای ترکیب گرمای تغییر فاز و محدوده دما ارائه می کند [۱۱]. خواص حرارتی-فیزیکی مختلف مواد اولیه ذکر شده مانند چگالی، ویسکوزیته فاز مایع، هدایت حرارتی، ظرفیت حرارتی، سرعت انتشار حرارت بر اساس روش های استاندارد آنها که به تفصیل شرح داده شده است، اندازه گیری شده است. چگالی مواد به روش غوطه وری در دماهای مختلف در فاز مایع و جامد با دقت ۱۰ درصد اندازه گیری شد. آزمایش ها برای آنالیز حرارتی مواد توسط مدل DSC1 با نرخ گرمایش/سرماایش ۵ درجه بر دقیقه انجام شده است. رسانایی نمونه های PCM توسط تحلیلگر خواص حرارتی KD2 Pro بر اساس روش سیم داغ گذرا اندازه گیری شد. از یک فلاسک عایق برای



شکل ۱: تجهیزات و دستگاه های مورد استفاده در آزمایشها

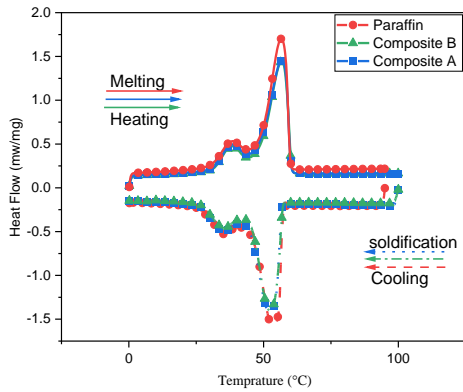
نانوکامپوزیت های ۸ و ۱۰ تا ۲۰ نانومتری عبور می کند به ترتیب ۲۰ میلی آمپر و ۰.۵۲ میلی آمپر است.



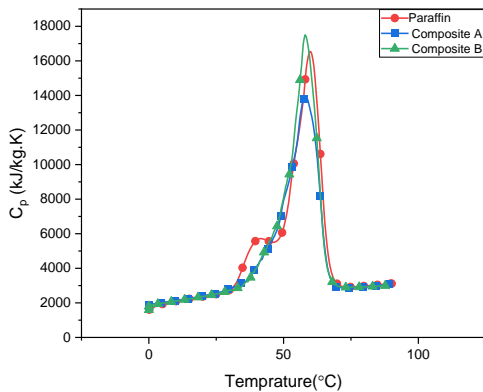
شکل ۲: تغییرات جریان خروجی با ولتاژ در نانوکامپوزیتها

نتایج

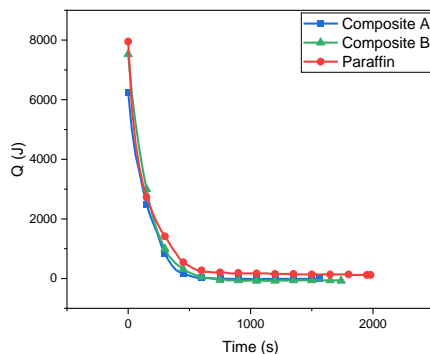
این بخش از مطالعه با هدف تعیین درصد بهینه نانوذرات بر اساس جریان خروجی از نانوکامپوزیت با افزایش ولتاژ در دمای محیط حدود ۲۵ درجه سانتی گراد انجام می شود. نتایج جریان خروجی از نانوکامپوزیت های پارافین در مقابل ولتاژ ورودی با درصد وزنی متفاوت ۰.۵، ۱، ۲.۵، ۵ و ۱۰ برای دو نانوکامپوزیت ۸ و ۱۰-۲۰ نانومتر در شکل ۲ نشان داده شده است. ولتاژ اعمال شده از ۰ به ۱۲۰۰ ولت تغییر می کند و جریان خروجی از ۰ تا ۲۰ میلی آمپر تغییر می کند. مشاهده می شود که رسانایی الکتریکی با افزایش درصد افزودن نانوذرات برای هر دو اندازه ۸ و ۱۰-۲۰ نانومتر افزایش یافته است. این نانوکامپوزیت رسانایی الکتریکی بسیار خوبی را حتی در ولتاژهای پایین حدود ۱۵ ولت نشان می دهد. جریانی که از



شکل ۴: تغییرات نرخ حرارتی با دما برای پارافین و نانوکامپوزیتها با توجه به یکنواختی نمودار ظرفیت گرمایی ویژه مطابق شکل ۵، برای پارافین و نانوکامپوزیت آن، حداکثر مقدار حرارت ویژه به عنوان معیار مناسبی برای تحلیل مقایسه ای رفتار آنها انتخاب شده است. با افزودن نانوذرات با قطر ۸ نانومتر، حداکثر مقدار گرمای ویژه به ۱۳,۹۳۷۹ کیلوژول بر کیلوگرم بر کیلوگرم کاهش می یابد. در مقایسه، با افزودن نانوذرات با قطر ۱۰-۲۰ نانومتر، افزایش این مقدار به میزان ۱۷,۵۰۳۴ کیلوژول بر کیلوگرم مشاهده می شود.



شکل ۵: تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه با دما برای پارافین و نانوکامپوزیتها مطابق شکل ۶، کاهش انتشار حرارت در ۱۰۰۰ ثانیه با افزودن نانوذرات به پارافین، به ترتیب ۰,۷۵۲۵ و ۰,۶۲۵۳ (J/s) برای نانوذرات با قطر ۱۰-۲۰ و ۸ نانومتر مشاهده شد. هر دو کامپوزیت هدایت حرارتی و الکتریکی را بهبود می بخشند.

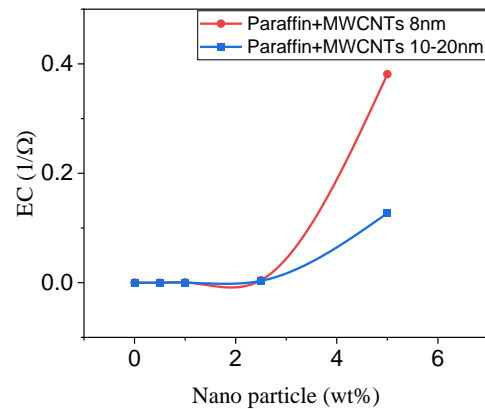


در شکل ۳، هدایت الکتریکی نانوکامپوزیتها با درصدهای مختلف برای هر دو نانوذره ۱۰-۲۰ و ۸ نانومتر قابل مشاهده است که نشان دهنده افزایش مقدار آن از صفر به ۰,۱۲۷۲۱ و ۰,۳۸۱۲۱ ($1/\Omega$) است. با افزودن ۵ درصد از هر یک از نانوذرات، بهترین رفتار را بر اساس رسانایی الکتریکی نشان می دهد. این درصد وزنی اضافه شده (۵٪) به دلیل بالاترین رسانایی الکتریکی در نانوکامپوزیت های نشان داده شده برای آزمایش های بعدی استفاده شده است (مطابق جدول ۲).

جدول ۲: مشخصات نانوکامپوزیتها

| ماده پایه | نانوذره | OD (nm) | درصد وزنی (wt%) | نماد کامپوزیت |
|-----------|---------|---------|-----------------|---------------|
| پارافین | MWCNTs | < ۸ | ۵ | A |
| پارافین | MWCNTs | ۱۰-۲۰ | ۵ | B |

علاوه بر این، افزایش نرخ رسانایی برای نانوذرات ۸ نانومتر به دلیل سطح ویژه بالاتر، بیش از ۱۰ تا ۲۰ نانومتر است.



شکل ۳: تغییرات هدایت الکتریکی با درصد نانوذرات

با توجه به شکل ۴، افزودن نانوذرات به پارافین، شکل نمودار DSC را تغییر نمی دهد. با این حال، حداکثر مقدار را کاهش می دهد که منجر به کاهش سطح زیرین نمودار می شود و در نتیجه میزان گرمای نهان را کاهش می دهد. برای پارافین، مقدار LHM ۱۸۷.۷۸ کیلوژول بر کیلوگرم در محدوده دمایی ۴۸,۰۱ تا ۵۹,۸۲ درجه سانتی گراد به دست آمد. در مقایسه، افزودن نانوذرات با قطرهای ۱۰-۲۰ و ۸ نانومتر LHM را به ترتیب به ۱۶۲,۰۲ و ۱۶۸,۵۸ کیلوژول بر کیلوگرم در همان محدوده دمایی کاهش می دهد.



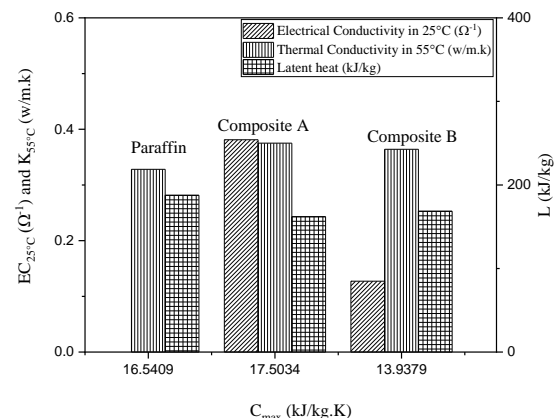
experimental validation of a PCM-Air heat exchanger model. Applied Thermal Engineering, 2017. **114**: p. 1064-1072.

4. Du, K., et al., *A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges.* Applied energy, 2018. **220**: p. 242-273.
5. Kinkelin, C., et al., *Theoretical and experimental study of a thermal damper based on a CNT/PCM composite structure for transient electronic cooling.* Energy conversion and management, 2017. **142**: p. 257-271.
6. Ali, H.M., et al., *Thermal management of electronics: An experimental analysis of triangular, rectangular and circular pin-fin heat sinks for various PCMs.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. **123**: p. 272-284.
7. Khan, M.M.A., et al., *Evaluation of solar collector designs with integrated latent heat thermal energy storage: a review.* Solar Energy, 2018. **166**: p. 334-350.
8. Shafieian, A., M. Khiadani, and A. Nosrati, *A review of latest developments, progress, and applications of heat pipe solar collectors.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **95**: p. 273-304.
9. Zhou, F., et al., *Study on the PCM flat-plate solar collector system with antifreeze characteristics.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019. **129**: p. 357-366.
10. Essa, M.A., N.H. Mostafa, and M.M. Ibrahim, *An experimental investigation of the phase change process effects on the system performance for the evacuated tube solar collectors integrated with PCMs.* Energy Conversion and Management, 2018. **177**: p. 1-10.
11. He, B., V. Martin, and F. Setterwall, *Phase transition temperature ranges and storage density of paraffin wax phase change materials.* Energy, 2004. **29**(11): p. 1785-1804.
12. Shima, P.D. and J. Philip, *Role of thermal conductivity of dispersed nanoparticles on heat transfer properties of nanofluid.* Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014. **53**(2): p. 980-988.
13. Das, P.K., *A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids.* Journal of Molecular Liquids, 2017. **240**: p. 420-446.
14. Guo, H. and N. Zhao, *Interfacial layer simulation and effect on Cu-Ar nanofluids thermal conductivity using molecular dynamics method.* Journal of Molecular Liquids, 2018. **259**: p. 40-47.
15. Sheikholeslami, M., *Solidification of NEPCM under the effect of magnetic field in a porous thermal energy storage enclosure using CuO*

شکل ۶: حرارت آزاد شده با زمان برای پارافین و نانوکامپوزیتها از طرفی افزودن نانوذرات به پارافین باعث کاهش میزان گرمای نهان شده است که برای سیستم های ذخیره انرژی مطلوب نیست. کامپوزیت A بالاترین مقدار هدایت حرارتی، هدایت الکتریکی و گرمای ویژه را نشان داده است.

نتیجه گیری و جمع بندی

بررسی افزودن نانوذرات به پارافین بر روی خواص ترموفیزیکی آن، کاهش گرمای نهان ذوب را نشان می دهد. با این حال، مشاهده می شود که افزودن نانوذرات به پارافین باعث بهبود هدایت حرارتی، هدایت الکتریکی و انتشار حرارتی ماده پایه می شود. افزودن نانوذرات با قطرهای ۲۰-۱۰ و ۸ نانومتر منجر به کاهش گرمای نهان به میزان ۱۰/۲۲ و ۱۳/۷۱ درصد، افزایش رسانایی حرارتی به ترتیب ۱۰/۹۷۵ و ۱۴/۳۲۹ درصد در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد می شود. با افزودن نانوذرات با قطر ۸ نانومتر، حداکثر مقدار گرمای ویژه ۱۵،۷۷ درصد کاهش می یابد. در مقایسه با افزودن نانوذرات با قطر ۱۰-۲۰ نانومتر، افزایش این مقدار به میزان ۵،۸ درصد مشاهده می شود. کلیه خواص ترموفیزیکی بررسی شده در شکل ۷ قابل مشاهده است



شکل ۷: نمودار مقایسه ای گرمای نهان، هدایت الکتریکی و حرارتی نانوکامپوزیت و پارافین در حداکثر ظرفیت حرارتی ویژه

مراجع

1. Khyad, A., et al., *Energy storage with PCMs: Experimental analysis of paraffin's phase change phenomenon & improvement of its properties.* J Mater Environ Sci, 2016. **7**(7): p. 2551.
2. Xu, B., P. Li, and C. Chan, *Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: a review to recent developments.* Applied Energy, 2015. **160**: p. 286-307.
3. Stathopoulos, N., M. El Mankibi, and M. Santamouris, *Numerical calibration and*



- Analysis and Calorimetry, 2009. **95**(2): p. 507-512.
27. Yu, Z.-T., et al., *Increased thermal conductivity of liquid paraffin-based suspensions in the presence of carbon nano-additives of various sizes and shapes*. Carbon, 2013. **53**: p. 277-285.
 28. Cui, Y., et al., *The experimental exploration of carbon nanofiber and carbon nanotube additives on thermal behavior of phase change materials*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011. **95**(4): p. 1208-1212.
 29. Kim, S. and L.T. Drzal, *High latent heat storage and high thermal conductive phase change materials using exfoliated graphite nanoplatelets*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2009. **93**(1): p. 136-142.
 30. Fan, L.-W., et al., *Heat transfer during melting of graphene-based composite phase change materials heated from below*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. **79**: p. 94-104.
 31. Yan, S.-R., et al., *Improving the thermal conductivity of paraffin by incorporating MWCNTs nanoparticles*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020: p. 1-8.
 32. Ali, A.H., et al., *Effect of nanomaterial addition on the thermophysical properties of Iraqi paraffin wax*. Case Studies in Thermal Engineering, 2019. **15**: p. 100537.
 33. Jawad, Q.A., et al., *Improve the performance of a solar air heater by adding aluminum chip, paraffin wax, and nano-SiC*. Case Studies in Thermal Engineering, 2020. **19**: p. 100622.
 34. Qu, Y., et al., *Experimental study on thermal conductivity of paraffin-based shape-stabilized phase change material with hybrid carbon nano-additives*. Renewable Energy, 2020. **146**: p. 2637-2645.
 35. Tang, B., et al., *A full-band sunlight-driven carbon nanotube/PEG/SiO₂ composites for solar energy storage*. Solar energy materials and solar cells, 2014. **123**: p. 7-12.
 36. Teng, T.P., B.G. Lin, and Y.Y. Yeh. *Characterization of heat storage by nanocomposite-enhanced phase change materials*. in *Advanced Materials Research*. 2011. Trans Tech Publ.
 37. Sedov, I.A., T.A. Muhametzyanov, and B.N. Solomonov, *A procedure for calibration of differential scanning calorimeters*. Thermochimica Acta, 2016. **639**: p. 10-13.
 16. Zerradi, H., et al., *Population balance equation model to predict the effects of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanofluids*. Journal of Molecular Liquids, 2016. **218**: p. 373-383.
 17. Sheikholeslami, M., *Numerical modeling of nano enhanced PCM solidification in an enclosure with metallic fin*. Journal of Molecular Liquids, 2018. **259**: p. 424-438.
 18. Lohrasbi, S., M. Sheikholeslami, and D.D. Ganji, *Discharging process expedition of NEPCM in fin-assisted latent heat thermal energy storage system*. Journal of molecular liquids, 2016. **221**: p. 833-841.
 19. Yan, S.-R., et al., *Sensitivity of adhesive and cohesive intermolecular forces to the incorporation of MWCNTs into liquid paraffin: experimental study and modeling of surface tension*. Journal of Molecular Liquids, 2020. **310**: p. 113235.
 20. Nitsas, M. and I. Koronaki, *Performance analysis of nanoparticles-enhanced PCM: An experimental approach*. Thermal Science and Engineering Progress, 2021. **25**: p. 100963.
 21. Dheep, G.R. and A. Sreekumar, *Influence of nanomaterials on properties of latent heat solar thermal energy storage materials—A review*. Energy conversion and management, 2014. **83**: p. 133-148.
 22. Kibria, M., et al., *A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials*. Energy Conversion and Management, 2015. **95**: p. 69-89.
 23. Nazir, H., et al., *Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019. **129**: p. 491-523.
 24. Zeng, J., et al., *Study of a PCM based energy storage system containing Ag nanoparticles*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2007. **87**(2): p. 371-375.
 25. Veerakumar, C. and A. Sreekumar, *Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications—A review*. international journal of refrigeration, 2016. **67**: p. 271-289.
 26. Zeng, J., et al., *Effects of MWNTs on phase change enthalpy and thermal conductivity of a solid-liquid organic PCM*. Journal of Thermal

ACEC2021-30699

امکانسنجی مصوبه تامین ۲۰ درصدی برق ساختمان های دولتی و عمومی با استفاده از انرژی خورشیدی در ۵۰۰ انشعاب پرمصرف شهرداری مشهد

امید ایزدپناهی^۱، سید مهدی سادات^۲، امیر صفایی نیکویی^۳، فرح نوش رستمی^۴

^۱مدیر ارشد اجرایی، شرکت آرکا انرژی سورین کاویان؛omid.izadpanahi@gmail.com

^۲رئیس اداره نظارت بر نگهداری و تعمیرات تاسیسات شهری، شهرداری مشهد؛sadat-m@mashhad.ir

^۳کارشناس تاسیسات برقی اداره نظارت بر نگهداری و تعمیرات تاسیسات شهری، شهرداری مشهد؛safaei-a@mashhad.ir

^۴مدیر واحد تحقیق و توسعه، شرکت آرکا انرژی سورین کاویان؛rostamifarahnosh@gmail.com

چکیده

در این پژوهش با توجه مصوبه شماره ۷۸۲۵۰/ت/۵۱۹۰۴ ه مورخ ۱۳۹۵/۰۶/۳۱ هیات محترم وزیران و به استناد اصل یک صد و سی و هشتم قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران، شهرداری مشهد به عنوان یک دستگاه های اجرایی جهت بررسی موشکافانه فنی و اقتصادی در جهت امکانسنجی احداث نیروگاه های خورشیدی در ۵۰۰ انشعاب پرمصرف آن انتخاب شده است. در ابتدا با بررسی اطلاعات حاصله از قبوض انشعابات شهرداری مشهد در سال ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ و بهره گیری از ابزار شبیه سازی پی وی سیستم، ظرفیت نیروگاه خورشیدی متناسب با مصوبه تامین انرژی ۲۰ درصد محاسبه شده است. هم چنین با در نظر گرفتن پارامتر بسیار مهم و اثر گذار "هزینه تراز شده انرژی" جهت شفاف سازی پروسه تصمیم گیری سازمان به منظور برنامه ریزی برای سرمایه گذاری و در انتخاب ظرفیت اجرایی نیروگاه های خورشیدی برای شهرداری مشهد پیشنهاداتی ارائه شده است. هم چنین در کنار امتیازات آتی اجتماعی و فرهنگی و محیط زیستی اجرای نیروگاه خورشیدی برای شهرداری مشهد، با توجه به الگوی مصرف انرژی این سازمان، میزان صرفه جویی اقتصادی سالیانه بصورت مستقیم و غیرمستقیم در صورت اجرای نیروگاه خورشیدی، تحلیل و گزارش شده است.

واژه های کلیدی: انرژی خورشیدی، شهرداری مشهد، مصوبه ۲۰ درصد، امکانسنجی، پی وی سیستم

مقدمه

از زمان بحران نفت در دهه ۷۰ میلادی، توجه به توسعه صنایع انرژی جایگزین در راستای کمتر شدن وابستگی به سوخت های فسیلی افزایش چشم گیری داشته است [۱]. انرژی خورشیدی به عنوانی یکی از منابع تامین انرژی پاک است که به روش های

گوناگون از گذشته مورد استفاده بشر قرار گرفته است. جایگزینی انرژی های فسیلی با انرژی های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی به منظور کاهش و صرفه جویی در مصرف انرژی، کنترل عرضه و تقاضای انرژی و کاهش انتشار گازهای آلاینده مورد استقبال قرار گرفته است [۲]. می توان بهره گیری از فناوری انرژی های خورشیدی را به عنوان سنجه ای برای رفاه عمومی و بهزیستی اجتماعی-اقتصادی تفسیر نمود و آن را به عنوان ابزاری قدرتمند برای نظارت بر برنامه ریزی توسعه اجتماعی-اقتصادی برای سنجش میزان برآورده شدن نیازهای روانی و مادی جامعه و خانواده تعریف نمود که متکی به شاخص های ذهنی یا کیفی و هم چنین متکی به شاخص های عینی و کمی است [۳]. فناوری انرژی خورشیدی می تواند با افزایش کارایی و مشارکت توسعه، ارتقا و بهبود شیوه زندگی و کاهش هزینه در ارائه خدمات در سطح خرد و کلان کشورها مورد بهره برداری قرار گیرد. هم چنین بهره گیری از انرژی های پاک هم چون انرژی خورشیدی می تواند در صورت به کارگیری مناسب، نقشی پر رنگ در تسریع توسعه و پویایی اجتماعی و اقتصادی و بهبود وضعیت کالبدی کشورهای در حال توسعه ایفا نماید [۴]. منابع انرژی های تجدیدپذیر هم چون انرژی خورشیدی به عنوان منابع بومی-محلی، در تامین انرژی مورد نیاز جوامع، کمتر تحت تاثیر شرایط سیاسی، اجتماعی و اقتصادی منطقه ای و بین المللی قرار می گیرند. لذا توجه به تامین انرژی از این منابع می تواند به افزایش امنیت ملی کشور کمک چشمگیری نماید. در شرایط بحرانی در جهان به دلیل حنگ و درگیری های سیاسی، حامل های عمده انرژی هم چون سوخت های فسیلی به شدت تحت تاثیر قرار می گیرند که موجب افزایش و کاهش تولید و به تبع آن افزایش و کاهش قیمت آن ها جوامع گوناگونی را در دنیا متاثر می سازد. در صورت بهره گیری بخش اعظم سهم انرژی کشور ها از منابع

اساسی جمهوری اسلامی ایران، در خصوص الزام تامین ۲۰ درصد برق مصرفی وزارتخانه ها، موسسات و شرکت های دولتی و نهادهای عمومی غیردولتی از انرژی های تجدید پذیر و توجه به این موضوع که منابع منطبق بر اقلیم ایران همچون باد، خورشید، زمین گرمایی، آب و سوخت های زیستی شامل می شوند. لازم به ذکر است در صورت عدم اجرای مصوبه مذکور در مهلت قانونی، ۲۰ درصد برق مصرفی با نرخ خرید تضمینی برق (به ازای هر کیلووات ساعت در سال ۱۳۹۷ به میزان ۸۰۰۰ ریال) محاسبه خواهد شد.

تعریف مساله

با توجه به افزایش شهر نشینی، نقش شهرداری به عنوان یک نهاد مردمی، جهت حفاظت از حقوق شهروندان بالاخص در کلان شهرها روز به روز پر رنگ تر می گردد و چالش های جدیدی برای این نهاد بوجود می آورد. مسائلی هم چون حفظ کیفیت مناسب زندگی شهروندی و کنترل آلودگی هوا نیز به وظایف شهرداری ها در کلان شهرها اضافه شده است. شهر مشهد به عنوان بزرگترین کلان شهر کشور پس از پایتخت و بزرگترین شهر مذهبی زیارتی در منطقه، با چالش های عدیده ای مواجه است. یکی از کارآمدترین روش های مواجه با این دسته چالش ها، حرکت شهرها به سمت شهر پایدار می باشد. شهر پایدار یا شهر محیط زیستی به شهری گفته می شود که در این شهرها مصرف انرژی، آب و منابع تجدید ناپذیر در حداقل ممکن است. مردم ساکن در اینگونه شهرها کمترین میزان مصرف انرژی، آب و اتلاف مواد غذایی و گرما را دارند. در نتیجه آلودگی آب و هوا و تولید گازهایی مضر مانند متان یا CO₂ بسیار پایین است. سقف هر خانه ای در این شهر مجهز به پنل های خورشیدی بر روی پشت بامها می باشد. بصورت کلی انرژی های تجدید پذیر یکی از اصول ایجاد شهر پایدار می باشند. حال می توان از شهرداری به عنوان یک نهاد ترویج دهنده جهت تشویق شهروندان به استفاده از انرژی های تجدیدپذیر یاد نمود؛ بصورتیکه شهرداری با استفاده از زیرساخت های موجود خود با پیاده سازی و اجرای نیروگاه های خورشیدی اولاً سهم خود را در مسیر تبدیل شدن به یک شهر پایدار ایفا کرده، در ثانی با نمایش آثار استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به شهروندان، آن ها را به سوی استفاده از انرژی های تجدیدپذیر و پاک تشویق نماید.

در این پژوهش با توجه به مصوبه تامین انرژی ۲۰ درصد مورخ ۱۳۹۶/۰۴/۲۵ هیئت محترم وزیران، شهرداری مشهد به عنوان یک دستگاه های اجرایی جهت بررسی موشکافانه در جهت امکانسنجی احداث نیروگاه های خورشیدی در ۵۰۰ انشعاب پرمصرف آن انتخاب شده است. در ادامه این پژوهش به دنبال دستیابی به پاسخ سوالات زیر می باشد:

تجدیدپذیر، در چنین شرایطی کمتر تحت تاثیر قرار می گیرند. این مساله به ذات در دستیابی به اهداف توسعه پایدار کشورها موثر خواهد بود. برای کشور ایران نیز بهترین راهبرد در مسیر گسترش نیروگاه ها و منابع تولیدکننده انرژی های تجدیدپذیر خواهد بود [۵].

براساس گزارش سال ۲۰۲۰ آژانس بین المللی انرژی^۱ ظرفیت نصب شده فقط در نیروگاه های فتوولتائیک (خورشیدی) نزدیک به ۴۹۵،۴ گیگاوات می باشد که کشورهای چین با ۱۷۵ گیگاوات، امریکا با ۶۲،۵ گیگاوات، ژاپن با ۵۶ گیگاوات، آلمان با ۴۵ گیگاوات و هندوستان با ۲۸ گیگاوات پنج کشور برتر در تولید انرژی پاک از انرژی خورشید می باشند. مقایسه آمار تولید انرژی تجدیدپذیر ایران با کشورهای پیشرفته نشان دهنده فاصله و پتانسیل بالا برای توسعه هرچه بیشتر ظرفیت نیروگاه های تجدیدپذیر در کشور می باشد. براساس مستندات بنیاد غیرانتفاعی بین المللی "پروژه افشا کربن"^۲، بالغ بر ۱۰۰ شهر در حال حاضر بیش از ۷۰ درصد انرژی مصرفی خود را از انرژی های تجدیدپذیر تامین می کنند. از شهرهای معروف در این لیست به شهرهای پرتو در کشور پرتغال، مونترئال در کانادا، باسل در سوئیس، اسلو در نروژ می توان اشاره نمود.

سیاست گذاری ملی در بخش انرژی های تجدیدپذیر

اهمیت سیاست گذاری در حوزه انرژی های تجدیدپذیر همواره به عنوان یکی از الویت های استراتژیک جهانی مطرح بوده است. هفتمین هدف از اهداف هفده گانه سند دستور کار توسعه سازمان ملل "تامین انرژی پاک" است. در اسناد فرادست ملی نیز از اصل ۵۰ قانون اساسی استنباط می گردد که انرژی های فسیلی بدلیل آلاینده و آسیب مخرب به محیط زیست، به حداقل مصرف سمت و سو پیدا کنند و انرژی های پاک گسترش یابند. هم چنین صراحتاً در ماده ۶۲ قانون اصلاح الگوی مصرف^۳، وزارتخانه های نیرو و نفت موظف به ترویج کاربرد اقتصادی منابع تجدیدپذیر انرژی در سامانه هایی همانند سامانه های فتوولتائیک شده اند. هم چنین آن ها را به حمایت از این طرح ها از محل بودجه های مصوب سالانه خود یا منابع مذکور در ماده ۷۳ این قانون ملزم کرده است. ماده ۱۹ هوای پاک^۴ نیز وزارت نیرو را به توسعه، تولید و عرضه انرژی های تجدیدپذیر و پاک بهینه به نحوی که حداقل سی درصد افزایش سالانه ظرفیت مورد نیاز برق کشور از انرژی های تجدیدپذیر تامین گردد، مکلف کرده است. در بخش اول بند هشتم از سیاست های کلی ابلاغی از سوی مقام معظم رهبری در حوزه محیط زیست^۵ نیز بر گسترش اقتصاد سبز بر پایه صنعت کم کربن و استفاده از انرژی های پاک تاکید شده است [۶].

با عنایت به مصوبه شماره ۷۸۲۵۰/ت/۵۱۹۰۴ ه مورخ ۱۳۹۵/۰۶/۳۱ هیات محترم وزیران و به استناد اصل یک صد و سی و هشتم قانون

^۴ مصوب مجلس شورای اسلامی به تاریخ ۱۳۹۶/۰۴/۲۵ با

شماره ۴۰۳۸۲/۸۳

^۵ رهبر معظم انقلاب اسلامی در تاریخ ۱۳۹۴/۰۸/۲۶

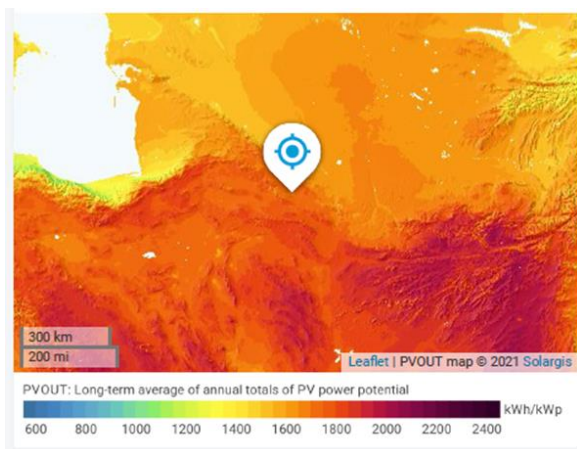
^۱ International Energy Agency

^۲ Carbon Disclosure Project

^۳ مصوب مجلس شورای اسلامی به تاریخ ۱۳۸۹/۱۲/۰۴ با شماره ۱۷۷۰

مشهد با در نظر گرفتن شرایط جغرافیایی آن می‌باشد. به همین منظور با استناد به مراجع معتبر بین‌المللی موجود در این زمینه در قالب اطلس جهانی خورشیدی [۷-۹]، و هم چنین نتایج به دست آمده از شبیه سازی یک نیروگاه خورشیدی ۱۰۰ کیلوواتی در نرم افزار شبیه سازی نیروگاه فتوولتائیک پی وی سیستم^۶ و با وارد نمودن مشخصات جغرافیایی شهر مشهد با طول جغرافیایی "۳۶°۳۶'۲۱" و عرض جغرافیایی "۵۱°۱۷'۳۶"، میزان انرژی تولیدی سالانه به ازای هر کیلووات توان نیروگاه خورشیدی محاسبه می‌گردد.

هیت مپ^۷ میزان انرژی تولیدی به ازای هر کیلووات نیروگاه خورشیدی نصب شده برای شهر مشهد و موقعیت‌های جغرافیای مجاور آن در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱ هیت مپ میزان انرژی تولیدی نیروگاه خورشیدی در مشهد

همانطور که مشاهده می‌شود، شهر مشهد یکی از نقاط داغ برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشد به گونه‌ای که میزان انرژی تولیدی توسط هر کیلووات نیروگاه خورشیدی در محدوده ۱۶۰۰ تا ۱۸۰۰ کیلووات-ساعت می‌باشد.

شکل ۲ نیز کل انرژی تولیدی توسط یک کیلووات نیروگاه خورشیدی را برای ساعات مختلف در ماه‌های مختلف شهر مشهد نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در ماه دسامبر (دی‌ماه) کمترین میزان انرژی و در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر (خرداد تا شهریور) بیشترین میزان انرژی تولیدی توسط هر کیلووات نیروگاه خورشیدی قابل انتظار است [۱۰].

- هر یک از انشعابات پر مصرف شهرداری مشهد با توجه به مصوبه ۲۰ درصد، چه ظرفیت قابل نصب جهت احداث نیروگاه خورشیدی دارا می‌باشند؟
- هزینه سرمایه گذاری نیروگاه‌های خورشیدی قابل اجرا در انشعابات پر مصرف چه مقدار می‌باشد؟
- میزان صرفه جویی اقتصادی حاصل از اجرای مصوبه ۲۰ درصد برای شهرداری مشهد در صورت اجرای نیروگاه خورشیدی چه مقدار است؟

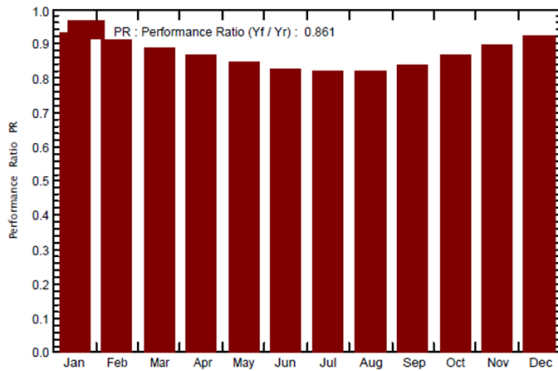
گردآوری و ارزیابی اطلاعات انشعابات

به منظور استخراج ظرفیت نیروگاه خورشید مورد نیاز برای نصب به منظور برآورده کردن طرح ۲۰ درصد مصرف انشعابات شهرداری، نیاز به استخراج متوسط مصرف سالانه هر انشعاب می‌باشد. با توجه به داده‌های فراهم شده از قبوض برق در سال ۱۳۹۹، به طور کلی ۳۴۴۲ انشعاب منحصر به فرد با مالکیت شهرداری مشهد وجود دارد که باید مصرف سالانه آن‌ها ارزیابی گردد. بایستی توجه داشت که با استناد به داده‌های مربوط به سال ۱۳۹۸ و مقایسه آن‌ها با داده‌های سال ۱۳۹۹ می‌توان اینگونه برداشت نمود که برخی از انشعابات تنها مربوط به سال ۱۳۹۸ بوده و از لیست انشعابات مربوط به شهرداری حذف گردیده‌اند. بنابراین این دسته از انشعابات که عملاً دیگر وجود خارجی ندارند؛ از حلقه ارزیابی‌ها خارج و تنها انشعابات منحصر به فردی که در لیست سال ۱۳۹۹ وجود دارند، مورد ارزیابی هر چه بیشتر قرار گرفته‌اند. همانطور که اشاره شد، برای استخراج ظرفیت ۲۰ درصد نیروگاه‌های خورشیدی، نیاز به محاسبه متوسط مصرف سالانه انشعاب می‌باشد. برای این منظور با توجه به قبوض ثبت شده برای انشعابات با رمز رایانه‌های منحصر به فرد موجود در لیست سال ۱۳۹۹، این توان متوسط سالانه محاسبه می‌شود. در همین راستا ابتدا مجموع کیلووات-ساعت مصرفی هر انشعاب برای تعداد روزهای موجود محاسبه و سپس با تقسیم بر تعداد روزها، متوسط مصرف روزانه محاسبه می‌شود. بایستی توجه داشت که به منظور افزایش دقت محاسبات و برآوردها، کلیه داده‌های مربوط به هر انشعاب در هر دو سال مدنظر قرار داده شده‌اند. به عبارت دیگر، میزان مصرف درج شده برای انشعاباتی که هم در لیست سال ۹۹ وجود دارند و هم در سال ۹۸ با یکدیگر جمع گردیده و بر کل تعداد روزهای مصرف تقسیم شده است. با استفاده از داده‌ها هر دو سال، به دلیل افزایش تعداد روزها، متوسط مصرف روزانه محاسبه شده دقیق‌تر خواهد بود. بعد از محاسبه متوسط مصرف روزانه با ضرب این مقدار بر تعداد روزهای سال یعنی ۳۶۵، متوسط مصرف سالانه بدست می‌آید.

حال ۲۰ درصد از این متوسط مصرف سالانه باید توسط نیروگاه‌های خورشیدی تامین گردد. برای این موضوع نیاز به مشخص نمودن میزان انرژی تولیدی توسط یک کیلووات نیروگاه خورشیدی در شهر

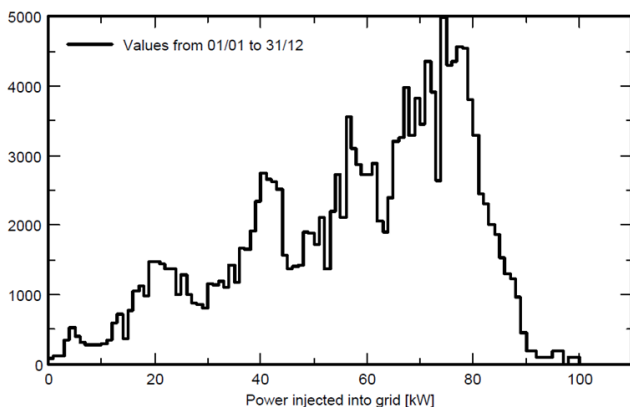


همانطور که مشاهده می شود، نتایج شبیه سازی با استفاده از نرم افزار پی وی سیستم نیز نتایج سایر مراجع معتبر را تایید نموده به گونه ای که بیشترین انرژی تولیدی برای هر کیلووات نیروگاه خورشیدی در ماه های ژوئن تا سپتامبر بدست می آید. نرخ عملکرد یا همان بازده نیروگاه خورشیدی برای ماه های مختلف نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ نرخ عملکردی نیروگاه خورشیدی در ماه های مختلف

مطابق با انتظار، در ماه های ژوئن تا سپتامبر که میزان توان تولیدی توسط نیروگاه خورشیدی در مقدار ماکزیمم خود قرار دارد، نسبت تلفات به توان خالص خروجی محسوس تر می باشد. شکل ۶ نیز میزان انرژی تولیدی توسط یک نیروگاه خورشیدی ۱۰۰ کیلووات را به ازای توان تولیدی مختلف و برای یکسال کامل نشان می دهد. با توجه به اینکه انرژی تولیدی توسط نیروگاه برابر با توان تولیدی توسط آن در زمان می باشد، با استفاده از این نمودار، می توان تعداد ساعاتی که یک میزان توان خاص توسط نیروگاه تولید می شود را محاسبه نمود. همانطور که مشاهده می شود و با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی شهر مشهد، نیروگاه ۱۰۰ کیلووات شبیه سازی شده، برای ساعات خیلی اندکی در توان نامی خود کار می کند. توان ۷۵ کیلووات توانی است که نیروگاه خورشیدی بیشترین ساعات را در آن کار می کند.

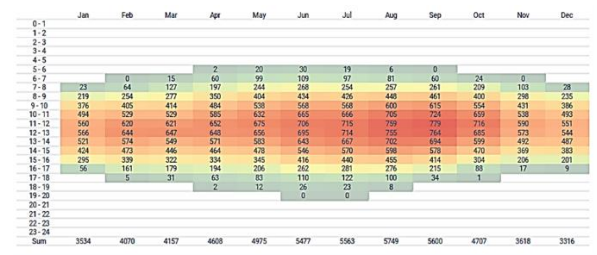


شکل ۶ میزان انرژی الکتریکی تزریق شده برحسب توان الکتریکی تولیدی توسط یک نیروگاه خورشیدی ۱۰۰ کیلووات در مشهد



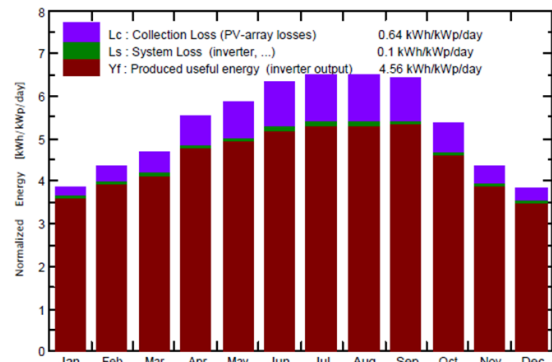
شکل ۲ کل انرژی تولیدی توسط هر کیلووات نیروگاه خورشیدی در ماه های مختلف (وات-ساعت)

به منظور بررسی جزئی تر، میزان انرژی تولیدی در ساعات مختلف در ماه های گوناگون نیز به صورت نشان داده شده در شکل ۳ خواهد بود.



شکل ۳ میزان انرژی تولیدی توسط هر کیلووات نیروگاه خورشیدی در ساعات مختلف ماه های سال برای شهر مشهد (وات-ساعت)

به منظور تایید هر چه بیشتر نتایج بدست آمده در فوق، به شبیه سازی یک سیستم ۱۰۰ کیلوواتی نصب شده در شهر مشهد با استفاده از نرم افزار پی وی سیستم پرداخته می شود. شکل ۴ نتایج حاصل از شبیه سازی را که در برگزیده تلفات پنل، تلفات اینورتر و همچنین انرژی متوسط خالص تزریقی به شبکه به ازای هر کیلووات نیروگاه خورشیدی را برای ماه های مختلف نشان می دهد.



شکل ۴ متوسط انرژی تولیدی ماهانه توسط هر کیلووات نیروگاه خورشیدی در شهر مشهد



احداث نیروگاه های فوق الذکر پرداخته خواهد شد. در معادله (۱) روش محاسبه هزینه تراز شده انرژی آمده است.

$$LCOE = \frac{\text{مجموع هزینه ها در طول عمر نیروگاه}}{\text{مجموع انرژی تولید شده در طول عمر نیروگاه}} \quad (1)$$

هم چنین مجموع هزینه های در طول عمر نیروگاه شامل مجموع هزینه های احداث نیروگاه و هزینه های تعمیر نگهداری در طول عمر نیروگاه می باشد. با در نظر گرفتن معادلات فوق می توان برای ظرفیت های متداول نیروگاه های فتوولتاییک پارامتر هزینه تراز شده انرژی را محاسبه نمود و جهت مقایسه و تصمیم گیری برای بازدید از انشعابات منتخب و ادامه روند این پژوهش بهره برد.

هزینه تعمیر و نگهداری نیروگاه خورشیدی فتوولتاییک وابسته به موارد زیر است: (براساس گزارش وزارت انرژی آمریکا^۱)

- موقعیت نیروگاه: میزان ساعات عملیاتی (کارکرد) نیروگاه و قابلیت دسترسی به نیروگاه
 - نوع سیستم: نصب بر روی سقف، نصب بر روی زمین، سیستم دارای جهت یاب
 - تجهیزات: تعداد ماژول ها فتوولتاییک (پنل ها)، تعداد و نوع اینورتر ها، شرایط گارانتی و پشتیبانی
 - شرایط محیطی نیروگاه: برف، گرده افشانی گل ها، جمعیت پرندگان، شن و گرد و غبار، رطوبت، حرارت، تند باد، ذرات نمک، تگرگ، دوده دیزل، آلاینده های صنعتی
- با عنایت به این موضوع که براساس مصوبه هیئت وزیران ۱۵۳۴۴۰/ت/۵۲۳۷۵ ه مورخ ۱۳۹۴/۱۱/۲۱ و آخرین مصوبه الحاقی در سال ۱۴۰۰ و سطح بندی برای ظرفیت نیروگاه فتوولتاییک و واردات تجهیزات مرتبط نیروگاهی متناظر با این دسته بندی، می توان ظرفیت های زیر را برای نیروگاه های خورشیدی در کشور ایران به شرح جدول شماره ۱ در نظر گرفت.

| جدول ۱: سطح بندی نیروگاه خورشیدی در ایران | | |
|-------------------------------------------|-------------|-------------|
| ردیف | نوع نیروگاه | ظرفیت (kW) |
| ۱ | خانگی | ۵ الی ۲۰ |
| ۲ | تجاری | ۲۱ الی ۲۰۰ |
| ۳ | صنعتی | ۲۰۰ به بالا |

با توجه به مفروضیات فوق الذکر و گزارش آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر آمریکا^{۱۱} در سال ۲۰۲۰ هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه نیروگاه فتوولتاییک در ایران به ازای هر کیلووات توان (با در نظر

با در نظر گرفتن هر سه مرجع (متوسط گیری از نتایج بدست آمده در مراجع)، انرژی تولیدی توسط هر کیلووات نیروگاه خورشیدی نصب شده در مشهد برابر با ۱۶۳۳ کیلووات-ساعت در سال در نظر گرفته می شود. حال با توجه به مشخص شدن متوسط انرژی تولید سالیانه توسط هر کیلووات پنل و همچنین محاسبه ۲۰ درصد متوسط مصرف سالیانه هر انشعاب می توان ظرفیت نیروگاه خورشیدی را براساس مصوبه ۲۰ درصد، محاسبه نمود. این کار با ضرب متوسط انرژی مصرفی سالیانه هر انشعاب در ضریب ۰/۲ و سپس تقسیم حاصل آن بر ۱۶۳۳ محاسبه می شود. با استناد به برنامه نوشته شده در نرم افزار متلب^۸ برای ادغام داده های موجود برای سال های ۹۸ و ۹۹، استخراج ۳۴۴۲ انشعابات منحصر به فرد، محاسبه تعداد روزهای مصرف، محاسبه مقدار انرژی مصرف شده و در نهایت محاسبه متوسط انرژی مصرف سالیانه هر انشعاب، ظرفیت نیروگاه خورشیدی براساس مصوبه تامین ۲۰ درصد انرژی محاسبه شده است. براساس نتایج بدست آمده از برنامه، ظرفیت محاسبه شده مجموع نیروگاه های خورشیدی براساس مصوبه تامین برق ۲۰ درصد هیات وزیران برای ۳۴۴۲ انشعاب برابر با ۱۳۷۱۸ کیلووات می باشد. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود براساس محاسبات انجام شده، مجموع ظرفیت نیروگاه های خورشیدی مربوط به ۵۰۰ انشعاب پرمصرف شهرداری مشهد معادل ۱۱۷۲۸ کیلووات می باشد که نقش پر رنگ این ۵۰۰ انشعاب نسبت به بقیه انشعابات در مصرف سالیانه انرژی را نمایان می سازد.



شکل ۷ سهم ۵۰۰ انشعاب پرمصرف از کل نیروگاه های خورشیدی شهرداری مشهد

در ادامه روند پژوهش حاضر، در این فاز پس از بررسی اولیه انشعابات و استخراج ظرفیت تخمینی نیروگاه خورشیدی هر انشعاب بر اساس ۲۰ درصد مصرف سالیانه، با در نظر گرفتن پارامتر کلیدی هزینه تراز شده انرژی^۹ به بررسی این پارامتر در ظرفیت های متداول نیروگاه های خورشیدی فتوولتاییک جهت شفاف سازی پروسه تصمیم گیری سازمان به منظور برنامه ریزی برای سرمایه گذاری و

^{۱۰} US Department of Energy

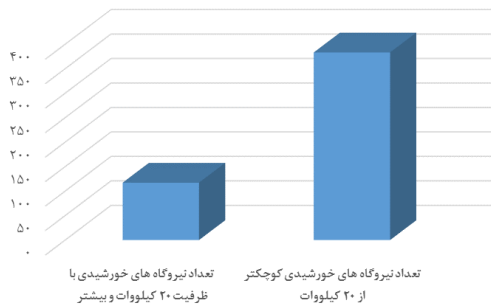
^{۱۱} National Renewable Energy Laboratory (NREL)

^۸ Mathworks Matlab

^۹ LCOE-levelized cost of energy

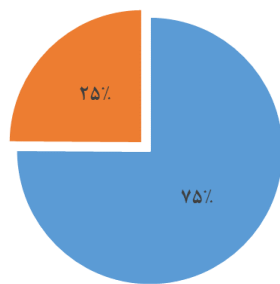
نتایج

محاسبات فوق مشخص می نماید احداث نیروگاه فتوولتاییک به ظرفیت ۲۰ کیلووات در مقابل احداث و نیروگاه های ۵ کیلووات تک فاز، ۲۰ درصد هزینه احداث را کاهش می دهد و هم چنین ۲۶ درصد هزینه تراز شده انرژی (هزینه تمام شده انرژی در طول مدت بهره برداری ۲۰ ساله نیروگاه) را کاهش می دهد. هم چنین در مقام قیاس، احداث نیروگاه فتوولتاییک ۲۰ کیلووات به نسبت نیروگاه های ۵ کیلووات سه فاز، ۳۳ درصد هزینه احداث را کاهش و ۳۹ درصد هزینه تراز شده انرژی را کاهش می دهد. در شکل ۸ تعداد انشعابات با ظرفیت نیروگاه خورشیدی ۲۰ کیلووات و بالاتر در بین ۵۰۰ انشعاب پرمصرف نشان داده شده است.



شکل ۸ تعداد نیروگاه های خورشیدی در ۵۰۰ انشعاب پرمصرف

در شکل ۹ مجموع سهم ظرفیت نیروگاه های خورشیدی ۲۰ کیلووات و بالاتر در بین ۵۰۰ انشعاب پرمصرف شهرداری مشهد بررسی شده است.



مجموع ظرفیت نیروگاه های کوچکتر از ۲۰ کیلووات ۲۵٪، مجموع ظرفیت نیروگاه های ۲۰ کیلووات و بیشتر ۷۵٪

شکل ۹ سهم نیروگاه های خورشیدی ۲۰ کیلووات و بیشتر از ۵۰۰ انشعاب با در نظر گرفتن تنوع در کاربری و متناسب با آن تنوع در تعرفه های انرژی در انشعابات شهرداری مشهد و اطلاعات بدست آمده از قبوض سال ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ شهرداری مشهد، بصورت میانگین تعرفه هر کیلووات ساعت انرژی مصرفی در انشعابات شهرداری مشهد معادل ۲۸۹۵ ریال می باشد. لذا اجرای کامل تعهدات مصوبه تامین ۲۰ درصد انرژی برای شهرداری مشهد عایدی سالیانه بالغ بر ۷۱ میلیارد ریال را می تواند از طریق صرفه جویی در پرداخت هزینه

گرفتن نرخ تبدیل دلار به ریال در زمان نگارش این پژوهش (۱دلار = ۲۳۸،۰۶۰ ریال) به شرح جدول ۲ می باشد.

جدول ۲: هزینه تعمیر و نگهداری نیروگاه سالانه خورشیدی در ایران

| ردیف | نوع نیروگاه | (کیلووات/دلار) | (کیلووات/ریال) |
|------|-------------|----------------|----------------|
| ۱ | خانگی | ۲۸،۹۴ | ۶،۸۸۹،۴۵۶ |
| ۲ | تجاری | ۱۸،۵۵ | ۴،۴۱۶،۰۱۳ |
| ۳ | صنعتی | ۱۶،۳۲ | ۳،۸۸۵،۱۳۹ |

با توجه به گزارش آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر امریکا هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه نیروگاه های فتوولتاییک تجاری ۳۶ درصد کمتر از نیروگاه های خانگی می باشد.

در ادامه با اخذ استعلام از پیمانکاران ذی صلاح شرکت توزیع برق مشهد، هزینه احداث نیروگاه فتوولتاییک برای ظرفیت های ۵ کیلووات تک فاز و سه فاز، ۲۰ کیلووات و ۵۰ و ۱۰۰ کیلووات اخذ شده است. در گام بعد به محاسبه پارامتر هزینه تراز شده انرژی پرداخته خواهد شد. قابل ذکر است عمر بهره برداری نیروگاه ۲۰ ساله در نظر گرفته شده است. سپس میزان تولید انرژی نیروگاه های خورشیدی برای ظرفیت های فوق توسط نرم افزار پی وی سیست برای شهر مشهد شبیه سازی شده است. در جدول ۳ هزینه احداث و مجموع هزینه تعمیر و نگهداری نیروگاه خورشیدی در طول ۲۰ سال آمده است.

جدول ۳: هزینه احداث و مجموع هزینه تعمیر و نگهداری ۲۰ ساله (میلیون ریال)

| ردیف | ظرفیت نیروگاه | هزینه احداث | تعمیر و نگهداری |
|------|-----------------|-------------|-----------------|
| ۱ | ۵ کیلووات تکفاز | ۱۰۳۰ | ۶۸۹ |
| ۲ | ۵ کیلووات ۳ فاز | ۱۲۵۰ | ۸۳۶ |
| ۳ | ۲۰ کیلووات | ۳۳۵۰ | ۱۷۶۶ |
| ۴ | ۵۰ کیلووات | ۷۵۰۰ | ۴۴۱۶ |
| ۵ | ۱۰۰ کیلووات | ۱۴۵۰۰ | ۸۸۳۲ |

در جدول ۴ مجموع تولید انرژی ۲۰ ساله نیروگاه خورشیدی به همراه هزینه تراز شده انرژی محاسبه شده ارائه شده است.

جدول ۳: هزینه تراز شده انرژی برای ظرفیت های نیروگاه خورشیدی

| ردیف | ظرفیت نیروگاه | مجموع تولید (کیلووات ساعت) | LCOE (کیلووات ساعت/ریال) |
|------|-----------------|----------------------------|--------------------------|
| ۱ | ۵ کیلووات تکفاز | ۱۵۰،۲۲۷ | ۱۱۴۴۲ |
| ۲ | ۵ کیلووات ۳ فاز | ۱۵۰،۲۲۷ | ۱۳۸۸۴ |
| ۳ | ۲۰ کیلووات | ۶۰۰،۹۰۹ | ۸۵۱۴ |
| ۴ | ۵۰ کیلووات | ۱،۵۰۲،۲۵۰ | ۷۹۳۲ |
| ۵ | ۱۰۰ کیلووات | ۳،۰۰۴،۵۰۰ | ۷۷۶۶ |



مراجع

- [۱] شریفیان امیر، رضایی دولت آبادی حسین. ارائه مدلی به منظور رتبه بندی پیشران های استراتژیک انرژی تجدیدپذیر با استفاده از رویکرد ترکیبی دلفی، دیمتل و تحلیل شبکه ای (فازی).
- [۲] همایونی فر، مسعود، ادیبیان، محمدصادق، گرجی پور، مهاجری، مسعود. انرژی خورشیدی، فرصت ها و چالش ها. “دومین همایش ملی انرژی های نو و پاک” ۲۰۱۳. Dec 5.
- [3] Epley DR, Menon M. A method of assembling cross-sectional indicators into a community quality of life. *Social Indicators Research*. 2008 Sep;88(2):281-96.
- [۴] شفیع ثابت، زارع خلیلی، توکلی، سهلا. سنجش پتانسیل های انرژی خورشیدی در توسعه سکونتگاه های روستایی مورد: شهرستان مرودشت. *اقتصاد فضا و توسعه روستایی*. ۲۰۱۷. Dec 10;6(21):101-20.
- [۵] موسوی شفائی، مسعود، نوراللهی، یونس، رضایان قیه باشی، احد، یوسفی، رضایان، علی حسین. امنیت انسانی و چالش های توسعه انرژی های تجدیدپذیر در ایران، با تاکید بر امنیت زیست محیطی. *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*. ۲۰۱۶. Nov 21;18(ویژه نامه شماره ۲):۱۶۷-۸۰.
- [۶] برومند، امیرعلی، طباطبائی یزدی. سرمایه گذاری بر انرژی های پاک) انرژی خورشیدی (، بستر کارآفرینی و توسعه پایدار در ایران. *In* دومین کنفرانس ملی علوم و مهندسی محیط زیست و توسعه پایدار ۲۰۲۰. Feb 6.
- [7] <https://solargis.com/>
- [8] <https://www.esmap.org/>
- [9] <https://www.worldbank.org/>
- [10] <https://globalsolaratlas.info/>

انرژی به همراه داشته باشد. هم چنین با در نظر گرفتن این موضوع که اجرای نیروگاه خورشیدی براساس مصوبه فوق الذکر و تعرفه تجدیدپذیر ۸۰۰۰ ریالی به ازای هر کیلووات ساعت، می تواند از هزینه گزاف تنبیهی (در صورت عدم اجرای نیروگاه های خورشیدی) سالانه ۱۹۵ میلیارد ریالی برای شهرداری مشهد جلوگیری نماید.

نتیجه گیری و جمع بندی

با تکیه بر پارامترهای فنی و اقتصادی موثر بر تصمیم گیری در حوزه سرمایه گذاری و احداث نیروگاه های فتوولتاییک مانند هزینه اولیه احداث نیروگاه، هزینه های مرتبط در طول زمان بهره برداری نیروگاه (هزینه تعمیر و نگهداری)، برآورد هزینه فایده احداث نیروگاه فتوولتاییک (هزینه تراز شده انرژی) و هم چنین افزایش قابلیت دسترسی مدیریت تعمیر و نگهداری با ایجاد تمرکز گرایی و سهولت در بهره برداری و حراست از نیروگاه فتوولتاییک، می توان نتیجه گرفت تصمیم گیری در سرمایه گذاری و احداث نیروگاه فتوولتاییک در هریک از انشعابات شهرداری با در نظر گرفتن ظرفیت ۲۰ کیلووات و بیشتر، براساس شاخص های فنی و اقتصادی بهینه تر و مقرون به صرفه تر خواهد بود.

هم چنین اجرای کامل تعهدات مصوبه تامین انرژی ۲۰ درصدی هیات وزیران باعث صرفه جویی ریالی به میزان ۲۰ درصد در هزینه انرژی سالانه شهرداری مشهد و همچنین باعث می شود براساس الگوی مصرف این سازمان از جریمه به میزان ۵۵ درصد هزینه انرژی سالانه (در صورت عدم اجرای مصوبه توسط هر سازمان) جلوگیری نماید.

ACEC2021-34834

بررسی آزمایشگاهی آرایش خازنهای ژنراتورهای القایی خود تحریک برای توربین های بادی و آبی کوچک

علیرضا باقری^۱، روح الله فدایی نژاد^{۲*}

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی برق قدرت و کنترل، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان؛

alireza.bagheri@student.kgut.ac.ir

^{۲*}دانشیار گروه مهندسی برق قدرت و کنترل، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان؛ rfadaein@kgut.ac.ir

چکیده

به دلیل گستردگی استفاده از موتورهای القایی در سیستم های بادی و آبی به عنوان ژنراتورهای القایی، در این پژوهش سعی شده تا آرایشهای مختلف و مقادیر مناسب خازن برای استفاده از موتور القایی سه فاز که به عنوان یک ژنراتور با خروجی تکفاز مورد استفاده قرار می گیرد بررسی شود. به این منظور ابتدا مشخصه اشباع مغناطیسی یک موتور القایی سه فاز ۱،۵ کیلو وات در آزمایشگاه به دست آورده شد، سپس با نرم افزار سیمولینک-متلب پیکربندی ها با آرایش خازن های مختلف شبیه سازی شد. همچنین به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده و بررسی آزمایشگاهی پیکربندی ها، موتور القایی سه فاز ۱،۵ کیلو وات با یک موتور القایی ۱۱ کیلو وات به عنوان محرک اولیه متصل شدند و تاثیر بار های مقاومتی و موتوری به روی خروجی ژنراتور به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده تنظیم ولتاژ در برخی از این آرایش ها مناسب بوده و قابلیت استفاده برای توربینهای بادی و آبی کوچک که در مناطق دور افتاده هستند را به راحتی فراهم می کند.

واژه های کلیدی: ژنراتورهای القایی، خود تحریک، توربین های بادی، توربین های آبی، موتور تک فاز

مقدمه

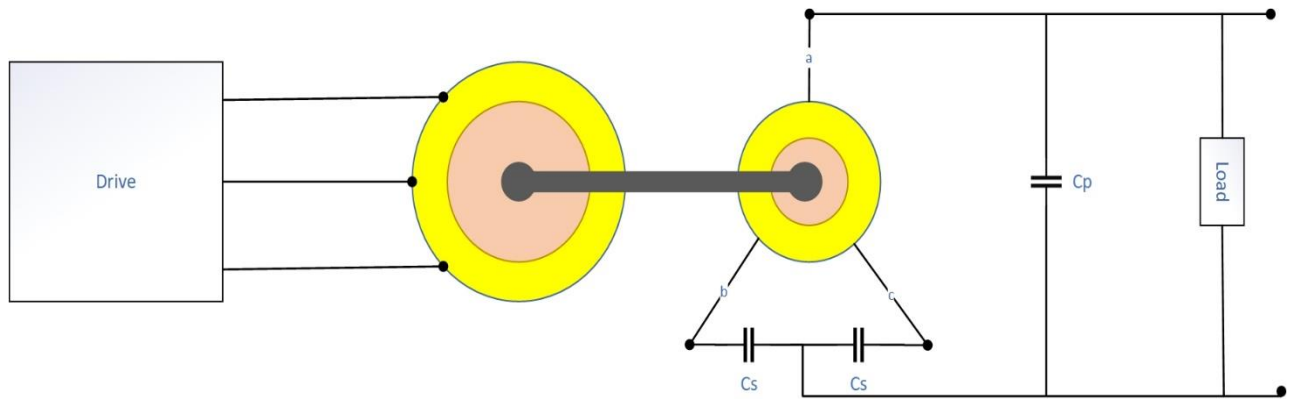
ژنراتورهای القایی تک فاز خود تحریک شده (SP-SEIG) که توسط توربین بادی کوچک یا توربین آبی هدایت می شوند می توانند به عنوان منبع تولید انرژی الکتریکی در خانه یا مناطق دورافتاده مورد استفاده قرار گیرند. برای تامین بارهای تک فاز توان تا ۱۰ کیلو وات از ژنراتورهای القایی خود تحریک تک فاز یا ژنراتورهای القایی سه فاز خود تحریکی با خروجی تک فاز استفاده

می شود [1]. برای تولید انرژی الکتریکی تک فاز کم توان، ژنراتورهای القایی خود تحریک شده (SP-SEIGs) که توسط یک توربین میکرو آبی یا میکرو بادی هدایت می شوند، استفاده شوند. معمولاً برای تولید برق تک فاز به عنوان منبع انرژی کمکی در خانه موتور القایی خود تحریک تکفاز تا توان ۳ کیلووات به عنوان یک ژنراتور القایی خود تحریک تک فاز مستقل کافی است [2]-[7]. هنگامی که به توان الکتریکی بیشتری نیاز است، یک ژنراتور القایی خود تحریک شده سه فاز با خروجی تک فاز باید برای تغذیه بارهای تک فاز استفاده شود [8]-[10]. از نظر تئوری، هر ماشین القایی که برای کار موتور طراحی شده است ممکن است مستقیماً به عنوان ژنراتور القایی مورد استفاده قرار گیرد، اما عملکرد آن رضایت بخش نخواهد بود، زیرا برای مثال، ممکن است مشکلاتی در خود تحریکی ژنراتور رخ دهد و تنظیم ولتاژ ترمینال و همچنین حداکثر خروجی قدرت در سرعت چرخش دلخواه کافی نخواهد بود [2]-[4].

به منظور استفاده از موتورهای سه فاز برای تولید خروجی تکفاز به کانورترها و ادوات کنترلی زیادی نیاز هست که هزینه و پیچیدگی ساختار بالایی دارند و همچنین تعمیر و نگه داری آنها هم به مراتب هزینه های زیادی را دارد.

در صورت استفاده از آرایش وقادیر مناسب خازن برای ژنراتور های القایی در هر سیستم می توان بدون نیاز به ادوات کنترلی و با هزینه و ساختاری ساده تر از موتورهای القایی به عنوان ژنراتور استفاده کرد. [11] همچنین می توان با استفاده از خازن و آرایش مناسب خروجی این ژنراتور های القایی را به صورت تکفاز مورد استفاده قرار داد.

ژنراتورهای القایی خود تحریک در مقایسه با ژنراتورهای سنکرون، آهنربای دائمی یا DC مزایایی مانند سادگی، دوام و هزینه پایین ساخت و نگهداری دارند. معایب اصلی آنها مغناطیس باقیمانده



شکل ۱- پیکربندی سیستم با آرایش فوکامی

خاص می باشد، در این پژوهش تلاش شده تا آرایش های دیگری نیز به صورت تئوری و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین سعی شده تا بهترین آرایش خازنی برای ژنراتور القایی خود تحریک شده سه فاز با خروجی تک فاز تعیین و عملکرد آن در بارهای مقاومتی و موتورهای مختلف بررسی و مقایسه شود.

تئوری پژوهش

ژنراتور القایی، یک موتور القایی از نوع روتور قفس سنجابی است که با یک محرک اولیه در مافوق سرعت سنکرون، گرداننده شده و برای تولید نیروی برق استفاده گردد. ساختار و مشخصه های این ژنراتور مانند موتور القایی است. وقتی یک موتور القایی با ولتاژ نامی و در حالت بی باری، مورد بهره برداری قرار گیرد، با سرعتی می چرخد که فقط برای تولید گشتاور لازم برای غلبه بر افت ناشی از اصطکاک و مقاومت هوا کافی باشد. اگر یک گشتاور مکانیکی خارجی برابر با این افتها به موتور القایی در همان جهت چرخش اعمال شود، روتور آن به سرعت سنکرون خواهد رسید.

هنگامیکه روتور به سرعت سنکرون می رسد، با همان سرعت میدان مغناطیسی ناشی از ولتاژ تغذیه می چرخد و ولتاژ در سیم پیچهای روتور القا نمی شود زیرا فلوی مغناطیسی هیچیک از هادیهای ثانویه را قطع نمی کند، هیچ جریانی از سیم پیچهای روتور نمی گذرد و فقط جریان تحریک در سیم پیچهای استاتور جریان می یابد.

در صورتی که روتور بواسطه یک گشتاور خارجی در سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون خود، چرخش کند، جهت ولتاژ القایی ثانویه (روتور)، خلاف موقعی خواهد بود که به عنوان موتور القایی، چرخش می کرد، زیرا سرعت چرخش هادی روتور فراتر از سرعت چرخش میدان مغناطیسی می شود و گشتاوری منفی که حاصل بر هم کنش میدانهای ناشی از جریان های روتور و استاتور است ایجاد شده و ماشین مثل یک ژنراتور، کار می کند [14].

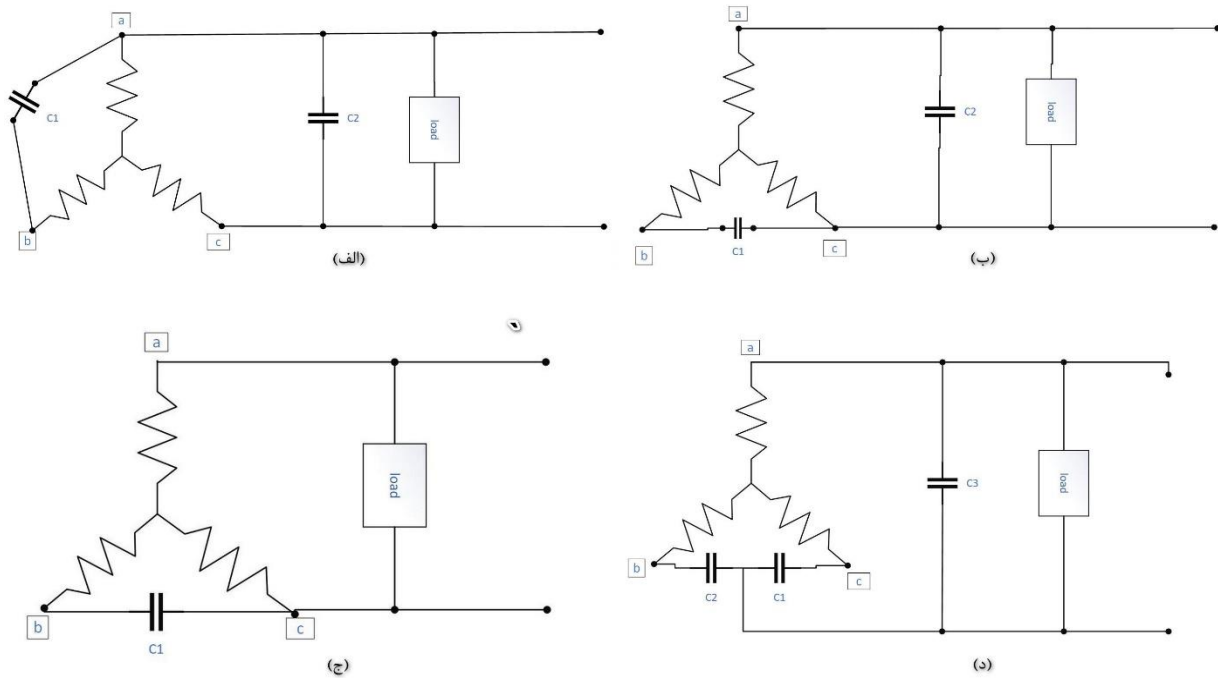
عملکرد خود تحریکی در یک ژنراتور هنگامی رخ می دهد که روتور آن توسط یک محرک اولیه به حرکت درآید و مقدار مناسب خازن به پایانه های آن وصل باشد. در این حالت شار پسماند موجود در هسته روتور باعث القای ولتاژ در استاتور شده و جریان پیش فاز از خازن عبور خواهد کرد. پس با توان راکتیو تولید شده به کمک خازن میدان مغناطیسی ناشی از پسماند تقویت شده و در پی آن ولتاژ نیز

غیرقابل پیش بینی که برای خود تحریکی ضروری است و همچنین ولتاژ خود تنظیم ضعیف است [7]. فوکامی و همکاران در سال ۱۹۹۵ یک ژنراتور القایی خود تحریک تک فاز با ویژگی خود تنظیمی ارائه کردند. ژنراتور جدید شامل یک ماشین القایی سه فاز قفس سنجابی و سه خازن به صورت سری و موازی با یک بار تک فاز بود. [12].

ماهاتو و همکاران در سال ۲۰۰۷ حداقل و حداکثر ظرفیت تحریک مورد نیاز برای یک ژنراتور القایی تک فاز خود تحریک با استفاده از یک ماشین سه فاز را ارائه دادند. این پژوهش نشان داد که با افزایش بار، حداقل ظرفیت خازنی مورد نیاز کاهش می یابد. به طور معمول، حداقل و حداکثر ظرفیت مورد نیاز برای یک ژنراتور القایی خود تحریک (SEIG) توسط یک معادله چند جمله ای غیر خطی مرتبه بالا در هر فاز حل می شود. مدل دینامیکی توسعه یافته SEIG بر اساس تئوری محورهای قاب مرجع ثابت $d-q$ است، و معادلات خازن های تحریک با یک مدل سه فاز abc با فرض یک حرکت اولیه با سرعت ثابت توصیف می شوند. مقادیر خازن به دست آمده با روش پیشنهادی با مقادیر به دست آمده با روش معمول مقایسه شده و به طور تجربی تأیید شده است تا اعتبار و صحت روش پیشنهادی تأیید شود [13].

اسماعیلیان و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک روش طراحی برای سیستم پمپاژ آب برقی-بادی ارائه کردند که در این روش توربین بادی و پمپ به صورت الکتریکی به هم متصل هستند توربین بادی یک ژنراتور القایی خود تحریک را حرکت می دهد که برق مورد نیاز موتور القایی که برای سیستم پمپاژ آب می باشد را تغذیه می نماید، در این مقاله انتخاب مقادیر و پیکربندی مناسب خازن های تحریک عامل کلیدی است که این مقادیر را توسط یک الگوریتم بهینه سازی بدست می آمده است. این سیستم به دلیل سادگی از داشتن دستگاه های کنترلی پیچیده بی نیاز است. [11]

در این پژوهش به بررسی و مقایسه آرایش های مختلف خازن برای اتصال ستاره موتور القایی سه فاز با هدف یافتن مناسب ترین آرایش برای ژنراتور القایی با خروجی تک فاز، پرداخته شده است. تحقیقات پیشین نشان می دهد که تمرکز پژوهشگران به روی یک آرایش



شکل ۲- الف) پیکر بندی با دو خازن حالت اول ب) پیکر بندی با دو خازن حالت دوم ج) پیکر بندی با یک خازن د) پیکر بندی با سه خازن (فوکامی)

کمی بهبود یافته اما نیازمند مقادیر و تعداد بالاتر خازن می باشد که در نتیجه هزینه را افزایش می دهد. شکل ۲ (ب) مانند آرایش قبل دارای دو خازن می باشد با این تفاوت که یک خازن ما بین فاز C و b و دیگری مابین فاز a و C قرار داده شده است. نتایج خروجی حاکی از تنظیم ولتاژ بهتر این آرایش نسبت به حالت قبل می باشد. در آخرین آرایش شکل ۲ قسمت (د) دو خازن سری مابین فاز b و C و یک خازن موازی با بار قرار داده شده است، این آرایش نسبت به آرایش های قبل از قابلیت تنظیم ولتاژ بهتر و قوی تر بهره مند می باشد اما به دلیل استفاده از تعداد و مقادیر خازن های بیشتر دارای هزینه بیشتری می باشد.

ب. اصول عملیات

به منظور پیاده سازی پیکر بندی های ذکر شده در آزمایشگاه از یک موتور القای سه فاز چهار قطب با توان نامی ۱,۵ کیلو وات به عنوان ژنراتور استفاده شد. همچنین به منظور ارائه سرعت های ثابت مختلف، موتور القایی ذکر شده با یک موتور القایی ۱۱ کیلو وات متصل به درایو کوپل مکانیکی شده است. مشخصات موتورهای ذکر شده در جدول ۱ آورده شده است. برای تولید ولتاژ و بردن موتور به حالت ژنراتوری سیستم نیازمند آرایش و مقادیر مناسب خازن می باشد. خازن های استفاده شده در این پژوهش در جدول ۲ آورده شده است. پس از القا شدن ژنراتور و تولید ولتاژ برای بررسی ویژگی تنظیم ولتاژ در هر آرایش مقادیر مختلفی بار مقاومتی و موتوری را به صورت پله ای به خروجی ژنراتور متصل و ولتاژ و جریان خروجی اندازه گیری شده است. هم چنین تاثیرات اضافه شدن این بارها بر

تقویت می شود. این روند ادامه می یابد تا جایی که ولتاژ و جریان های القاشده در ماشین به یک نقطه کار مرتبط مشخص در مشخصه مغناطیسی هسته ماشین برسند.

در این حالت حتی اگر محرک اولیه سرعت ثابتی داشته باشد با توجه به ظرفیت خازن و امپدانس بار و ضریب توان، فرکانس و ولتاژ القاشده تغییر خواهند کرد؛ بنابراین چالش اساسی در ژنراتور القایی خود تحریک تعیین ولتاژ و فرکانس ماشین با داشتن ظرفیت خازن و سرعت است. همچنین اطلاع از حداقل مقدار خازن تحریک از جایگاه ویژه ای برخوردار است.

پیکر بندی سیستم و اصول عملیات

الف. پیکر بندی سیستم

به منظور استفاده از موتور القایی سه فاز به عنوان یک ژنراتور تک فاز نیازمند آرایش و انتخاب مقادیر مناسب خازن است. که در ادامه به بحث در مورد این آرایش ها می پردازیم.

در این پژوهش تلاش شده تا به بررسی و مقایسه چهار آرایش مختلف در حالت اتصال ستاره موتور سه فاز پرداخته شود و در انتها با بررسی نتایج آزمایشگاهی بهترین آرایش انتخاب شود. شکل ۲ (ج) از یک خازن ما بین فاز b و C استفاده شده و خروجی تک فاز از فاز a و فاز C متصل به خازن گرفته شده است. در این آرایش تنظیم ولتاژ بسیار ضعیف و نا امید کننده بود اما این آرایش نیازمند مقادیر کم خازن و در نتیجه هزینه کمتری می باشد.

شکل ۲ الف) آرایش دو خازن می باشد که در این آرایش از یک خازن موازی با بار، مابین فاز a و C و یک خازن مابین فاز a و b استفاده شده است. در این آرایش تنظیم ولتاژ نسبت به حالت قبل

برای آرایش تک خازن از یک خازن ۶۰ میکروفاراد، برای آرایش دو خازن از خازنهای ۱۶ و ۳۰ میکرو فاراد و برای آرایش سه خازن از سه خازن ۵۰ میکروفاراد استفاده شد که مشخصات خازنها در جدول ۲ آورده شده است.

ب. پیاده سازی آزمایشگاهی

در آزمایشگاه، به بررسی ناحیه تحریک موتور به ازای سرعت ها و آرایش های خازن مختلف پرداخته شد. به این منظور موتور القای سه فاز ۱,۵ کیلو وات را با استفاده از موتور القایی ۱۱ کیلو وات متصل به درایو که در شکل ۹ آورده شده است، با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه به حرکت در آورده، به ازای سرعت های مختلف ولتاژ خروجی اندازه گیری شده است. سپس به خروجی ژنراتور یک بار ۲۰۰ وات مقاومتی اضافه شد مجدداً به ازای سرعت های مختلف نمودار تحریک موتور مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نمودار تحریک آرایش های مختلف در حالت بی باری و با بار ۲۰۰ وات مقاومتی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

پس از بررسی ناحیه تحریک به بررسی میزان تنظیم ولتاژ آرایش های مختلف می پردازیم. بدین منظور موتور القای ۱,۵ کیلو وات را به وسیله موتور القایی ۱۱ کیلو وات متصل به درایو با سرعت ثابت سنکرون به چرخش در می آوریم. قابل ذکر است که با رساندن سرعت به سرعت سنکرون ظرفیت خازنها کاهش یافته و همین موضوع باعث می شود که آرایش تک خازن به دلیل کم شدن ظرفیت خازن تحریک نشده و خروجی آن صفر باشد. در آرایش دو خازن حالت اول از یک خازن ۱۶ میکرو فاراد بین دو فاز a و b و یک خازن ۲۰ میکرو فاراد موازی با بار و بین فاز a و c استفاده شد. در این آرایش ابتدا ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور در حالت بی باری اندازه گیری گردید سپس به ترتیب بارهای مقاومتی ۱۰۰ و ۲۰۰ واتی به خروجی متصل و مقادیر ولتاژ و جریان خروجی به وسیله

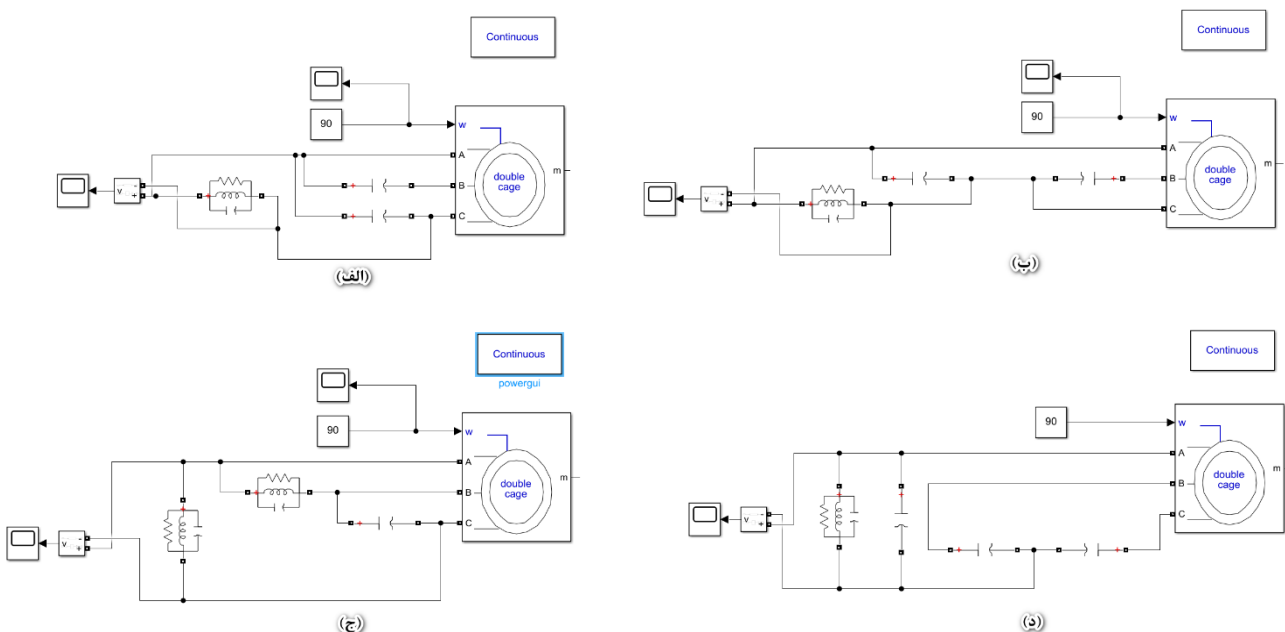
پیکربندی مورد نظر بررسی گردید. بار های مقاومتی و موتوری مورد استفاده در این پژوهش آزمایشگاهی در جدول ۳ آورده شده است. به منظور اندازه گیری ولتاژ و جریان و سایر خروجی های ژنراتور در آزمایشگاه از دستگاه پاور آنالایزر کلمپی LUTRON استفاده شده است.

بحث و نتایج

الف. شبیه سازی

در این پژوهش بررسی عملکرد آرایشهای مختلف یک ژنراتور القایی خود تحریک در دو مرحله شبیه سازی و پیاده سازی آزمایشگاهی انجام شده است. برای شبیه سازی پیکربندی های ذکر شده در برنامه سیمولینک-متلب منحنی اشباع ژنراتور القایی ۱,۵ کیلو وات مورد نیازی باشد.

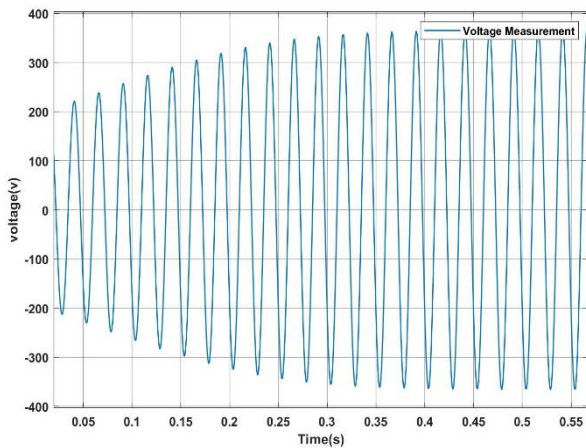
مشخصه مغناطیسی ماشین القایی با به حرکت در آوردن ژنراتور با سرعت سنکرون و در بی باری به دست می آید. به این منظور در آزمایشگاه ژنراتور القایی ۱,۵ کیلو وات با یک موتور القایی ۱۱ کیلو وات متصل به درایو کوپل شده و با سرعت سنکرون به حرکت در آمده است. با استفاده از واریاک متصل به شبکه برق ولتاژ ژنراتور را تغییر داده تا با اندازه گیری مقادیر ولتاژ و جریان منحنی اشباع ژنراتور القایی به دست آید. این مقادیر در جدول ۴ آورده شده است. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است شبیه سازی آرایشهای مختلف ژنراتور القایی و خازنها در محیط سیمولینک-متلب با استفاده از مشخصات پلاک موتور و منحنی اشباع مغناطیسی (نشان داده شده در شکل ۴) انجام گردیده است. نتایج حاصل از شبیه سازی با فرض سرعت ثابت ۱۰۰۰ rpm و حالت بی باری برای آرایشهای تک خازن، دو خازن حالت اول، دو خازن حالت دوم و سه خازن به ترتیب در شکلهای ۵ الی ۸ نشان داده شده است.



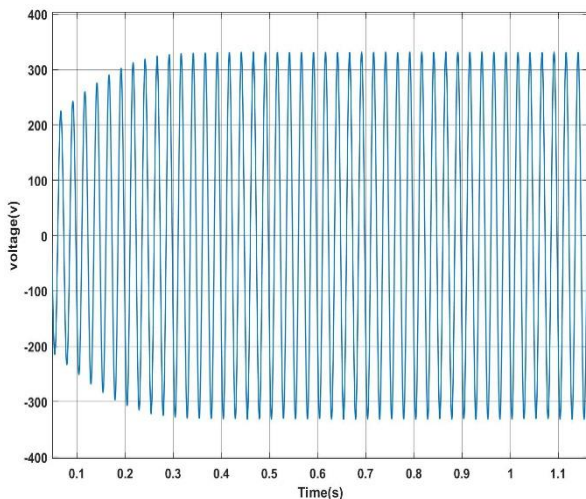
شکل ۳- شبیه سازی با دو خازن حالت اول (ب) شبیه سازی با دو خازن حالت دوم (ج) شبیه سازی با یک خازن (د) شبیه سازی با سه خازن (فوکامی)



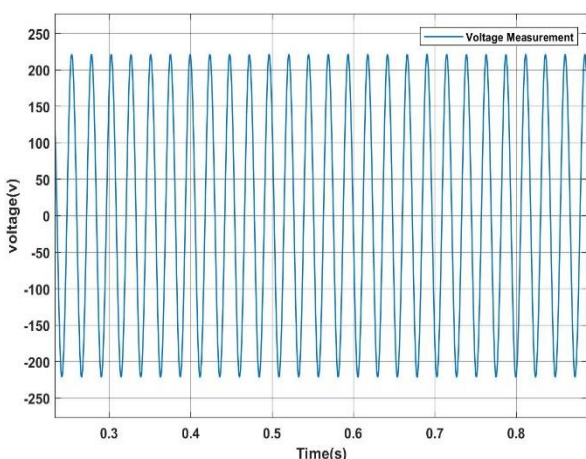
شکل ۵- ولتاژ خروجی آرایش تک خازن در حالت بی باری با خازن ۶۰ MFD



شکل ۶- ولتاژ خروجی آرایش دو خازن حالت اول در حالت بی باری



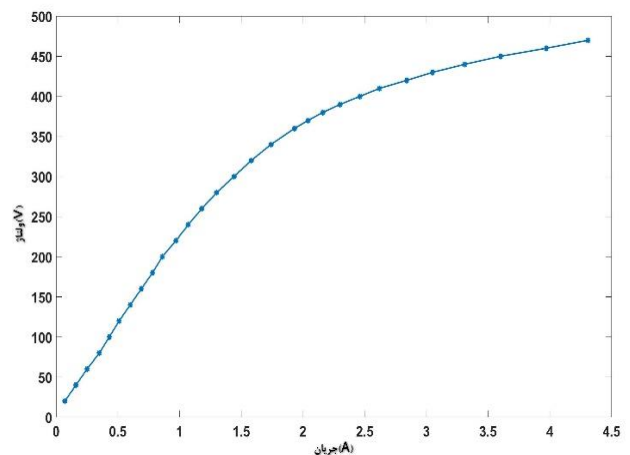
شکل ۷- ولتاژ خروجی آرایش دو خازن حالت اول در حالت بی باری



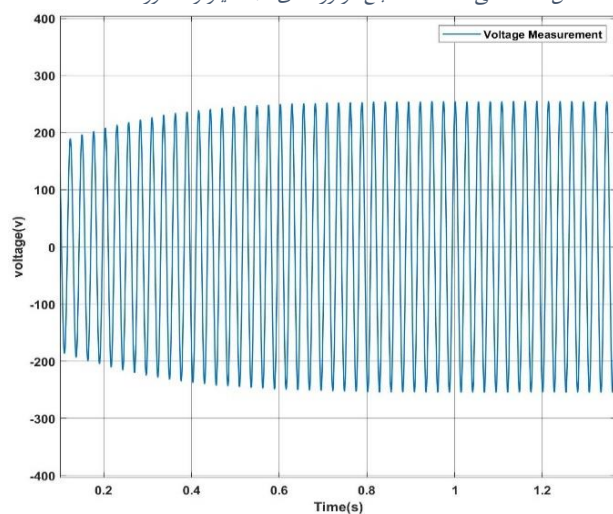
شکل ۸- ولتاژ خروجی آرایش سه خازن سه خازن (فوکامی)

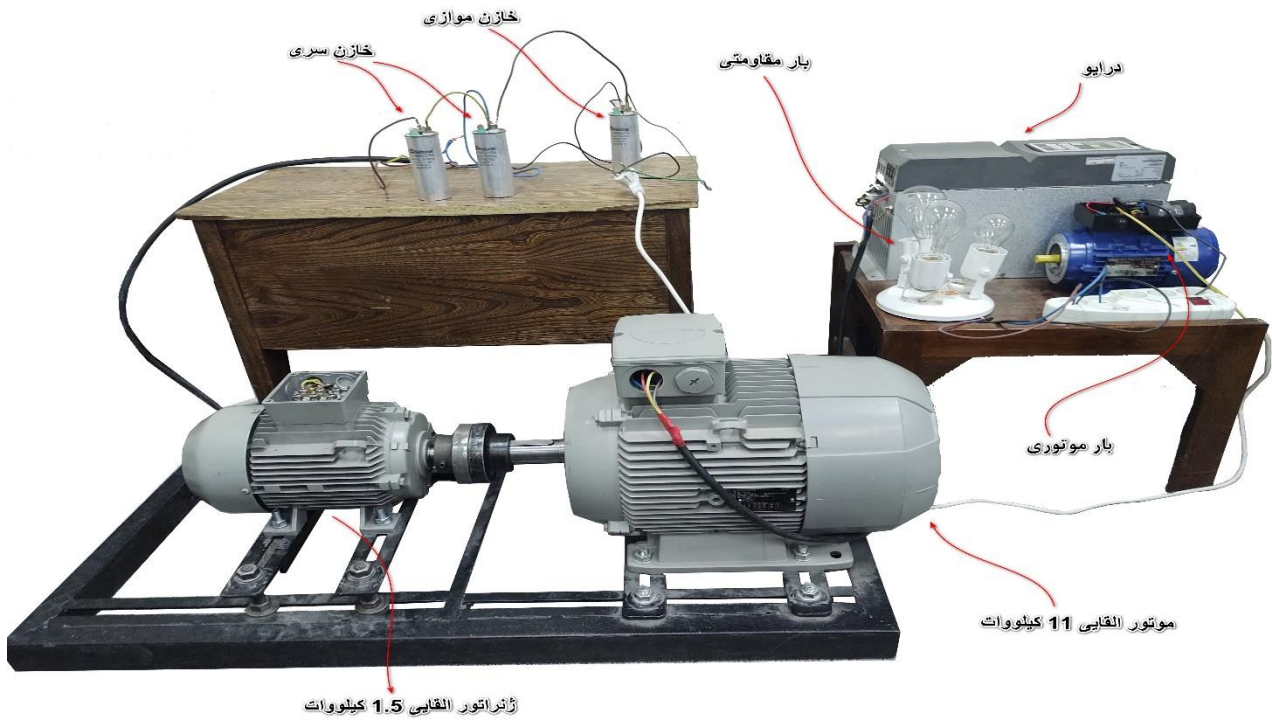
پاورآنالایزر کلمپی اندازه گیری شد. نتایج حاصل در شکل ۱۳ به تصویر کشیده شده است. در آرایش دو خازن حالت دوم یک خازن ۱۶ میکرو فاراد بین فازهای a و c و یک خازن ۲۰ میکرو فاراد موازی با بار بین فاز a و c قرار داده شد، ولتاژ و جریان خروجی در حالت بی باری و سپس به ترتیب برای بارهای مقاومتی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات اندازه گیری شد. نتایج حاصل در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

آرایش سه خازن (فوکامی) که در شکل ۱ شماتیک نحوه اتصال آن به خازن و محرک اولیه نشان داده شده است، از دو خازن سری ۵۰ میکرو فاراد از دو خازن سری ۵۰ میکرو فاراد بین فازهای b و c و یک خازن ۵۰ میکرو فاراد موازی با بار که یک سر آن متصل به فاز a و سر بعدی آن متصل به محل اتصال دو خازن سری می باشد، استفاده شده است. در ابتدا ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور در حالت بی باری اندازه گیری شد و سپس به ترتیب بارهای مقاومتی ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ وات و یک بار موتوری ۳۷۰ وات به خروجی ژنراتور متصل شد و با دستگاه پاورآنالایزر جریان و ولتاژ خروجی اندازه گیری و ثبت گردید که در شکل ۱۱ و ۱۲ قابل مشاهده است. همچنین نتایج حاصل به صورت نمودار در شکل ۱۴ نمایش داده شده است، که بیانگر تنظیم ولتاژ نسبتاً مناسبی است.

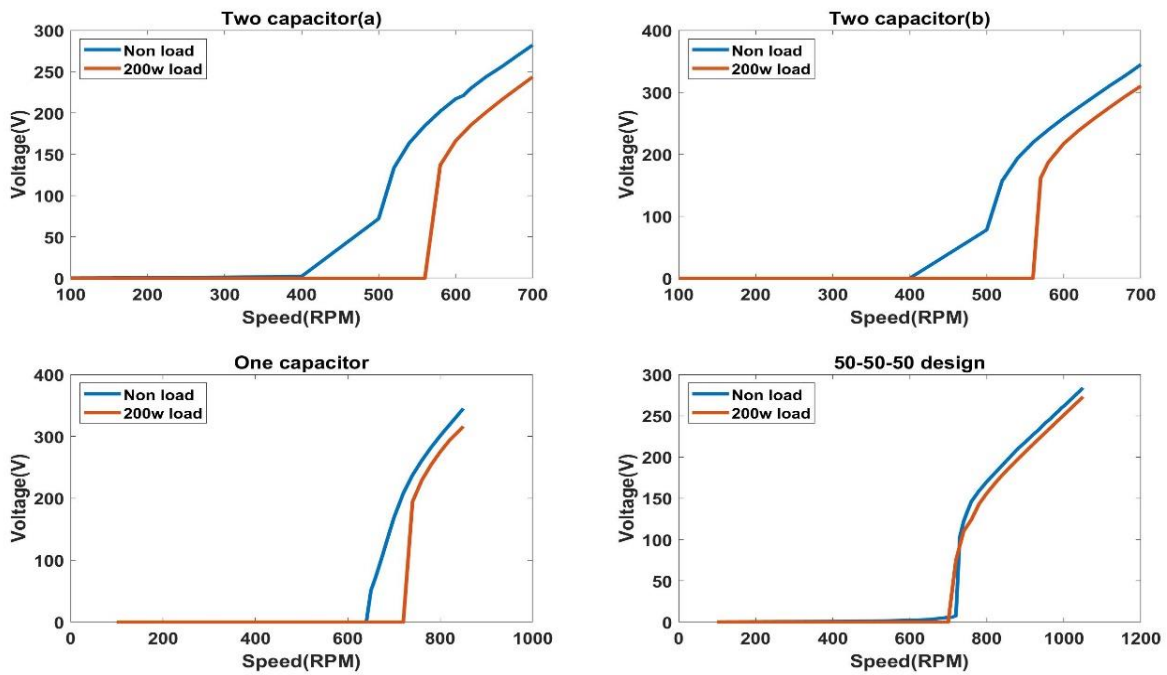


شکل ۴- منحنی مشخصه اشباع موتور القای ۱,۵ کیلو وات مورد استفاده

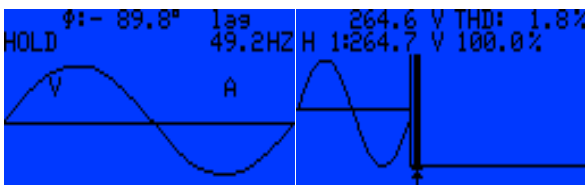




شکل ۹- ساختار آزمایشگاهی مورد استفاده



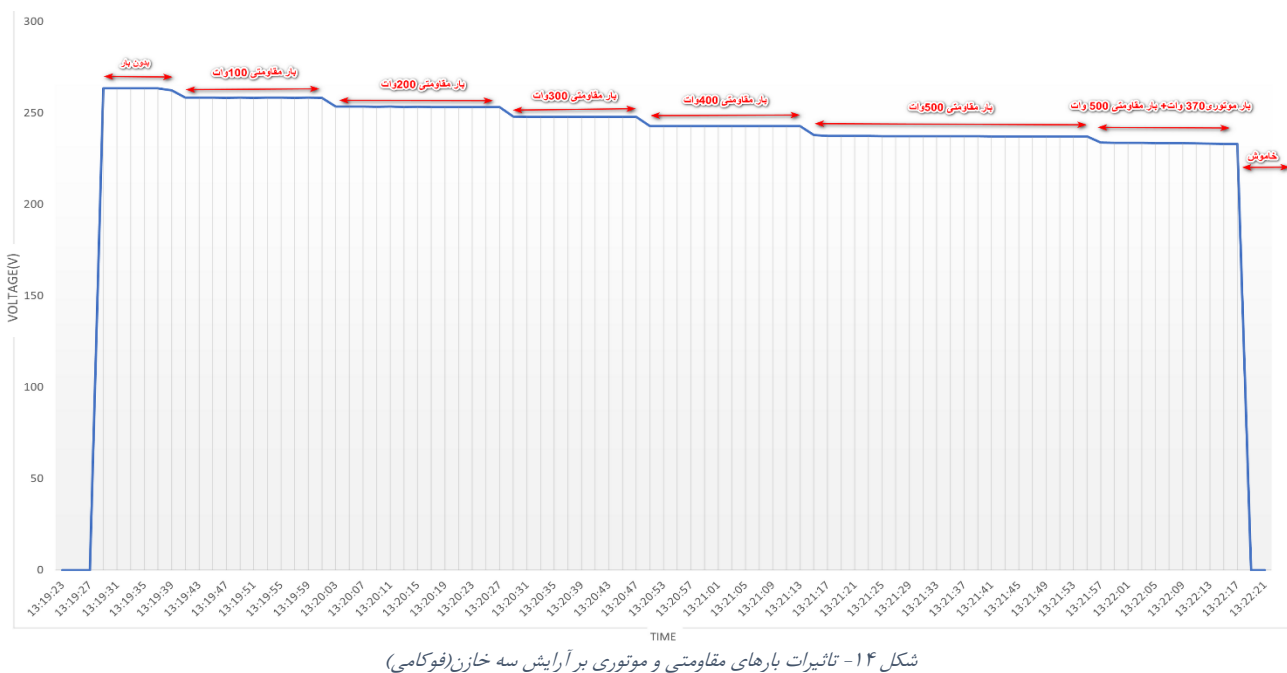
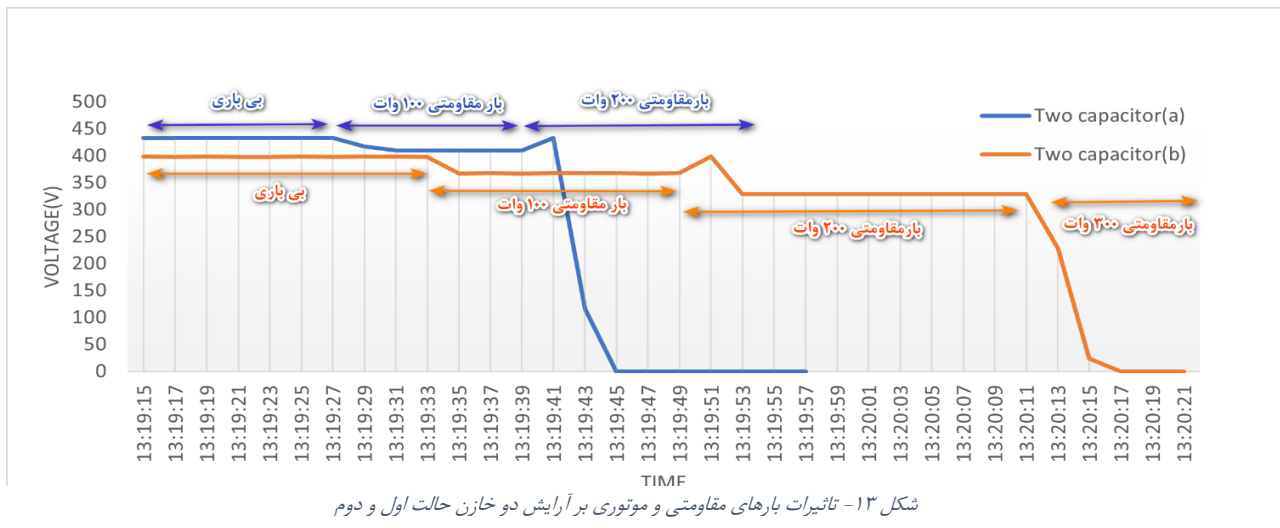
شکل ۱۰- منحنی تحریک موتور در آرایش های مختلف در حالت بی بار و بار مقاومتی ۲۰۰ وات



شکل ۱۲- تصاویر گرفته شده از دستگاه پاورآنالیزر کلمبی در حالت بی باری



شکل ۱۱- تصاویر از خروجی پاورآنالیزر کلمبی با بار یک کیلو وات



کم به دست آورد. که این پیکربندی برای اتصال به توربین های آبی و بادی برای تولید برق تکفاز هزینه اجرایی و تعمیر و نگه داری کمتر و ساختار ساده تری نسبت به سایر ساختار ها دارد. همچنین استفاده از این پیکربندی می تواند گزینه ی بسیار مناسبی برای ساختارهای انرژی تجدید پذیر که در مناطق دور دست هستند، باشد.

جدول ها

جدول ۱: مشخصات موتور القای سه فاز

| ولتاژ (V) | جریان (A) | سرعت (rpm) | فرکانس (Hz) | توان (kW) |
|-----------|-----------|------------|-------------|-----------|
| ۴۰۰ | ۴ | ۹۲۵ | ۵۰ | ۱,۵ |
| ۴۰۰ | ۲۲ | ۱۴۶۰ | ۵۰ | ۱۱ |

جدول ۲: مشخصات خازن

نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی انجام شده به روی پیکربندی مختلف نشان از برتری آرایش سه خازن (فوکامی) در تنظیم ولتاژ هنگام اضافه شدن بارهای مقاومتی و موتوری به سیستم را دارد، اما این آرایش به دلیل استفاده از سه خازن و ظرفیت خازن بیشتر نسبت به آرایش های دیگر هزینه بیشتری دارد و همچنین در بحث تحریک پذیری هم نسبت به سایر آرایش ها در سرعت های بالاتری به ناحیه تحریک و تولید ولتاژ می رسد. آرایش های دو خازن و تک خازن برای رسیدن به ناحیه تحریک و تولید ولتاژ به سرعت چرخش کمتری نیازمند هستند اما در بحث تنظیم ولتاژ دارای ثبات خوبی نبوده و هنگام اضافه شدن بارهای با ظرفیت بالا ژنراتور قادر به تولید ولتاژ نمی باشد.

به طور کلی در آرایش فوکامی با استفاده از مقادیر مناسب خازن برای موتور القایی مورد استفاده می توان خروجی مناسب با هزینه

characteristics of single-phase self-excited induction generators,” *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 38, no. 4, pp. 1235–1244, Jan. 2019, doi: 10.1108/COMPEL-10-2018-0430.

K. Makowski and A. Leicht, “Field-circuit [4] analysis and measurements of a single-phase self-excited induction generator,” *Open Phys.*, vol. 15, no. 1, pp. 913–917, Jan. 2017, doi: 10.1515/phys-2017-0110.

K. Makowski and A. Leicht, “Analysis of self- [5] excitation and performance characteristics of a single-phase self-excited induction generator by field-circuit method,” *COMPEL Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 35, no. 1, pp. 200–224, Jan. 2016, doi: 10.1108/COMPEL-03-2015-0116.

U. K. Kalla, B. Singh, S. S. Murthy, C. Jain, [6] and K. Kant, “Adaptive Sliding Mode Control of Standalone Single-Phase Microgrid Using Hydro, Wind, and Solar PV Array-Based Generation,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6806–6814, Nov. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2723845.

J. M. Elder, J. T. Boys, and J. L. Woodward, [7] “The process of self excitation in induction generators,” *IEE Proc. B Electr. Power Appl.*, vol. 130, no. 2, pp. 103–108, Mar. 1983, doi: 10.1049/ip-b.1983.0016.

H. Zhong, B. Wang, C. Wu, and J. Wang, [8] “Performance analysis of three-phase self-excited induction generator under single-phase load,” in *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Nov. 2016, pp. 1–5.

T. Z. E. Benhacine, A. Nesba, S. Mekhtoub, [9] and R. Ibtouen, “A new approach for steady state analysis of three-phase SEIG feeding single-phase load,” *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 38, no. 1, pp. 46–67, Jan. 2018, doi: 10.1108/COMPEL-11-2017-0474.

M. Shah and S. Somkun, “Efficiency [10] Evaluation of Three Phase and Single Phase C2C Self-Excited Induction Generator for Micro Hydro Power Application,” *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 193–198, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.149.

H. R. Esmaeilian, E. Mohammadi, R. [11] Fadaeinedjad, A. Bakhshai, and M. Rahnama, “A Novel Design Methodology to Optimise Induction Machines-Based Stand-alone Electrical Wind Water-Pumping Systems,” *IET Electr. Power Appl.*, Sep. 2019, doi: 10.1049/iet-epa.2019.0210.

T. Fukami, M. Imamura, Y. Kaburaki, and T. [12] Miyamoto, “A new self-regulated self-excited single-phase induction generator using a squirrel cage three-phase induction machine,” in *Proceedings 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery EMPD '95*, Nov. 1995, vol. 1, pp. 308–312 vol.1. doi: 10.1109/EMPD.1995.500744.

S. P. Singh and M. Sharma, “Excitation [13] capacitance required for self excited single phase induction generator using three phase machine,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, pp. 1126–1133, May 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2007.09.007.

[14] ا. جواد، ر. امیر و غ. ن. میثم، “کنترل و مدلسازی توربین بادی با استفاده از روش مدولاسیون فضای برداری با اتصال به ژنراتور القایی قفس سنجابی،” سومین کنفرانس بین المللی پژوهش در مهندسی، علوم و تکنولوژی، ۱۳۹۵

| ردیف | ظرفیت (MFD) | ولتاژ (V) | فرکانس (Hz) |
|------|-------------|-----------|-------------|
| ۱ | ۷۰ | ۴۵۰ | ۵۰ |
| ۲ | ۶۰ | ۴۵۰ | ۵۰ |
| ۳ | ۵۰ | ۴۵۰ | ۵۰ |
| ۴ | ۳۰ | ۴۵۰ | ۵۰ |
| ۵ | ۲۰ | ۴۵۰ | ۵۰ |
| ۶ | ۱۶ | ۴۵۰ | ۵۰ |

جدول ۳: مشخصات بار

| ردیف | نوع بار | ولتاژ (V) | توان (kW) |
|------|---------|-----------|-----------|
| ۱ | مقاومتی | ۲۴۰-۲۲۰ | ۰,۱ |
| ۲ | مقاومتی | ۲۴۰-۲۲۰ | ۰,۲ |
| ۳ | موتوری | ۲۴۰-۲۲۰ | ۰,۳۷ |

جدول ۴: مقادیر منحنی اشباع ژنراتور القای ۱,۵ کیلو وات

| جریان | ولتاژ | جریان | ولتاژ |
|-------|-------|-------|-------|
| ۱,۹۳ | ۳۶۰ | ۰,۴۳ | ۱۰۰ |
| ۲,۱۶ | ۳۸۰ | ۰,۶۰ | ۱۴۰ |
| ۲,۴۶ | ۴۰۰ | ۰,۷۸ | ۱۸۰ |
| ۲,۶۲ | ۴۱۰ | ۰,۹۷ | ۲۲۰ |
| ۲,۸۴ | ۴۲۰ | ۱,۱۸ | ۲۶۰ |
| ۳,۰۵ | ۴۳۰ | ۱,۴۴ | ۳۰۰ |
| ۳,۳۱ | ۴۴۰ | ۱,۵۸ | ۳۲۰ |
| ۳,۶ | ۴۵۰ | ۱,۷۴ | ۳۴۰ |

فهرست علائم

| | |
|-----|--------------------|
| V | ولت |
| A | آمپر |
| Hz | هرتز |
| rpm | سرعت چرخش بر دقیقه |
| Kw | کیلو وات |
| MFD | میکرو فاراد |

مراجع

- [1] A. Leicht and K. Makowski, “A single-phase induction motor operating as a self-excited induction generator,” *Arch. Electr. Eng.*, vol. 62, pp. 361–373, Sep. 2013, doi: 10.2478/ae-2013-0029.
- [2] S. S. Murthy, B. Singh, and V. Sandeep, “Design-based computational procedure for performance prediction and analysis of single-phase self-excited induction generator,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 7, no. 6, pp. 477–486, 2013, doi: 10.1049/iet-epa.2011.0360.
- [3] A. Leicht and K. Makowski, “Influence of shape and material of rotor bars on performance

ACEC2021-34879

بررسی تاثیر فشار بر عملکرد هیدروسیکلون با استفاده از نرم افزار CFD

مرضیه حسین زاده،^۱ حجت الله محمدی انائی،^۲ محمود اسکندری نسب^۳

^۱دانشجو، کارشناسی ارشد، فراوری موادمعدنی، مجتمع آموزش عالی، زرنند، marziye.ho7474@gmail.com

^۲دانشجو کارشناسی ارشد، فراوری موادمعدنی، مجتمع آموزش عالی، زرنند، hojjat583@gmail.com

^۳دانشیارفراوری موادمعدنی، عضو هیأت علمی، مجتمع آموزش عالی، زرنند، meskandarim1@gmail.com

چکیده

طبقه بندی موادانه ای از زیرفرآیندهای مهم در مسیرهای فراوری بشمار می رود. که به دوروش مستقیم و غیر مستقیم انجام می شود. طبقه بندی مستقیم (سرنند کردن) بازدهی مناسبی ندارد. لذا از طبقه بندی غیرمستقیم استفاده می شود از جمله از این روش های توان به استفاده از هیدروسیکلون اشاره کرد هیدروسیکلون هادرنای معدنی برای طبقه بندی و جداسازی ذرات جامد با اندازه ها و تراکم های مختلف معلق در محیط آبی استفاده می شود. که از این دستگاه معمولاً برای جداسازی از نیروی گریز مرکز استفاده می شود. هیدروسیکلون ها با توجه به اینکه دارای هندسه ساختاری خیلی ساده ای نسبت به سایر سیستم های جداکننده می باشد و سادگی عملیاتی آن و داشتن ظرفیت بالا و پایین بودن هزینه های نگهداری و بهره برداری و اندازه های کوچک مدت ها است که مورد توجه صنعت گران قرار گرفته است. در هیدروسیکلون ها جذب ذرات درشت در سرریز و جذب ذرات ریز در جریان خروجی رو پدیده اجتناب ناپذیر در فرآیند جداسازی هیدروسیکلون هستند که می توانند منجر به توزیع گسترده محصول شوند که نیاز به یک محصول طبقه بندی دقیق را برآورده نمی کند بنابراین این مطالعه یک هیدروسیکلون و اثرات ورودی آن را بررسی می کند. سرعت در هیدروسیکلون با استفاده از دینامیک سیالاتی محاسباتی CFD مورد بررسی قرار گرفت. تکنیک دینامیک سیالاتی محاسباتی CFD برای طراحی و بهینه سازی از آن استفاده می شود که وسیله خوبی برای پیش بینی عملکرد تجهیزات هیدروسیکلون است.

کلمات کلیدی

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، نرم افزار FLUENT، نرم افزار ANSYS Workbench، مدل k-epsilon، مدل laminar

۱- مقدمه

۱-۱- کلاسیفایرها

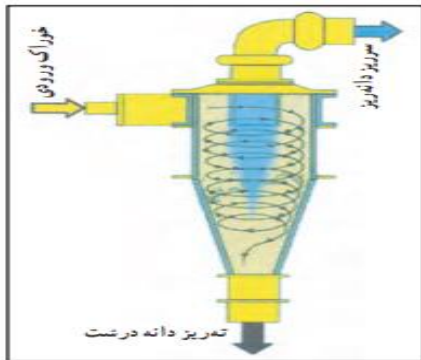
طبقه بندی مواد در ابعاد کوچک به روش مستقیم (سرنند کردن) بازدهی مناسبی ندارد، لذا برای طبقه بندی این نوع مواد از روش غیرمستقیم استفاده می شود. در این روش، مخلوطی از ذرات جامد با ابعاد مختلف در وسیله ای به نام کلاسیفایر بر مبنای سرعت نسبی حرکت ذرات در یک سیال، به بخشهای با ابعاد محدودتر تقسیم می شود. در کانه آرای، سیال مورد استفاده معمولاً آب یا هوا است.

بسته به نوع و جهت حرکت جریانی که ذرات را در داخل کلاسیفایر حمل و جابجا می کند کلاسیفایر ها را میتوان به ۴ گروه «با جریان افقی»، «با جریان قائم» و «با جریان دورانی (گریز مرکز)» و «مورب» تقسیم بندی کرد. در شکل (۱) الگوی جریان در انواع کلاسیفایر ها به صورت شماتیک نشان داده شده است. صرف نظر از ویژگی طراحی و مکانیزم عملکرد کلیه کلاسیفایرها از قانون حاکم بر حرکت ذره جامد در محیط سیال پیروی می کنند بر اساس این قانون دوروش برای حرکت ذرات

مخروطی شکل که در قسمت فوقانی به استوانه ای تبدیل می شود بار توأم با آب با فشاری که توسط یک پمپ تأمین می شود از یک مجرای جانبی، وارد قسمت استوانه ای سیکلون شده حول استوانه مرکزی میچرخد ذرات سنگین از انتهای پایینی دستگاه خارج شده، ذرات سبک همراه با آب از استوانه مرکزی از قسمت بالایی دستگاه خارج می شود.

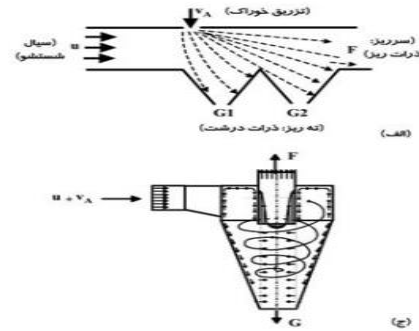
از جمله امتیازات سیکلون ها بر سایر کلاسیفایرها عبارتند از: الف) مخارج نصب و راه اندازی اولیه کم است. ب) فضای زیادی را اشغال نمی کند. ج) به کار انداختن و متوقف کردن آن بدون اتلاف وقت امکان پذیر است، در حالی که کلاسیفایرهای مکانیکی، در موقع به راه انداختن مجدد، باید بار را به تدریج اضافه نمود، در غیر این صورت، ممکن است پاروها یا ماریج، گیر کرده، ایجاد اشکال نماید (بهتر از سایر کلاسیفایرها قابل تنظیم است و مواد ریز و درشت و سبک و سنگین را بهتر تقسیم میکند).

از هیدروسیکلون ها برای جدا کردن دانه های کوچکتر از ۲۵۰ میکرون استفاده می شود. کاربرد آن در مدار خرد کننده ها و به جای کلاسیفایرهای مکانیکی، به خصوص وقتی که دانه های آسیا شده ابعادی کمتر از ۱۵۰ میکرون داشته باشند در شناورسازی برای جدا کردن دانه های کوچکتر از ۱۵ میکرون، به خصوص در شستشوی کائولین به کار می روند. به علاوه از سیکلون ها در جدا نمودن گل حفاری از ذرات شن در چاه های نفت و یابرای جدا نمودن ذرات الماس از شن نیز استفاده می کنند.



متداول ترین روش نمایش بازدهی جدایش هیدروسیکلون توسط منحنی جدایش می باشد. حد جدایش، d_{50} (Cut point)، یک هیدروسیکلون معمولاً به صورت نقطه ای روی منحنی جدایش که در آن ۵۰٪ ذرات به ته ریز منتقل می شود، مشخص می گردد.

در کلاسیفایرها پیشنهاد شده است قانون استوکس و قانون نیوتون در استوکس فرض می شود که نیروی مقاومت سیال روی ذره ی جامد ناشی از مقاومت ویسکوز است.



الگوی جریان در کلاسیفایرهای با جریان افقی (الف) افقی (ب) قائم (ج) دورانی (د) مورب (پیچشی)

بنابراین

$$v = \frac{gd^2(\sigma_s - \sigma_f)}{18\eta}$$

که در آن η ، ویسکوزیته سیال و v سرعت حد ذره جامد است. در قانون نیوتون نیز نیروی مقاومت سیال به مقاومت درهم نسبت داده شده است.

$$v = \left(\frac{3gd(\sigma_s - \sigma_f)}{\sigma_f} \right)^{\frac{1}{2}}$$

برای پیش بینی حد جدایش (d_{50}) میتوان از معادلات زیر استفاده کرد.

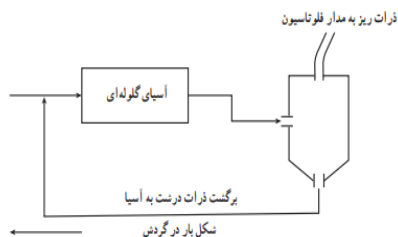
بر اساس قانون استوکس

$$\frac{d_{50}}{dx} = \left[\frac{\delta x}{\delta 50} - \frac{\delta p}{\delta p} \right]^{\frac{1}{2}}$$

که d_{50} اندازه معیار و δ دانسیته ذره با اندازه معیار (x)، دانسیته ذره با اندازه حد جدایش (50) و دانسیته پالپ (p) است حد فوقانی قوانین استوکس و نیوتون با استفاده از عدد رینولدز (N_R) به ترتیب 50 میکرون و 5ML بدست می آید این در حالی است که کاربرد بیشتر کلاسیفایرهای آبی در محدوده 40-800 میکرون قرارداد که این قوانین مذکور دقت و کارایی خود را از دست می دهند.

هیدروسیکلون

بنابر یک اصل مهندسی، دستگاهایی که قسمت های متحرک کمتری داشته باشند، با صرفه تر و قابل اعتمادتر هستند^(۱) سیکلون ها شاید یکی از بهترین مظاهر این اصل از یک بدنه



عوامل موثر بر کارایی هیدروسیکلون ها

۱- برای رسیدن به حد جدایش مطلوب پارامترهایی مانند ورودی خوراک، اندازه دیافراگم، دهانه تهریز، فشار پالپ و نسبت رقت بایستی تنظیم شوند.

۲- یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهم هیدروسیکلون، افت فشار در آن (بین دهانه ورودی و خروجی سرریز) می‌باشد. توصیه می‌شود که هیدروسیکلون به نحوی تنظیم شود که فشار سرریز آن فشار جو باشد. در این صورت افت فشار، معادل افت فشار پالپ در دهانه ورودی است.

۳- افزایش در دبی خوراک یا فشار، نیروی گریز از مرکز را افزایش می‌دهد و در نتیجه ذرات به تهریز منتقل می‌شوند. به عبارتی دیگر، $d_{50}(c)$ کاهش می‌یابد.

۴- با افزایش درصد جامد پالپ، ته‌نشین شدن با مانع و مقاومت در برابر حرکت چرخشی بیشتر می‌شود و در نتیجه ذرات درشت به سرریز راه پیدا می‌کنند.

۵- برای جدایش در اندازه‌های ریز بایستی درصد جامد کم (کمتر از ۳۰٪) و فشار زیاد باشد.

۶- اساسی‌ترین پارامتر هیدروسیکلون قطر آن است و با افزایش آن حد جدایش افزایش می‌یابد.

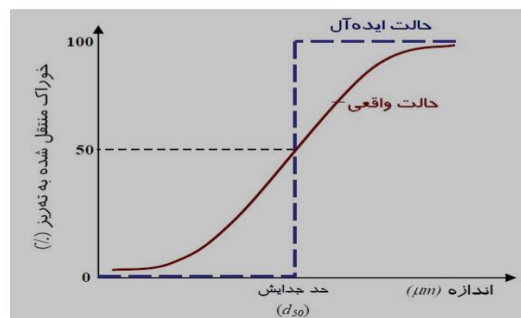
۷- برای طبقه‌بندی ذرات ۵ تا ۱۵۰ میکرون از هیدروسیکلون استفاده می‌شود.

۸- با افزایش قطر دهانه سرریز، حد جدایش افزایش می‌یابد. قطر دهانه سرریز تقریباً ۰,۲۵ تا ۰,۴۵ برابر قطر دهانه ورودی هیدروسیکلون است.

۲- روش حل مسئله

دینامیک سیالات محاسباتی

مدل‌هایی که برای شبیه‌سازی هیدروسیکلون بکار برده می‌شوند به سه گروه بنیادی و تجربی و پدیده شناختی طبقه‌بندی می‌شوند. در زمینه هیدروسیکلون فعالیت گسترده‌ای در سه مدل صورت گرفته است. امروز توجه به سوی مدل‌های بنیادی با توجه به دقت آن‌ها افزایش یافته است. استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای پیش‌بینی جریان‌های داخلی و خارجی هیدروسیکلون در دهه گذشته به شکل چشم‌گیری افزایش یافته



نمودار کارایی جدایش هیدروسیکلون

هرچه شیب قسمت میانی منحنی جدایش بیشتر باشد، کارایی بالاتر است.

شیب منحنی با مشخص کردن نقاطی که در آنها ۷۵٪ و ۲۵٪ ذرات خوراک به تهریز منتقل می‌شود، می‌تواند بیان شود: $I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}}$ ضریب نقص (Imperfection Coefficient) نامیده می‌شود.

در هیدروسیکلون ایده‌آل، ضریب نقص برابر با صفر است.

در آبی که به تهریز منتقل می‌شود، ذراتی نیز به طور غیرانتخابی خارج می‌شود که معمولاً مقدار آن‌ها به نسبت آب منتقل شده خوراک به تهریز فرض می‌شود.

کاربرد هیدروسیکلون ها

— طبقه بندی مواد (۵ تا ۱۵۰ میکرون)

— کنترل ابعاد در مدار بسته با آسیاها

— نرم‌گیری (حذف ذرات رسی زیر ۱۵-۱۰ میکرون)

— به عنوان کمک فیلتر — شستشوی مواد معدنی مانند زغالسنگ و یا کائولین

— کنترل پساب کارخانه ها

— حذف مواد شیمیایی از کنسانتره های فلوتاسیون

یکی از مهمترین کاربردهای هیدروسیکلون در کنترل بار در گردش در مدار آسیاهاست به عبارتی محصول آسیاهای گلوله ای پس از خروج از آسیا وارد هیدروسیکلون شده و محصول ریزتر از حد لازم از سرریز وارد مدار فلوتاسیون

شده ولی مواد دانه درشت از تهریز هیدروسیکلون مجدداً وارد آسیا می‌شود 1 به آن بار در گردش گفته می‌شود. (شکل زیر)



۲- شرایط مرزی برای محاسبه مقادیر مرزی متغیرها.
 ۳- شرایط اولیه برای تعیین حالت اولیه جریان برای مسائل گذرا یا حدس اولیه برای متغیرها در مسائل دائمی.
 ۴- خواص سیال که در معادلات ظاهر می شوند، مانند دانسیته، ویسکوزیته و شاید برخی خواص اغتشاشی.
 ۵- پارامترهایی که بر حل عددی معادلات اثر می گذارند.
 مراحلی که برای این اطلاعات و سپس تولید نتایج شبیه سازی جریان باید انجام شوند به ترتیب زیر هستند:

تفکر اولیه: در بسیاری از مسائل محاسباتی یا تحلیلی، فکر کردن درباره فیزیک مسائل قبل از شروع به شبیه سازی آنها بسیار مهم است. در این مرحله، در اول کار باید به مسائل جریان توجه کرد و سعی شود تا جایی که امکان دارد آن را درک کرد. این کار ممکن است شامل مقدار قابل توجهی هم فکری با افراد دیگر به منظور کشف حداکثر منابع اطلاعاتی باشد. تولید مش در این مرحله، کاربر باید نقاط شبکه یا مشی که زیر مجموعه حوزه جریان است را تولید کند. مختصات این نقاط در مش باید محاسبه شوند. این توزیع نقاط در حوزه جریان است که تعیین می کند متغیرهای جریان در چه نقاطی محاسبه شده اند. مشخصات جریان: وقتی مش تولید شد، مرزهای حوزه حل مشخص شده و باید شرایط مرزی لازم تعیین شوند. این شرایط به همراه شرایط اولیه و برخی خواص سیال، مسئله جریان واقعی را که باید حل شود، مشخص می کنند. محاسبه حل عددی: در این مرحله، نرم افزار CFD می تواند برای محاسبه حل عددی مسئله جریان اجرا شود ولی کاربر باید اطلاعاتی را که حل عددی را کنترل می کند تهیه کند. تحلیل نتایج: در این مرحله نتایج بدست آمده باید مورد تحلیل قرار گیرند. در ابتدا باید بررسی شود که آیا حل به درستی صورت گرفته است و سپس به تعیین اطلاعات جریان واقعی که برای شبیه سازی مورد نیاز هستند، پرداخته شود. نتایجی که به وسیله CFD تولید می شوند زمانی بهترین هستند که فیزیک مسئله به درستی منظور شود. قبل از ساخت و اجرا کردن شبیه سازی CFD، یک مرحله شناخت و فرمالیزه کردن مسئله جریان بر حسب پدیده های فیزیکی و پدیده های شیمیایی وجود دارد که نیاز است مورد توجه قرار گیرد. از جمله تصمیم های اولیه که باید گرفته شوند این است که مدل سازی مسئله به صورت دو بعدی یا سه بعدی در نظر گرفته می شود یا تغییرات دما و فشار بر روی چگالی مواد چه تاثیری دارند برای انتخاب درست نیاز به مهارت- های مدل سازی است. خطوط تراز فشار سیال در سرعت های مختلف همزن با مدل laminar

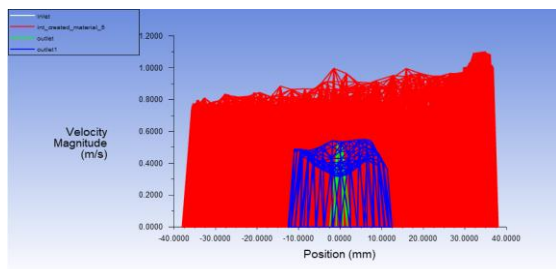
است. CFD در شاخه های بسیاری از علوم و مهندسی به کار می رود ولی در صورتی مفید خواهند بود که نتایج آنها حاصل یک شبیه سازی قابل اعتماد سیال در حال حرکت باشند.
 کیفیت این شبیه سازی به مسئله ای که شبیه سازی می شود، نرم افزار مورد استفاده و مهارت کاربری که از این نرم افزار استفاده می کند، بستگی دارد.

دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD در حقیقت آنالیز سیستم های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده هایی شامل آنها مانند واکنش های شیمیایی، توسط شبیه سازی کامپیوتری است. کاربردهای CFD بسیار متنوع است مانند: صنایع هوایی (مهندسی نیاز به اطلاعاتی برای پیش بینی عملکرد جسم- های پرنده دارند. CFD در تعامل با آزمایش های تونل باد برای تعیین عملکرد ترکیب های مختلف به کار می رود) نیروگاه ها) فرآیند تولید نیرو در نیروگاه ها در بخش های مختلف نیز از دیگر کاربردهای CFD است، و... علاوه بر هزینه کم حل عددی مسائل به کمک CFD در مقایسه با دستگاه های آزمایشگاهی با کیفیت، تکنیک CFD مزیت های دیگری نیز بر فعالیت های آزمایشگاهی برای مطالعه سیستم های سیالاتی دارد که می توانند در موارد زیر خلاصه شود.

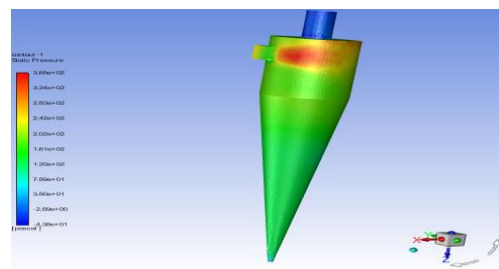
- ۱- کاهش هزینه زمانی
- ۲- توانایی مطالعه سیستم هایی که کنترل آزمایشگاهی آنها بسیار سخت یا غیرممکن است مانند سیستم های بسیار بزرگ
- ۳- توانایی مطالعه سیستم های تحت شرایط مخاطره آمیز
- ۴- بدست آوردن نتایج با جزئیات زیاد

۳- فرآیند حل مسئله با CFD آنالیز ریاضی جریان سیال به یک دسته از معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان منجر می شود. این معادلات می توانند برای تولید یک دسته معادلات جبری جداسازی شوند زمانی که شرایط مرزی و شرایط اولیه و جریانی که برای حل این مسئله شبیه سازی می شود این معادلات بکار برده می شوند معادلات با استفاده از تکنیک های گوناگون حل می شوند بسیاری از جنبه های عددی شبیه سازی جریان به وسیله برنامه های کامپیوتری CFD نوشته شده، انجام می شوند ولی کاربرد این برنامه ها باید چندین دسته از تنظیمات را برای انجام شبیه سازی موفق مشخص کند. برای حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم، موارد زیر باید انجام و مشخص شده باشند.

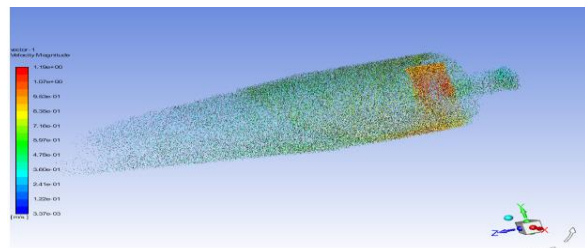
۱- شبکه نقاط، یا یک دسته از حجم ها یا المان ها، برای ذخیره متغیرهای که باید محاسبه شوند.



شکل 4- نمودار تغییر سرعت

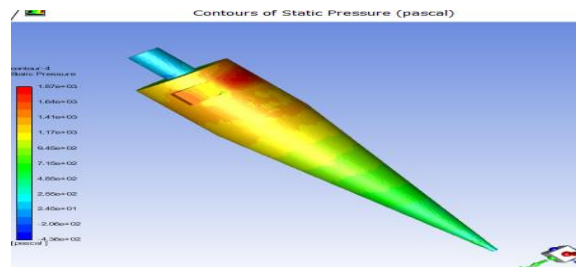


شکل ۱- تغییرات فشار ۱ و در سرعت ۱ متر بر ثانیه



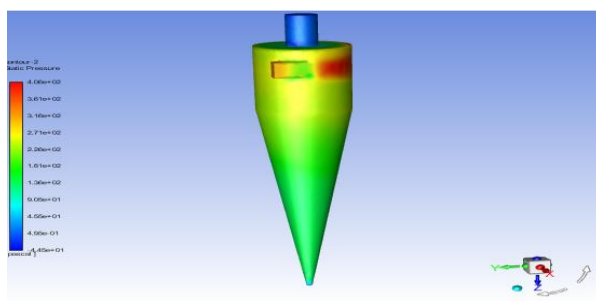
شکل 5- بردار سرعت در سرعت ۱ متر بر ثانیه

توزیع سرعت در هیدروسیکلون به نحوی است که بیشترین سرعت مربوط به ورودی و محیط نزدیک به آن می‌باشد و با دور شدن از آن سرعت و در نتیجه انرژی جنبشی سیال افت پیدا می‌کند. در شکل 5 به منظور بررسی الگوی جریان، بردارهای سرعت واقع در عمود بر ورودی هیدروسیکلون نشان داده شده است و شکل 4- نشان می‌دهد که بیشترین سرعت ۱،۹۰۷، و کمترین سرعت صفر است. خطوط تراز فشار سیال در سرعت‌های مختلف همزن با مدل k-epsilon

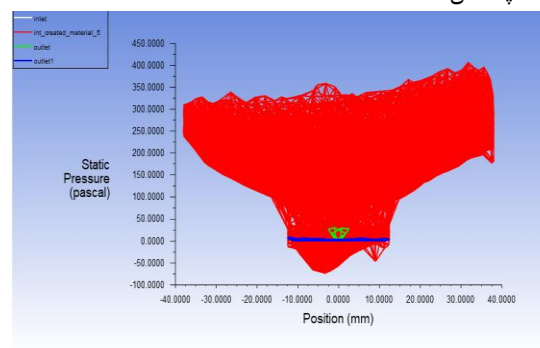


شکل 2- تغییرات فشار ۱ و در سرعت ۲ متر بر ثانیه

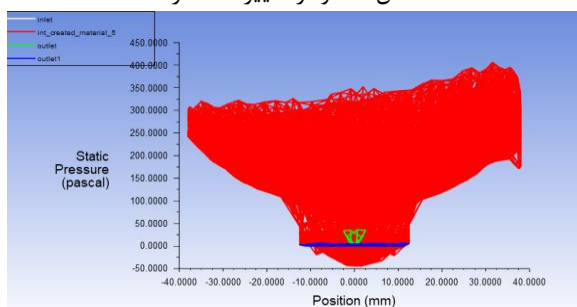
همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود با فشار در منطقه پشت دیواره ورودی هیدروسیکلون بیشتر از مناطق دیر است که به رنگ زرد و قرمز نشان داده شده است با توجه به اینکه سرعت جریان سیال در این مناطق نیز بیشتر است بنابراین با افزایش فشار دینامیکی ناشی از سرعت سیال، فشار در این مناطق بیشتر است. که طق داده های حلگر بیشترین فشار ۴۲۸،۸۳ پاسکال و کمترین آن - ۱۰۴،۸۷ پاسکال است.



شکل 6- نمودار تغییرات فشار



شکل 3- تغییرات فشار در نمودار



در شکل 2- همانطور که مشاهده می‌شود کمترین فشار مربوط به خروجی ته‌ریز است و بیشترین فشار دهانه ورودی به جامدات است میرسد. 104.87- شروع و ماکسیم آن به 428.8 که از شکل 3- مشاهده می‌شود فشار در بیشترین قسمت ها از

نتیجه گیری

در این شبیه سازی که توسط نرم افزار FLUENT انجام شد اثرات هیدرودینامیکی جریان سیال آشفته در یک هیدروسیکلون مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بدست آمده $k-\epsilon$ نشان میدهد در سرعت صفر کمترین فشار یعنی 67.63- و در سرعت 1.1966 بیشترین فشار 408.382 اعمال میشود. در مدل laminar این مقدار کمی بیشتر است. مدل $k-\epsilon$ نشان میدهد ذرات بزرگتر بیشتر تحت تاثیر مدل انتخابی قرار میگیرند و در نزدیکی دیواره استرس کمتری وجود دارد. مدل $k-\epsilon$ به محاسبات کمتری نیاز دارد. و دارای استاندارد پیش بینی سرعت بالاتر و فشار کمتری برخوردار است. و میتوان آن را به laminar که با سرعت کمتری کار میکند ترجیح داد.

مراجع

1. اسکندری نسب، محمود؛ شجاعت الحسینی، سیدعلی (1392)، پروژه تخصصی دوره کارشناسی معدن، بررسی تاثیر فشار عملکرد بر هیدروسیکلون با استفاده از نرم افزار CFX
2. رکنی، رضوان، (زمستان 1395)، شبیه سازی هیدرودینامیکی مخلوط کننده مدار استخراج حلالی مجتمع مس میدوک به روش دینامیک سیالات محاسباتی پایان نامه کارشناسی ارشد معدن

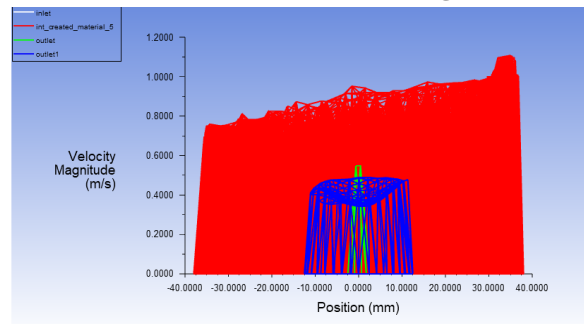
. Peng Xu and Arun S Mujumdar Minerals, Metals and Materials Technology Centre (M3TC), Faculty of Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576

The Effect of Inlet Velocity on the Separation Performance of a Two-Stage Hydrocyclone Lanyue Jiang, Peikun Liu, Yuekan Zhang, Xinghua Yang and Hui Wang College of Mechanical & Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590

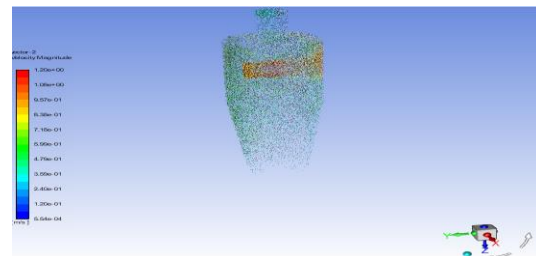
A CFD Simulation of the Parameters Affecting the Performance of ,Seyyed

شکل 7- نمودار درختی تغییرات فشار

همانطور که مشاهده میشود در مدل $k-\epsilon$ تغییرات فشار از ماکسیمم 408.382 شده و به مینیمم فشار 67.63- رسیده است که بیشترین فشار مربوط به ورودی و کمترین مربوط به خروجی ته ریز است. این نتایج در مقایسه با مدل laminar که از 104.87 تا 428.83 را نشان داد فشار کمتری را در قسمت های مختلف نشان می دهد



شکل 8- تغییرات سرعت



شکل 9- نمودار تغییرات سرعت

در مدل $k-\epsilon$ تغییرات سرعت که دهانه ورودی بیشترین سرعت و خروجی ته ریز کمترین سرعت را دارد از 0 تا 1.1966 نشان میدهد که در مقایسه با مدل laminar زیاد تغییر نمی کند.

بحث و جمع بندی

کاربرد هیدروسیکلون در صنایع، مخصوصاً در فرآیندهای شیمیایی و کانه آرایایی خیلی زیاد است. در گذشته یک عده تغییرات و بهبودهایی بر روی طرح اصلی هیدروسیکلون برای به دست آوردن مدل های بهینه برای کاربردهای مختلف صنعتی، توسط تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته و معادلات و مدل های تجربی زیادی برای پیش بینی کارایی تجهیزات تنظیم و فرمول بندی شده است. مدل تلاطم چند مرحله ای $k-\epsilon$ برای شبیه سازی در نظر گرفته شده است که با افزایش سرعت جریان راندمان جدایی افزایش میابد. مدل laminar برای جریان آرام بیشتر کاربرد دارد.



7. NOWAKOWSKI, A.F., DYAKOWSKI, T., "INVESTIGATION OF SWIRLING FLOW STRUCTURE IN HYDROCYCLONES", UMIST, Department of Chemical Engineering, UK, Manchester, 2003

Wang, B., Yu, A.B., "Numerical study of particle–fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions", NSW 2052, Centre for Simulation and Modeling of Particulate Systems, School of Materials Science and Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2006

Mohsen Hosseini, Khalil Shahbazi, and Mohammad Reza Khosravi Nikou, Department of Petroleum Engineering, Petroleum University of Technology, Ahwaz, Iran, Department of Gas Engineering, Petroleum University of Technology, Ahwaz, Iran

6. CFD validation for flyash particle classification in hydrocyclones, Regional Research Laboratory (CSIR), Bhopal, MP 462 026, India Chemical Engineering Department, Ujjain Engineering College, Ujjain 456 001, India Fluent India Pvt. Ltd., Pune 411 057, India Technology Information Forecasting Assessment Council, New Delhi 110 016, India, Available online 28 November 2006

ACEC2021-35364

بهینه سازی ترکیب و امکانسنجی فنی و اقتصادی تولید سوخت جامد زیستی از ضایعات چوب

هدی خراسانی زاده^۱، مسعود ایرانمنش^{۲*}

^۱دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، Hoda.zadeh@gmail.com
^۲دانشیار، پژوهشگر انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، M.iranmanesh@kgut.ac.ir

چکیده

تغییرات آب و هوایی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، انتشار آلاینده‌ها، افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن زمین، کاهش ضخامت لایه اوزن، امنیت انرژی و الزام حرکت به سمت توسعه پایدار بسیاری از کشورها را به سمت استفاده از سوخت‌های جایگزین و زیستی به عنوان یکی از راه‌حل‌های اصلی برای جلوگیری از پیامدهای محیط زیستی سوخت‌های فسیلی سوق داده است. ایران نیز دارای حدود $10^6 \times 19/4$ تن در سال ضایعات کشاورزی است که از این میان $10^6 \times 8/78$ تن مواد اولیه قابل احتراق می‌باشند. [۱] لذا مقادیر زیادی از چوب و سایر باقیمانده‌های زیست-توده جامد بدون استفاده مانده و می‌تواند به عنوان منبع انرژی در دسترس قرار گیرد. در این مقاله سعی بر آن است که با شناسایی و بهره‌گیری از ترکیب زیست‌توده‌های محلی که پتانسیل لازم برای ایجاد سوخت جامد را دارند، ترکیب بهینه متناسب با ویژگی‌های ترمو فیزیکی پلت و بریکت شامل چگالی توده، دوام مکانیکی، ارزش حرارتی و محتوای خاکستر توسط روش تاگوچی بررسی و و نهایتاً پتانسیل تولید پلت با حداقل محتوای خاکستر به لحاظ اقتصادی بررسی و آنالیز حساسیت برای شاخصهای ارزش فعلی خالص و نرخ بازده داخلی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

واژه های کلیدی: زیست‌توده، پلت چوب، امکان‌سنجی فنی و اقتصادی، پلت زیست‌توده، بریکت زیست‌توده، روش تاگوچی، آنالیز حساسیت

مقدمه

انرژی یکی از نیازهای اصلی و اولیه بشری است. نیاز روز افزون انرژی و تامین آن یکی از دغدغه‌های مهم انسان امروزی است. منابع انرژی به طور کلی به دو دسته منابع انرژی تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر

تقسیم می‌شوند. تغییرات آب و هوایی و مشکلات زیست محیطی از یک سو و کاهش ذخایر انرژی تجدید پذیر از سوی دیگر کشورها را به سمت استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر سوق داده‌است. زیست‌توده نوعی از منابع انرژی تجدید پذیر است که از مواد آلی با ریشه حیوانی یا گیاهی حاصل می‌شود. اشکالاتی که عمدتاً به احتراق مستقیم سوخت زیست‌توده وارد است چگالی انرژی کم، رطوبت زیاد، سختی کنترل سرعت سوخت، ناهمگونی کیفی، نیاز به فضای زیاد برای ذخیره‌سازی، مشکلات حمل و نقل و هزینه مرتبط با آن می‌باشند. میزان تولید خاکستر نیز تاثیر زیادی در کیفیت و فرایند احتراق دارد. کاهش چگالی فیزیکی و افزایش چگالی انرژی از طریق فشردن سوخت یکی از کارآمدترین و معمول‌ترین راه‌ها برای افزایش بهره‌وری زیست‌توده به عنوان سوخت، کنترل سرعت احتراق، ایجاد کیفیت همگون، حمل و نقل و ذخیره سازی آسان‌تر و بطور کلی کاهش اثرات نامطلوب احتراق مستقیم آن می‌باشد. از انواع گوناگون سوخت‌های زیستی متراکم جامد می‌توان به فرم‌های پلت، بریکت، مکعب، تراشه، ذغال، کپه و تراشه اشاره کرد. پلت‌ها از جمله معروف‌ترین انواع سوخت‌های زیستی جامد هستند که بیشترین تراکم را بین زیست‌توده‌های متراکم دارند. به دلیل محتوای کم رطوبت، شکل منظم و چگالی بالای انرژی، پلت‌ها و بریکت‌ها می‌توانند بسیار کارآمد بوده و حمل و نقل آن‌ها نیز آسان است. بریکت‌ها با استفاده از پرس پیستون، پرس غلتکی یا با استفاده از سیستم اکستروژن پیچ تولید و با اعمال فشار بالا بر روی مواد داخل قالب (معمولاً با دمای بالا) تولید می‌شوند. بریکت‌ها معمولاً قطر ۲۵ میلی‌متر یا بیشتر دارند. ویژگی‌های پلت/بریکت سوخت (شیمیایی و فیزیکی) پارامترهای اصلی تعیین‌کننده کیفیت بالا و ثابت آن‌ها و همچنین امکان حمل و نقل مطمئن‌تر و در مسافت‌های بیشتری می‌باشد.

در ایران مطالعات موردی در مورد بررسی خواص پلت‌های زیست‌توده انجام شده است (مطالعه رمضان زاده سال ۱۳۹۵ [۲] و مهدی نیا سال ۱۳۹۹ [۳]) اما مطالعه حاضر علاوه بر بررسی و شناسایی ترکیب

چگالی مطلوب در تمام ترکیبات مورد بررسی این پژوهش، انتخاب شد.

عوامل مهم در تعیین کیفیت سوخت جامد زیست توده

۱. چگالی توده

چگالی توده (Bulk Density (BD) پلت‌های تولیدی به حجم فضاهای خالی در توده و چگالی حقیقی پلت‌ها بستگی دارد چگالی توده‌ای بر اساس روش بکار گرفته شده توسط Liu et al [۷] به عنوان نسبت جرم ماده به حجم ظرف برپایه پانزده عدد پلت محاسبه شده است.

۲. دوام مکانیکی

برخی از پلت‌ها به طور تصادفی از هر یک از شرایط آزمایش طراحی شده انتخاب و با استفاده از ترازوی دیجیتالی دقیق وزن و جرم اولیه آنها ثبت شد. سپس توسط یک غربال ارتعاشی با اندازه الک ۲٫۸ میلیمتر و به مدت ۱۵ دقیقه در معرض ارتعاش قرار گرفتند. [۸] سپس نمونه‌ها دوباره وزن شده و جرم نهایی ثبت شد. دوام پلت با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$PDI = 100 - \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

که در آن PDI شاخص دوام مکانیکی ($\%$)، m_i جرم اولیه پلت‌ها (gf) و m_f جرم نهایی پلت‌ها می‌باشد.

۳. ارزش حرارتی و میزان خاکستر

هر یک از نمونه‌های پلت ترکیبی در روش تاگوچی توسط بمب کالریتر موجود در آزمایشگاه مرکز تحقیقات علوم دامی کرج (PARR ۱۲۶۱) مورد آزمایش قرار گرفته و ارزش حرارتی برحسب کالری بر گرم و میزان خاکستر آن‌ها برحسب درصد ماده خشک با کمک احتراق در کوره و بوته چینی در آزمایشگاه مذکور گزارش شد.



شکل ۱: انواع پلت‌های زیست‌توده

طراحی آزمایش به روش تاگوچی

به طور کلی **اهداف طراحی آزمایشات**، **نتایج مطمئن‌تر**، **صرفه جویی در زمان**، **کاهش تعداد آزمایش‌ها و نهایتاً بهینه سازی فرایندهاست**. در طراحی تاگوچی که برای این پژوهش انتخاب شد فاکتورها و تداخل آن‌ها در یک فرایند به طور همزمان مورد مطالعه قرار گرفته که با اعمال تغییراتی آگاهانه در متغیرهای ورودی فرایند تغییرات خروجی را مشاهده و شناسایی می‌کند. آزمایش‌های تاگوچی از بین تعداد کل آزمایش‌های روش فاکتوریل کامل با ویژگی‌های خاصی و با استفاده از آرایه‌های متعامد (Orthogonal Array) انتخاب می‌شوند.

بهینه پلت زیست توده قابل تولید در ایران، نسبت به امکان سنجی تولید این محصول در ایران با توجه به وجود ضایعات زیاد کشاورزی و در نهایت آنالیز حساسیت آن نیز اقدام نموده است.

مواد و روشها

متغیرهای مهم در تهیه سوخت جامد زیست توده که تعیین کننده کیفیت محصول نهایی می‌باشد عبارتند از:

۱. مواد اولیه

معیار اصلی انتخاب مواد اولیه برای خوراک سوخت جامد و بهینه سازی ترکیب آن میزان در دسترس بودن، هزینه و ویژگی‌های حرارتی آن‌ها بود.

۲. میزان رطوبت

رطوبت در دو مرحله و به منظور تعیین رطوبت مواد خام اولیه و رطوبت نهایی محصول به کمک روش پیشنهادی در استاندارد ISO 18134 اندازه گیری شد. [۴]

۳. توزیع اندازه ذرات

جدول ۱ طیف توزیع اندازه ذرات را برای تولید پلت‌هایی با کیفیت بالا نشان می‌دهد. [۵]. در تهیه بریکت سعی بر بررسی ویژگی‌های ترموفیزیکی با مصرف حداقل انرژی بود لذا اندازه ذرات خاک اره و تفاله قهوه به همان صورت دریافت شده بررسی و با کمک الک‌ها در اندازه‌های ۰٫۲۴، ۱، ۰٫۵ و ۰٫۲۵ میلیمتر و به مدت ۱۰ دقیقه اندازه گیری شد.

جدول ۱: توزیع اندازه ذرات استاندارد برای تولید پلت با کیفیت بالا

| اندازه الک (میلیمتر) | مواد باقیمانده در الک |
|----------------------|-----------------------|
| ۳ | <۱٪ |
| ۲ | <۵٪ |
| ۱ | ~۲۰٪ |
| ۰٫۵ | ~۳۰٪ |
| ۰٫۲۵ | ~۲۴٪ |
| <۰٫۲۵ | >۲۰٪ |

۴. تنظیم دمای فرایند

از آنجا که در فرایند تولید دمای دای به بیش از ۹۰ درجه سانتیگراد رسیده [۶] و باعث نرم شدن لیگنین و ایجاد چسبندگی در مواد حتی بدون حضور افزودنی می‌شود. تولید پلت در شرایط آزمایشگاه نیز در همین دما صورت گرفت. برای اندازه گیری دمای قالب پلت‌ساز از ترموکوپل استفاده شد.

۵. فشار فرایند تولید

با توجه به شبیه‌سازی فرایند تولید صنعتی و همچنین بررسی آزمایشات اولیه، نیروی ۱۲۰۰۰ نیوتن برای ایجاد پلتی با استحکام و

۲۵ گرم از هر یک از نمونه‌های مورد آزمایش در بریکت‌ساز ریخته شد و نتایج اولیه نشان داد که تشکیل بریکت با چگالی و دوام مطلوب در نیروی اعمالی ۶ تن در دمای محیط نتایج مطلوبی را ایجاد می‌کند

تحلیل اقتصادی

یکی از مهمترین جنبه‌های اصلی سرمایه‌گذاری بر روی سوخت‌های زیست‌توده، بررسی و تحلیل مالی و اقتصادی آن است. نتایج آنالیز اقتصادی برای انواع پلت/بریکت با ترکیبات گوناگون می‌تواند کاملا متفاوت و متغیر باشد چرا که میزان در دسترس بودن، هزینه جمع‌آوری مواد اولیه، هزینه آماده سازی مواد اولیه، سازگاری با استانداردهای جهانی و غیره می‌تواند بر قیمت تولید، فروش و متعاقبا آنالیز اقتصادی محصول تاثیرات زیادی داشته باشد. از آنجا که مجال بررسی اقتصادی هر یک از ترکیبات مورد مطالعه در این پژوهش وجود ندارد لذا به آنالیز اقتصادی نمونه بهینه با توجه به حداقل میزان خاکستر اکتفا کردیم.

ارزش خالص فعلی

مقدار ارزش فعلی یک پروژه عبارت از تبدیل ارزش کلیه دریافت‌ها و پرداخت‌های سالیانه در طول عمر یک پروژه به زمان حال با در نظر گرفتن حداقل نرخ مورد انتظار سرمایه‌گذار می‌باشد. که از فرمولهای زیر محاسبه می‌شود. [۱۰]

$$NPW = PWB - PWC \quad (3)$$

$$NPW = -IC + \frac{\sum_{t=1}^N ACF_t}{(1+i)^t} \quad (4)$$

که در آن PWB ارزش فعلی درآمدها و PWC ارزش فعلی هزینه‌ها، IC هزینه سرمایه‌گذاری اولیه طرح، i نرخ سود، N عمر در نظر گرفته شده برای طرح، ACF درآمد سالانه پس از کسر هزینه‌ها می‌باشد. [۸]

نرخ بازده داخلی

نرخ بازگشت سرمایه نرخ سالیانه‌ای است که تعادل بین درآمدها و هزینه‌ها را در طول عمر در نظر گرفته شده برای پروژه نشان می‌دهد. در نرخ بازده داخلی مقدار ارزش فعلی خالص یک پروژه صفر می‌شود. که از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$NPW = \frac{\sum_{t=0}^N C_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (5)$$

که در آن C_t درآمد خالص، IRR نرخ بازده داخلی است که ارزش حال درآمدها و هزینه‌ها را صفر می‌کند و حداکثر نرخ بهره برای سرمایه‌گذاری را نشان می‌دهد.

هر چند که جواب بهینه الزاما در آزمایش‌های پیشنهاد شده وجود ندارد اما با استفاده از محاسبات آرایه‌ها می‌توان شرایط بهینه و جواب را در این شرایط تعیین و با انجام آزمایش‌های تاییدکننده، صحت آن را تایید کرد. تاگویی برای بررسی پراکندگی پاسخ‌ها از تابع مربع انحراف استاندارد از رابطه زیر استفاده می‌کند. [۹]

$$\frac{S}{N} = -10 \log(MSD) \quad (2)$$

$\frac{S}{N}$ نشانه مطلوبیت عملکرد و MSD میزان پراکندگی را نشان می‌دهد لذا حداکثر کردن $\frac{S}{N}$ منجر به حداقل شدن زیان کیفی (MSD) می‌شود. نرم افزار مینی تب ۱۷ در این پژوهش، به عنوان ابزار تحلیل مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲: فاکتورها و سطوح انتخابی پلت

| Feedstock | Additives | Ratio |
|--------------------------------|-----------------------------------------|-------|
| Walnut چوب گردو Wood (WW) | Silver Skin (SS) پوست نقره‌ای قهوه | ۱۰۰-۰ |
| Citrus چوب مرکبات Wood (CW) | Spent Coffee Ground تفاله قهوه (SCG) | ۸۰-۲۰ |
| Pine چوب کاج Wood (PN) | Leaflet (LL) الیاف نخل | ۵۰-۵۰ |

جدول ۳: فاکتورها و سطوح انتخابی بریکت

| Feedstock | Additives | Ratio |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------|
| Sawdust (SW) خاک اره | گلیسرول Glycerol (GL) | ۸۰-۲۰ |
| Spent Coffee Ground (SCG) | موم سویا Soy Wax (SOYW) | ۶۰-۴۰ |
| Corn ضایعات بوته ذرت Stalk (COR) | ملاس Molasses (MOL) | ۵۰-۵۰ |

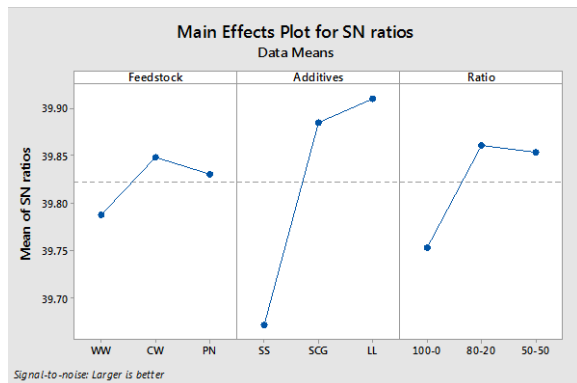
ترکیب بهینه تک هدفه

به منظور یافتن ترکیب بهینه اهداف مستقلی در نظر گرفته شد. تابع هدف برای چگالی، دوام مکانیکی و ارزش حرارتی به صورت "بیشتر، بهتر" و برای محتوای خاکستر به صورت "کمتر، بهتر" انتخاب شد. نسبت سیگنال به نویز بیشتر نشان دهنده عملکرد بهتر مستقل از هر نوع تابع ضرر می‌باشد و پارامترهای متناظر با آن به عنوان تنظیمات بهینه فاکتورها و سطوح متناظر با آن‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

تهیه پلت / بریکت آزمایشگاهی

پلت در دستگاه پلت‌ساز شامل سیلندر، پیستون، کفی و محفظه که بین دو فک دستگاه تست کشش - فشار اینسترون (Instron5586) قرار گرفت ساخته شد. بریکت زیست‌توده در یک سیلندر پیستون به قطر ۵ سانتی‌متر و توسط همان دستگاه کشش و فشار ساخته شد.

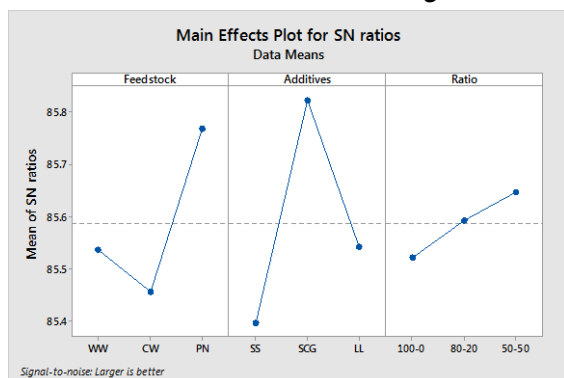
تخمینی برگرداند. از آنجا که مقدار میانگین تخمین زده شده در آزمایشات انجام شده وجود ندارد، آزمایش دوام مکانیکی برای این ترکیب از پلت انجام شده و با مقدار تخمینی توسط نرم افزار مقایسه شد. (شکل ۳)



شکل ۳: نمودار سیگنال به نویز برای دوام مکانیکی

مقدار (S/N) در این شرایط ۳۹/۹۷۶ و مقدار میانگین تخمین زده شده برای شاخص دوام مکانیکی در ترکیب چوب مرکبات و الیاف نخل با نرخ ۲۰-۸۰ مقدار ۹۹/۷٪ خواهد بود. تست نهایی مقدار ۹۹/۲۳٪ را نشان داد که با تخمین نرم افزار اختلاف کمی داشت.

ترکیب بهینه پلت با هدف بیشترین ارزش حرارتی پایین همانطور که در نمودار شکل نشان داده شده است فاکتورها در ترکیب چوب کاج و تفاله قهوه با نسبت ۵۰-۵۰ بیشتر بین ارزش حرارتی را دارد. میزان پیش بینی شده ارزش حرارتی برای این ترکیب از مواد توسط نرم افزار ۲۰۰۷۷/۳ کیلوژول بر کیلوگرم تخمین زده شده است (شکل ۴).



شکل ۴: نمودار سیگنال به نویز برای ارزش حرارتی بر اساس ماده خشک

ترکیب پیشنهادی فوق تهیه و برای تست تایید و مقایسه با مقدار پیش بینی شده به آزمایشگاه علوم دامی فرستاده شد. نتیجه حاصل مقدار ۱۹۹۱۳/۳ کیلوژول بر کیلوگرم را نشان داد که با تخمین نرم افزار اختلاف ۱۶۴ کیلوژول بر کیلوگرم دارد.

ترکیب بهینه پلت با هدف بیشترین ارزش حرارتی پایین

فرضیات مالی و اقتصادی

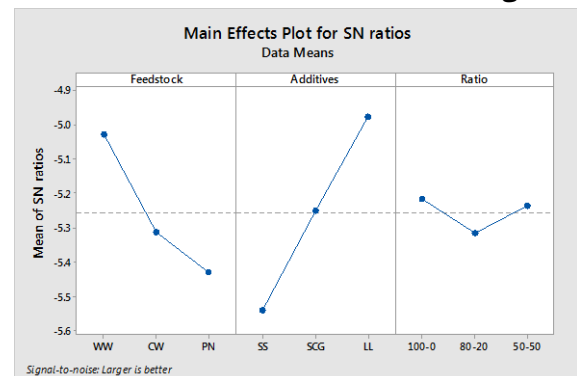
فرضیهایی که به منظور بررسی و تحلیل شاخصهای امکانسنجی طرح تولید پلت در نظر گرفته شده اند عبارتند از طول دوره مطالعات مالی، ۱۰ ساله، ظرفیت تولید، یک تن در ساعت معادل ماهیانه ۲۸۸ تن، نرخ تنزیل (حداکثر نرخ بدون ریسک) ۲۰٪، مبلغ تسهیلات ۷۰٪ از سرمایه ثابت با دوره بازگشت ۵ ساله و نرخ بهره ۳٪ و تعداد روزهای کاری ۲۴ روز در ماه در نظر گرفته شده است. نرخ تبدیل ارز برای محاسبه هزینهها بر اساس ۰/۲۵ میلیون ریال محاسبه گردید.

نتایج

میانگین داده های موجود برای هر یک از پارامترهای اندازه گیری شده به نرم افزار منتقل شد و مقدار سیگنال به نویز آن محاسبه و نمودار آن ترسیم شد با توجه با اینکه مقدار مطلوب برای هر ترکیب بیشترین مقدار سیگنال به نویز را دارا می باشد، ترکیب بهینه با توجه به اهداف زیر قابل دسترسی می باشد.

ترکیب بهینه پلت با هدف بیشترین چگالی توده

شرایط بهینه برای چگالی توده با توجه به نمودار سیگنال به نویز (شکل ۲) معادل ماده اصلی چوب گردو، افزودنی الیاف نخل با نسبت ۱۰۰-۰ می باشد.



شکل ۲: نمودار سیگنال به نویز برای چگالی توده (BD)

با قرار دادن فاکتورها در سطوح بهینه، نرم افزار مقدار سیگنال به نویز را در این حالت محاسبه و آن را به مقدار میانگین بطور تخمینی برگرداند. شرایط فوق در آزمایشات انجام شده وجود داشته و مقدار میانگین حاصل از آن ۰/۵۱۵ گرم بر سانتیمتر مکعب گزارش شده است که با مقدار پیش بینی شده توسط نرم افزار اختلافی حدود ۰/۰۶۷ گرم بر سانتی متر مکعب دارد.

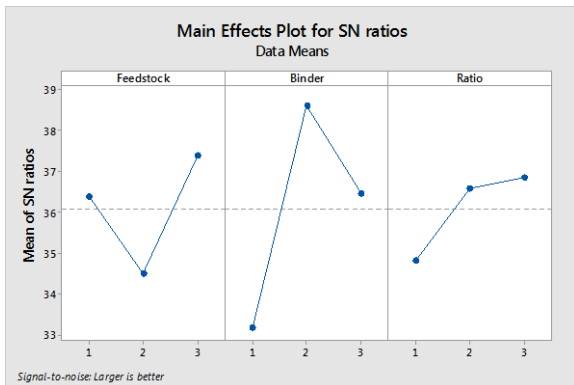
ترکیب بهینه پلت با هدف بیشترین دوام مکانیکی

تابع ضرر شاخص دوام مکانیکی پلت نیز به صورت "بیشتر، بهتر" تعریف و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز بالاتر به صورت معادل ماده اصلی چوب مرکبات، افزودنی الیاف نخل با نسبت ۲۰-۸۰ می باشد. با قرار دادن فاکتورها در سطوح بهینه پیشنهادی، نرم افزار مقدار سیگنال به نویز را در حالت بهینه محاسبه و آن را به مقدار میانگین

مقایسه شد. اختلاف این مقدار با مقدار واقعی (۰/۸۵/گرم بر سانتی متر مکعب) معادل ۰/۱۲۸/گرم بر سانتی متر مکعب بود.

ترکیب بهینه بریکت با هدف بیشترین دوام مکانیکی

دوام مکانیکی شاخصی مهم برای توانایی سالم ماندن بریکت‌ها در هنگام حمل و نقل است. تابع شاخص دوام مکانیکی نیز به صورت "بیشتر، بهتر" تعریف و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز بالاتر معادل ماده اصلی ضایعات ذرت، افزودنی موم سویا با نسبت ۵۰-۵۰ است. (شکل ۷)



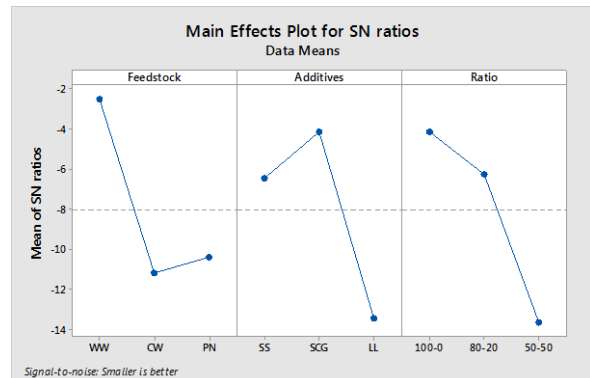
شکل ۷: نمودار سیگنال به نویز برای دوام مکانیکی بریکت

با قرار دادن فاکتورها در سطوح بهینه پیشنهادی، نرم‌افزار مقدار سیگنال به نویز را در حالت بهینه محاسبه و آن را به مقدار میانگین برگرداند. مقدار میانگین تخمین زده شده برای شاخص دوام مکانیکی در ترکیب فوق ۹۸/۴۷ درصد می‌باشد. از آنجا که مقدار میانگین تخمین زده شده در آزمایشات انجام شده وجود ندارد. آزمایش دوام مکانیکی برای ترکیب ضایعات ذرت و موم سویا با نسبت وزنی مساوی انجام و دوام مکانیکی آن ۹۹/۴۳ درصد اندازه گیری شد.

ترکیب بهینه بریکت با هدف محتوای خاکستر کمتر

همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، هر سه فاکتور در سطح یک حداکثر مقدار سیگنال به نویز را دارند. این سطوح عبارتند از خاک اره و گلیسرول با نسبت ۲۰-۸۰ که در آزمایشات صورت گرفته وجود دارد. میزان پیش بینی شده محتوای خاکستر برای این ترکیب از مواد توسط نرم‌افزار ۱۴/۳٪ پیش بینی شده است که با مقدار تجربی بدست آمده در آزمایشگاه (۱۲٪) اختلاف قابل قبول و نزدیکی دارد. (شکل ۸)

نمودار سیگنال به نویز برای محتوای خاکستر بر حسب درصد ماده خشک بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شه به نرم‌افزار داده شد و نمودار S/N آن ترسیم شد. بر خلاف سایر خروجی‌ها تابع ضرر خاکستر به صورت "کمتر، بهتر" تعریف شد. (شکل ۵)

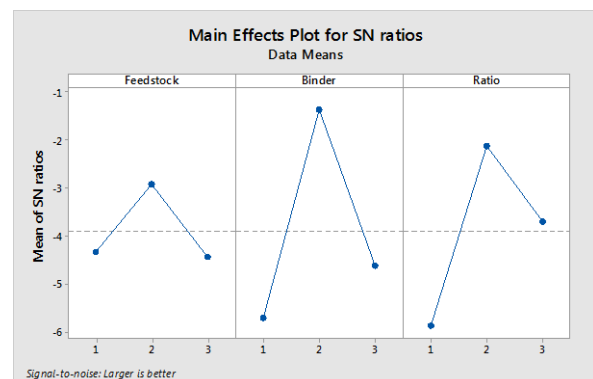


شکل ۵: نمودار سیگنال به نویز برای محتوای خاکستر ماده خشک

همانطور که در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است. سطوح بهینه عبارتند از ترکیب چوب گردو و تفاله قهوه و با نسبت ۰-۱۰۰٪. میزان پیش بینی شده محتوای خاکستر برای این ترکیب از مواد توسط نرم‌افزار ۵۴٪ می‌باشد. نمونه بهینه در بین آزمایشات بوده و میزان آن ۴۵٪ می‌باشد و اختلاف آن با تخمین نرم‌افزار ۰/۰۹٪ می‌باشد که تفاوت قابل قبولی است.

ترکیب بهینه بریکت با هدف بیشترین چگالی

از آنجا که مستقل از تابع ضرر در حالت کلی نسبت سیگنال به نویز بالاتر همواره مطلوب بوده است. شرایط بهینه برای بالاترین چگالی بریکت به صورت سطح ۲ برای ماده اصلی، سطح ۲ برای افزودنی و سطح ۲ برای نسبت ترکیب است که معادل ماده اصلی تفاله قهوه، افزودنی موم سویا با نسبت ۴۰-۶۰٪ می‌باشد. (شکل ۶)

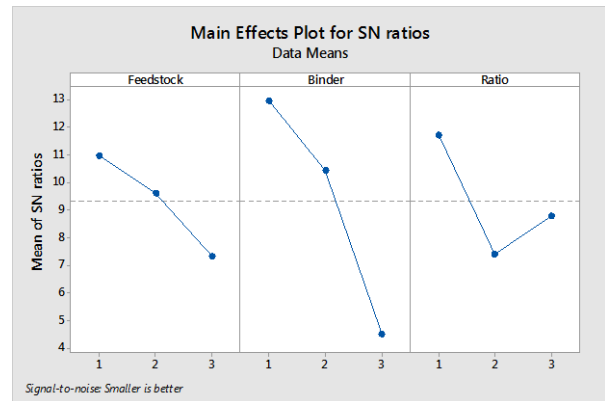


شکل ۶: نمودار سیگنال به نویز برای چگالی بریکت

با قرار دادن فاکتورها در سطوح بهینه پیشنهادی نرم‌افزار مقدار سیگنال به نویز را در حالت بهینه محاسبه و آن را به مقدار میانگین برگرداند. از آنجا که سطوح پیشنهادی در آزمایشات انجام شده وجود ندارد. بریکت مورد نظر با سطوح فوق ساخته شد و با مقدار تخمینی



| | | | |
|------|------|--------|---------------------|
| ۱۴۰۲ | %۱۰۰ | ۲۹۳۷۶۰ | ۲۹۳۷۶۰ |
| ۱۴۰۳ | %۱۰۰ | ۲۹۳۷۶۰ | ۲۹۳۷۶۰ |
| ۱۴۰۴ | %۱۰۰ | ۲۹۳۷۶۰ | ۲۹۳۷۶۰ |
| ۱۴۰۵ | %۱۰۰ | ۲۹۳۷۶۰ | ۲۹۳۷۶۰ |
| ۱۴۰۶ | %۱۰۰ | ۲۹۳۷۶۰ | ۲۹۳۷۶۰ |
| ۱۴۰۷ | %۱۰۰ | ۲۹۳۷۶۰ | ۲۹۳۷۶۰ |
| ۱۴۰۸ | %۱۰۰ | ۲۹۳۷۶۰ | ۲۹۳۷۶۰ |
| ۱۴۰۹ | %۱۰۰ | ۲۹۳۷۶۰ | ۲۹۳۷۶۰ |
| ۱۴۱۰ | %۱۰۰ | ۲۹۳۷۶۰ | ۳۰۳۸۶۰ |
| ۱۴۱۰ | | | ۱۰۱۰۰ (ارزش اسقاطی) |



شکل ۸: نمودار سیگنال به نویز برای محتوای خاکستر

جدول ۶: خروجی جریان نقدی در طول عمر مورد مطالعه طرح

| سال | هزینه‌های ثابت تولید (غیر از هزینه وام) (دلار) | هزینه‌های متغیر تولید (دلار) | خروجی جریان نقدی | |
|------|------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|
| | | | تسهیلات / وام (دلار) | تسهیلات / وام (دلار) |
| ۱۴۰۰ | | | (آورده نقدی) | |
| ۱۴۰۱ | ۱۱۵۶۶ | ۱۰۲۸۵۹ | ۳۳۰۱۵ | ۱۱۸۷۹ |
| ۱۴۰۲ | ۱۱۵۶۶ | ۲۰۵۷۱۸ | ۸۷۳۱ | ۲۲۶۰۱۵ |
| ۱۴۰۳ | ۱۱۵۶۶ | ۲۰۵۷۱۸ | ۸۷۳۱ | ۲۲۶۰۱۵ |
| ۱۴۰۴ | ۱۱۵۶۶ | ۲۰۵۷۱۸ | ۸۷۳۱ | ۲۲۶۰۱۵ |
| ۱۴۰۵ | ۱۱۵۶۶ | ۲۰۵۷۱۸ | ۸۷۳۱ | ۲۲۶۰۱۵ |
| ۱۴۰۶ | ۱۱۵۶۶ | ۲۰۵۷۱۸ | ۴۳۶۵ | ۲۲۱۶۴۹ |
| ۱۴۰۷ | ۱۱۵۶۶ | ۲۰۵۷۱۸ | | ۲۱۷۲۸ |
| ۱۴۰۸ | ۱۱۵۶۶ | ۲۰۵۷۱۸ | | ۲۱۷۲۸ |
| ۱۴۰۹ | ۱۱۵۶۶ | ۲۰۵۷۱۸ | | ۲۱۷۲۸ |
| ۱۴۱۰ | ۱۱۵۶۶ | ۲۰۵۷۱۸ | | ۲۱۷۲۸ |

جدول ۷: جریان نقدی کل در طول عمر مورد مطالعه طرح

| سال | جریان نقدی کل |
|------|---------------|
| ۱۴۰۰ | -۷۳۵۰۴ |
| ۱۴۰۱ | ۲۸۰۹۰ |
| ۱۴۰۲ | ۶۷۷۴۵ |
| ۱۴۰۳ | ۶۷۷۴۵ |
| ۱۴۰۴ | ۶۷۷۴۵ |
| ۱۴۰۵ | ۶۷۷۴۵ |
| ۱۴۰۶ | ۷۲۱۱۱ |
| ۱۴۰۷ | ۷۶۴۷۶ |
| ۱۴۰۸ | ۷۶۴۷۶ |
| ۱۴۰۹ | ۷۶۴۷۶ |
| ۱۴۱۰ | ۷۶۴۷۶ |
| ۱۴۱۰ | ۹۶۶۷۶ |

ارزیابی اقتصادی

خط تولید یک تن پلت چوب سخت در ساعت بر اساس کیفیت تجهیزات و ماشین آلات با کیفیت‌های مختلف و از داخل و یا به صورت وارداتی قابل طراحی و بررسی می‌باشد. آنالیز هزینه‌ها در این طرح بر اساس کیفیت متوسط خط تولید نیمه وارداتی بررسی شده است. هزینه‌های تولید شامل هزینه‌های سرمایه گذاری ثابت و سرمایه در گردش می‌باشد که مطابق جدول ۴ متناسب با میزان درصد در نظر گرفته شده قابل تفکیک می‌باشند.

آورده نقدی شامل سرمایه در گردش و ۳۰٪ سرمایه ثابت می‌باشد که جمعاً ۳۳۰۰۰ دلار خواهد بود. تسهیلات بانکی که مابقی سرمایه گذاری ثابت را شامل می‌شود با یک دوره تنفس نیم ساله و با نرخ بهره ۳٪ و با بازپرداخت ۵ ساله و اقساط ماهیانه ۷۲۸ دلار در نظر گرفته شده است. نمودار جریان نقدی در طول عمر مورد مطالعه طرح که ده سال در نظر گرفته شده است در جداول شماره ۵ و ۶ آورده شده است. حداقل میزان فروش ۸۵ دلار به ازای هر تن پلت در نظر گرفته شده است. جدول شماره ۷ حاصل تجمع جریان نقدی در طی ده سال را نشان می‌دهد.

جدول ۴: هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت و سرمایه در گردش

| شرح هزینه | جمع هزینه‌ها (دلار) |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| هزینه سرمایه‌گذاری ثابت (ماشین‌آلات، اداری، قبل بهره‌برداری، نصب و راه‌اندازی و ...) | ۵۷۸۴۲ |
| سرمایه در گردش (تفاوت دارایی‌های جاری و بدهی‌های جاری براساس دوره یک ماه) | ۱۵۶۶۲ |

جدول ۵: ورودی جریان نقدی در طول عمر مورد مطالعه طرح

| سال | ظرفیت تولید | درآمد (دلار) | وام بانکی (دلار) | جریان نقدی (دلار) |
|------|-------------|--------------|------------------|-------------------|
| ۱۴۰۰ | | | | ۴۰۴۹۰ |
| ۱۴۰۱ | %۵۰ | ۱۴۶۸۸۰ | | ۱۴۶۸۸۰ |

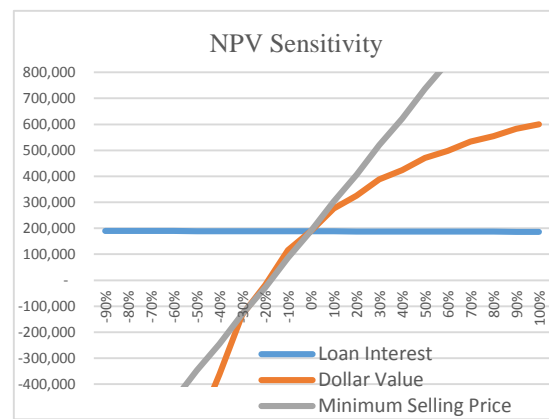


نتایج تحلیل حساسیت

به منظور بررسی اثر تغییرات متغیرهای گوناگون، تحلیل حساسیت نسبت به برخی از این متغیرها در این قسمت بررسی شده است. نرخ بهره بانکی، نرخ تبدیل ارز و حداقل قیمت فروش سه عامل مهم و در عین حال قابل تغییر هستند که با بررسی میزان تغییرات هر یک با دامنه $\pm 10\%$ میزان تغییرات ارزش خالص فعلی و نرخ بازده داخلی مورد محاسبه و نمودار مربوط به آن ترسیم شده است.

تحلیل حساسیت ارزش خالص فعلی

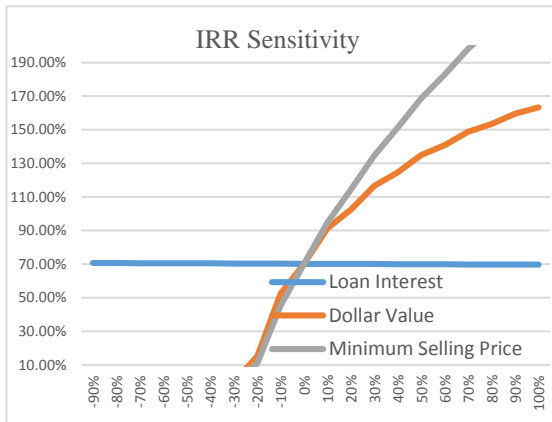
ارزش خالص فعلی (NPV) نسبت به افزایش / کاهش ده درصدی نرخ بانکی، حداقل قیمت فروش (دلار) و نرخ تبدیل ارز (میلیون ریال) محاسبه و نمودار متناظر با آن رسم شد. (شکل ۹)



شکل ۹: حساسیت ارزش فعلی خالص به متغیرهای جریان نقدی

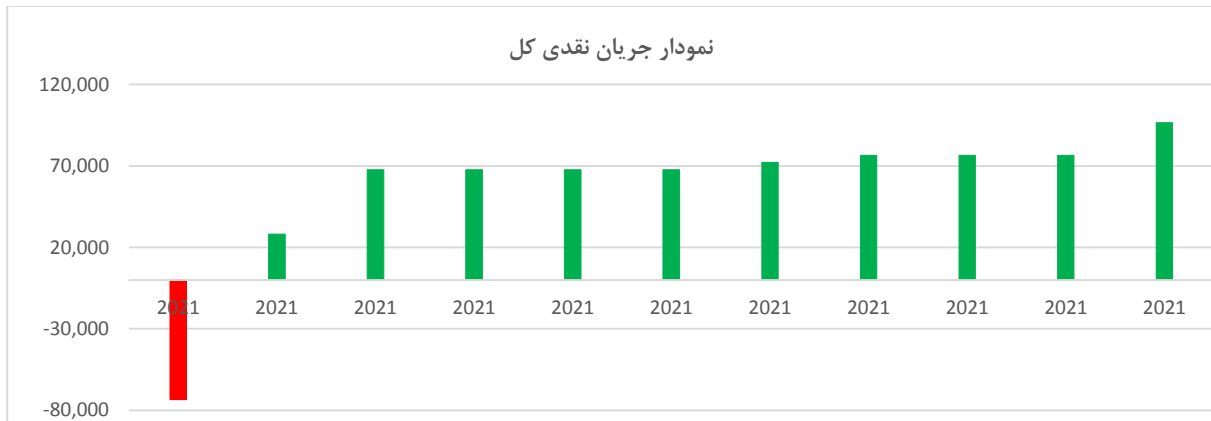
تحلیل حساسیت نرخ بازده داخلی

نرخ بازده داخلی (IRR) نسبت به افزایش/کاهش ده درصدی نرخ بانکی، حداقل قیمت فروش (دلار) و نرخ تبدیل ارز (میلیون ریال) محاسبه و نمودار متناظر با آن رسم شد. (شکل ۱۰)



شکل ۱۰: حساسیت نرخ بازده داخلی به متغیرهای جریان نقدی

نمودار جریان نقدی کل



شکل ۱۱: نمودار جریان نقدی تولید پلت سوخت جامد

biomass for green energy in Iran,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4934–4938, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.060.

[2] ر. زاده، “رسی اثر پارامترهای تولید بر روی برخی از خصوصیات کیفی پلت های سوختی تهیه شده از ضایعات هرس درخت پسته،” ۱۳۹۵.

[3] ج. م. نیا، “روش آزمایشگاهی تهیه پلت از پوسته شلتوک،” ۱۳۹۱.

[4] “ISO 18134-2 Solid biofuels — Determination of moisture content — Oven dry method.”

[5] M. A. Abdoli, A. Golzary, A. Hosseini, and P. Sadeghi, “Wood Pellet as a Renewable Source of Energy,” *Springer*. p. 197, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-74482-7.

[6] A. E. P. David Jones, “Wood Pellets – An introduction to their production and use.”

[7] Z. Liu, A. Quek, and R. Balasubramanian, “Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1315–1322, 2014.

[8] Z. Liu, B. Fei, Z. Jiang, Z. Cai, and Y. Yu, “The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw,” *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 1–5, 2013.

[9] R. K. Roy, *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 2010.

[10] د. اسکونزاد، *اقتصاد مهندسی - ارزیابی اقتصادی*

پروژه های صنعتی. .

نمودار دوره ای جریان نقدی پروژه در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

نتیجه گیری

بهینه سازی تک هدفه با استفاده از روش تاگوچی برای پلتها و بریکتهای ترکیبی ساخته شده از ضایعات کشاورزی و فرآوری کشاورزی انجام شد. ویژگی های کیفی از جمله چگالی، دوام مکانیکی، ارزش حرارتی و محتوای خاکستر برای تعیین پارامترهای فرآیند بهینه ارزیابی شد ترکیب بهینه پلت برای چگالی، شاخص دوام مکانیکی، ارزش حرارتی و محتوای خاکستر به ترتیب ترکیب چوب گردو، افزودنی الیاف نخل با نسبت ۱۰۰-۰، چوب مرکبات، افزودنی الیاف نخل با نسبت ۸۰-۲۰، ترکیب چوب کاج و تفاله قهوه با نسبت ۵۰-۵۰ و خاک اره و گلیسرول با نسبت ۸۰-۲۰ و برای چگالی، دوام و محتوای خاکستر بریکتها به ترتیب تفاله قهوه، افزودنی موم سویا با نسبت ۶۰-۴۰، ضایعات ذرت، افزودنی موم سویا با نسبت ۵۰-۵۰ و خاک اره و گلیسرول با نسبت ۸۰-۲۰ ارزیابی شد. تست های تایید نتیجه انجام و با نتایج تخمینی نرم افزار مطابقت داشت. علاوه بر این، یک مدل اقتصادی به منظور ارزیابی امکان سنجی سرمایه گذاری کارخانه تولید پلت مورد ارزیابی قرار گرفت و آنالیز حساسیت نشان داد که قیمت فروش و نرخ ارز سهم عمده ای در NPV و IRR کل پروژه دارند، در حالی که تغییرات نرخ بهره وام تنها تأثیر ناچیزی بر شاخص های ذکر شده داشت.

مراجع

[1] Y. Hamzeh, A. Ashori, B. Mirzaei, A. Abdulkhani, and M. Molaei, “Current and potential capabilities of

ACEC2021-36819

تأثیر آرایش میدان جریان مارپیچی هفت مسیره بر عملکرد حرارتی و الکتروشیمیایی پیل سوختی غشا پلیمری

ابراهیم افشاری^۱، نبی جهانتیغ^۲، علی شریفی^۳، مسعود ضیایی راد^۴

^۱دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، e.afshari@eng.ui.ac.ir

^۲دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل

^۳کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

^۴دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

چکیده

در این مقاله عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری با مدل سازی همزمان کانال های گاز و خنک کاری با میدان جریان مارپیچی هفت مسیره بررسی شده است. معادلات بهم پیوسته الکتروشیمیایی و حرارتی با استفاده از نرم افزار آنسیس فلونت و به روش حجم محدود و تک دامنه و در حالت پایا حل شده اند. نتایج بیانگر این است که استفاده از مدل مارپیچی باعث افزایش چگالی جریان تولیدی و پخش بهتر واکنش گرها در سطح لایه کاتالیست می شود. همچنین، نتایج نشان می دهند که استفاده از الگوی مارپیچی به توزیع نسبتاً یکنواخت اکسیژن و به تبع آن دانسیته جریان منجر می شود. ضمن این که غشا نیز کاملاً هیدراته است و منجر به عبور مناسب پروتون از آن می شود؛ اما توزیع دمای پیل در این آرایش یکنواخت نیست.

واژه های کلیدی: پیل سوختی غشا پلیمری، میدان جریان، عملکرد پیل، توزیع دما، میدان جریان مارپیچی

مقدمه

عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری مستقیماً به طراحی صفحات قطبی و الگوی کانال های جریان این صفحات مربوط است. با طراحی بهینه نوع، اندازه یا الگوی کانال ها می توان به افزایش توان دست یافت. طرح صفحات قطبی نقش قابل توجهی در انتقال واکنش گرها و مدیریت آب در پیل سوختی دارد. شیمپالی [۱] به بررسی تأثیر سه آرایش مختلف میدان جریان گاز روی عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری پرداخت. کانال هایی با مجرای عبور گاز و حاشیه ی پهن، باریک و معمولی در این پژوهش بررسی و نتایجی از قبیل ارتباط نوع و پهنای کانال با شرایط عملکرد پیل سوختی، افت فشار، مدیریت آب و ... ارائه شده

است. لیو و همکاران [۲] به بررسی و مقایسه سه شکل مثلثی، مستطیلی و نیم دایره برای کانال جریان پرداخته اند. نتایج آنها نشان می دهد به ازای نرخ جریان گاز ورودی برابر، مقاطع نیم دایره و مستطیلی به ترتیب بیشترین و کمترین افت فشار و مصرف گاز هیدروژن را دارند. یک مدل اصلاح شده واگرای مارپیچی با پهنای متغیر توسط وانگ و همکارانش [۳] به منظور بهبود عملکرد پیل طراحی شده است. نتایج نشان می دهند که در مدل جدید توزیع نایکنواخت سوخت نسبت به مدل های مارپیچی بهبود یافته و محدوده چگالی جریان تقریباً ۱/۳۵ برابر شده است. روشندل و همکاران [۴] به مقایسه ی کانال جریان موازی و مارپیچی با کانال جریانی برگرفته از توزیع سیال در طبیعت مانند برگ پرداخته اند. نتایج نشان می دهند که در مدل برگرفته از طبیعت، توزیع سرعت و اجزا یکنواخت تر بوده است. افشاری و همکاران [۵] عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری را برای سه حالت بررسی کرده اند. اولین مدل با دو کانال جریان موازی، مدل دوم با کانال جریان با مانع محلی و مدل سوم استفاده از فوم فلزی به عنوان پخش کننده جریان است. آنها پس از حل عددی معادلات حرارتی و الکتروشیمیایی نتایج خود را ارائه کردند. نتایج نشان می دهند وجود مانع در مدل دوم باعث بهبود چگالی جریان و نرخ واکنش شیمیایی و عمل کرد پیل می شود.

توزیع یکنواخت دما برای کنترل بهتر و عملکرد بالاتر پیل سوختی غشا پلیمری حائز اهمیت است. در پیل های سوختی غشا پلیمری، بالغ بر نیمی از انرژی شیمیایی هیدروژن در طی فرایند تولید الکتریسیته به گرما تبدیل شده که اگر به خوبی دفع نشود می تواند به ضعف عملکردی و خرابی پیل منجر شود. افشاری و همکاران [۶] در پژوهشی از فوم فلزی در میدان جریان خنک کاری توده پیل استفاده کرده اند. در قیاس

بین کانال خنک کاری موازی، مارپیچ معمول و با کانال با فوم فلزی نتایج نشان می دهند که استفاده از فوم فلزی در کانال بهترین گزینه برای کاهش اختلاف دمای سطح، بیشینه و میانگین دمای سطح است. چن و همکاران [۷] تحلیلی برای میدان جریان خنک کاری به منظور بهینه سازی طرح میدان جریان خنک کاری پیل سوختی غشا پلیمری ارائه نمودند. در این تحقیق شاخص یکنواختی دما یعنی میزان تغییرات دما در سطح خنک کاری برای کانال های موازی و مارپیچی میدان جریان خنک کاری بررسی شده است. نتایج خنک کاری بهتر در روش مارپیچی را نشان می دهند؛ اما کانال های موازی افت فشار کمتری دارد. چوی و همکاران [۸] به بررسی آرایش موازی و مارپیچی ساده و همچنین موازی و مارپیچی اصلاح شده پرداختند. در این تحقیق سطح جامدی که در تماس با محیط بیرون است عایق لحاظ شده و جریان سیال و انتقال حرارت در صفحات خنک کاری با تغییر دادن شار حرارتی و شرایط عملکردی بررسی شده اند. در قسمت نتایج توزیع دما در روش های معمولی و اصلاح شده ارائه شده اند.

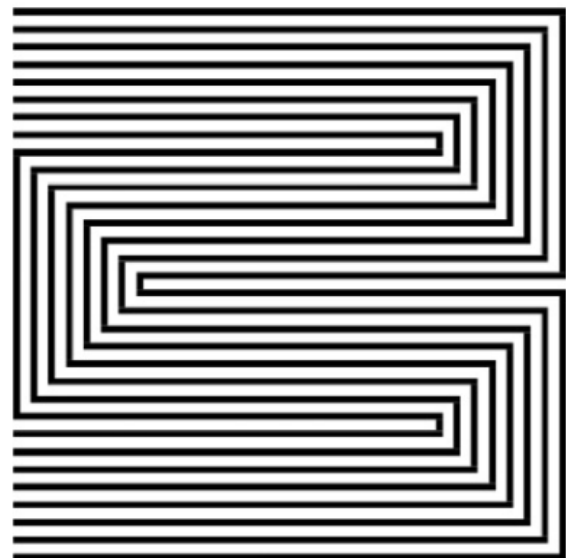
افشاری و همکاران [۹] به بررسی عددی جریان سیال در کانال موجی برای خنک کاری پیل سوختی غشا پلیمری پرداخته اند. نتایج این تحقیق نشان می دهند که استفاده از کانال موجی در قیاس با کانال های مستقیم، دمای بیشینه ی سطح، اختلاف دمای سطح و شاخص یکنواختی دما به ترتیب ۵٪، ۲۳٪ و ۸٪ کاهش یافته و عملکرد خنک کاری پیل بهبود می یابد. شولتا و همکاران [۱۰] به بررسی عملکرد پیل سوختی با استفاده از گاز خشک برای آند و گاز مرطوب برای کاتد در سه نوع آرایش مختلف جریان گاز پرداخته اند. از بین روش های جریان هم راستا و هم جهت، جریان عمودی و جریان هم راستا و غیر هم جهت، مورد آخر به دلیل توزیع بیشتر رطوبت بهترین عملکرد پیل را به دست می دهد. ساسمیتو و همکاران [۱۱] به بررسی عددی آرایش های مختلف کانال های خنک کاری و کانال های گاز برای توده ی پیل سوختی غشا پلیمری پرداخته اند. در این تحقیق مدل سازی پیل خنک-شونده با مایع، بررسی همزمان کانال خنک کاری و گاز و اثر نرخ جریان خنک کننده روی پیل سوختی بررسی شده اند.

مدیریت حرارت در پیل سوختی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و بر عملکرد کلی پیل به شدت تاثیرگذار است. در مطالعات گذشته کم تر به بررسی همزمان عملکرد پیل و خنک کاری آن پرداخته شده است. در تحقیقات گذشته، مطالعه ی پیل یا بدون در نظر گرفتن کانال های خنک کاری انجام گرفته یا کانال های خنک کاری مجزا مدل سازی شده و گرماهای تولیدی در داخل پیل صرفاً به عنوان یک شرط مرزی برای مدل سازی در نظر گرفته شده اند. طبیعی است این شرط مرزی غیر دقیق بوده و دقت حل عددی را تحت تاثیر قرار می دهد. در حالی که حل به هم پیوسته ی مدل الکتروشیمیایی و میدان جریان خنک کاری با حذف نیاز به اعمال شرایط مرزی دقت حل عددی را بالا می برد. از این رو در این مقاله به مدل سازی همزمان پیل (عملکرد سیالاتی، انتقال حرارت، انتقال جرم و روابط الکتروشیمیایی) همراه با مدل سازی

کانال های خنک کاری پرداخته می شود. مدل سازی الکتروشیمیایی پیل سوختی غشا پلیمری و بررسی تاثیر چند میدان جریان خنک کاری بر عملکرد حرارتی و عملکرد کلی پیل سوختی و همچنین بررسی همزمان مدل الکتروشیمیایی و مدل حرارتی پیل (بررسی همزمان کانال های جریان گازهای واکنش گر و کانال های خنک کاری پیل) به منظور بررسی توزیع گازهای واکنش گر، توزیع چگالی جریان، توزیع دما و... از جمله مهم ترین اهداف این مقاله است.

معادلات حاکم و فرضیات

نواحی سه بعدی طراحی شده از پیل سوختی در نرم افزار انسیس شامل غشا، لایه های کاتالیست آند و کاتد، لایه های پخش گاز سمت آند و کاتد، کانال های گاز آند و کاتد، صفحات دو قطبی و کانال خنک کاری سمت کاتد در محیط شبکه بندی به سلول های کوچک تقسیم شده اند. معادلات حاکم بر روی تک تک سلول ها اعمال شده و به روش حجم محدود و با لحاظ شرایط مرزی، مجهولات مساله به دست می آیند. شکل ۱ میدان جریان مارپیچی استفاده شده را نشان می دهد.



شکل ۱. میدان جریان مارپیچی با هفت مسیر مارپیچی برای سمت آند، کاتد و کانال های خنک کاری

با توجه به پیچیدگی معادلات حاکم بر پیل سوختی غشا پلیمری، لحاظ فرضیات صحیح و ساده کننده بدون آن که مدل و نتایج از واقعیت فاصله بگیرند، بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله مخلوط گازهای واکنش گر در پیل، گاز کامل و با لزجت ثابت فرض شده و جریان در کانال ها دائم و آرام بوده و سیال تراکم ناپذیر است. همچنین لایه های کاتالیست و غشا یکنواخت و همگن بوده و از عبور گاز داخل غشا صرف نظر می شود. معادلات حاکم شامل پیوستگی، ممنوم، بقای انرژی، بقای اجزا و بقای پتانسیل هستند که در جدول ۱ ارایه شده اند.



جدول ۱. معادلات حاکم؛ خواص الکتروشیمیایی و فیزیکی پیل

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| $\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$ | (۱) بقای جرم |
| $\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu^{eff} \nabla \vec{u}) + S_m$ | (۲) ممنتوم |
| $S_m = -\frac{\mu}{K_p} \varepsilon_m x_m \vec{u} + \frac{K_\phi}{K_p} c_f n_f F \nabla \phi_m$ | (۳) ترم چشمه ممنتوم در غشا |
| $S_m = -\frac{\mu}{K} \varepsilon \vec{u}$ | (۴) ترم چشمه در محیط متخلخل |
| $(\rho c_p)_{eff} (\vec{u} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_e$ | (۵) بقای انرژی |
| $(\rho c_p)_{eff} = (1 - \varepsilon) \rho_s c_{p,s} + \varepsilon \rho c_p$ | (۶) |
| $k_{eff} = -2k_s + \left[\frac{\varepsilon}{2k_s + k} + \frac{1 - \varepsilon}{3k_s} \right]^{-1}$ | (۷) |
| $S_e = j \left[\Delta V_{act} - \frac{T \Delta S}{nF} \right] + \left(\frac{i_m^2}{K_m^{eff}} + \frac{i_e^2}{K_s^{eff}} \right) - \sigma A_{fg} (X_{sat} - X_{H_2O(g)}) (\Delta h_{fg})$ | (۸) ترم چشمه‌ی انرژی در لایه‌ی کاتالیست |
| $S_e = \sigma A_{fg} (X_{sat} - X_{H_2O(g)}) \Delta h_{fg}$ | (۹) ترم چشمه‌ی انرژی در کانال |
| $S_e = \frac{i_e^2}{K_s^{eff}} - \sigma A_{fg} (X_{sat} - X_{H_2O(g)}) \Delta h_{fg}$ | (۱۰) ترم چشمه‌ی انرژی در لایه‌ی پخش گاز |
| $S_e = \frac{i_m^2}{K_m}$ | (۱۱) ترم چشمه‌ی انرژی در غشا |
| $\nabla \cdot (\vec{u} \varepsilon \rho X_i) = \nabla \cdot (\rho D_{i,eff} \nabla X_i) + S_{s,i}$ | (۱۲) بقای اجزا |
| $D_{i,eff} = D_i \varepsilon^\tau$ | (۱۳) ضریب پخش جریان آزاد |
| $S_{s,H_2} = -j_a \frac{M_{H_2}}{2F}$ | (۱۴) ترم چشمه بقا اجزا هیدروژن |
| $S_{s,O_2} = -j_c \frac{M_{O_2}}{4F}$ | (۱۵) ترم چشمه بقا اجزا اکسیژن |
| $S_{s,H_2O(g)} = \sigma A_{fg} (X_{sat} - X_{H_2O(g)})$ | (۱۶) ترم چشمه بقا اجزا بخار آب |
| $S_{s,H_2O(l)} = +j_c \frac{M_{H_2O}}{2F} - \sigma A_{fg} (X_{sat} - X_{H_2O(g)})$ | (۱۷) ترم چشمه بقا اجزا آب مایع |
| $\nabla \cdot (K_s^{eff} \nabla \phi_s) = S_{\phi_s}$ | (۱۸) بقای پتانسیل جامد |
| $\nabla \cdot (K_m^{eff} \nabla \phi_m) = S_{\phi_m}$ | (۱۹) بقای پتانسیل الکترولیت |
| $S_{\phi_s} = -j_a \quad S_{\phi_m} = j_a$ | (۲۰) کاتالیست آند |
| $S_{\phi_s} = j_c \quad S_{\phi_m} = -j_c$ | (۲۱) کاتالیست کاتد |
| $j_a = a i^+_{0,a} \left\{ \exp \left[\frac{-a_a F \Delta V_{act,a}}{RT} \right] - \exp \left[\frac{(1-a_a) F \Delta V_{act,a}}{RT} \right] \right\}$ | (۲۲) چگالی تبادل جریان آند |
| $j_c = a i^+_{0,c} \left\{ \exp \left[\frac{-a_c F \Delta V_{act,c}}{RT} \right] - \exp \left[\frac{(1-a_c) F \Delta V_{act,c}}{RT} \right] \right\}$ | (۲۳) چگالی تبادل جریان کاتد |
| $i^+_0 = i^{ref}_0 \left(\frac{P_r}{P_{ref,r}} \right)^\gamma \exp \left[\frac{E_c}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_{ref}} \right) \right]$ | (۲۴) چگالی جریان مرجع |
| $\Delta V_{act} = \phi_s - \phi_m - V_{ref}$ | (۲۵) |
| $V_{ref} = E_{T,p} = - \left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T \Delta S}{nF} \right) + \frac{RT}{nF} \ln \left[\left(\frac{P_{H_2}}{P_0} \right) \left(\frac{P_{O_2}}{P_0} \right)^{1/2} \right]$ | (۲۶) |

حل عددی و شرایط مرزی

معادلات حاکم بر پیل سوختی به روش حجم محدود گسسته‌سازی شده و برای یافتن مجهولات سرعت، فشار، دما، نسبت جرمی اجزا و

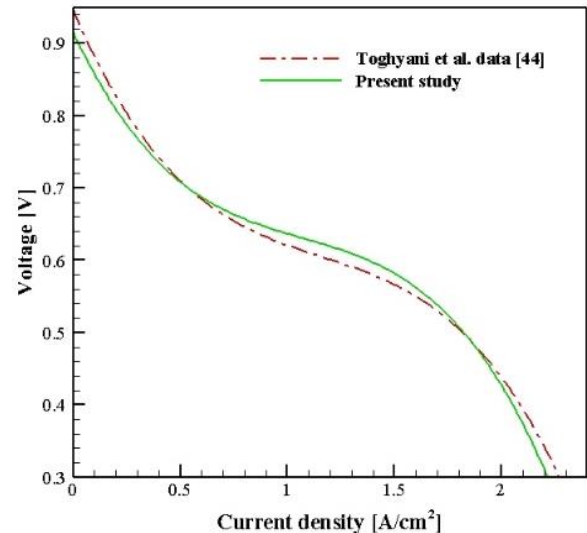
بار الکتریکی در نرم‌افزار انسیس-فلوئنت و با روش تک‌دامنه حل می‌شوند. الگوریتم سیمپل برای هم‌بستگی سرعت و فشار و روش بالا دستی مرتبه دو برای حل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در نظر گرفته شده‌است. به دلیل هم‌بستگی و غیرخطی بودن معادلات حاکم روند تکرار برای حل در نظر گرفته شده‌است. روند همگرایی حل تکراری، بر اساس رسیدن مقادیر باقی‌مانده‌های حل به زیر معیار همگرایی است. در ورودی کانال‌های آند و کاتد و خنک‌کاری از شرط مرزی نرخ جریان جرمی ورودی استفاده شده است. در خروجی کانال‌ها از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است. دیواره‌های خارجی عایق شده و شرط عدم لغزش روی آنها صادق است. جدول ۲ شرایط عملکردی، خواص وابسته به جنس و دبی‌های جریان را نشان می‌دهد.

جدول ۲. شرایط عملکردی و خواص بسته به جنس

| مقدار | واحد | مشخصه |
|--------|------------------|--------------------------|
| 353 | K | دمای ورودی گاز |
| 313 | K | دمای ورودی سیال خنک‌کاری |
| 998.2 | kg | چگالی سیال خنک‌کاری |
| 0.0010 | $\frac{m^3}{kg}$ | لزجت سیال خنک‌کاری |
| 4182 | J/kg K | گرمای ویژه سیال خنک‌کاری |
| 1 | Atm | |
| 0.2 | l/min | دبی آند |
| 1.5 | l/min | دبی کاتد |
| 0.3 | l/min | دبی خنک‌کاری |
| 0.5 | - | ضریب تخلخل GDL |
| 0.5 | - | ضریب تخلخل کاتالیست |

صحت‌سنجی روش حل عددی

برای سنجش صحت روش حل عددی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سه بخش الکتروشیمیایی، سیالاتی و حرارتی با کارهای گذشته مقایسه شده است. بدین منظور ابتدا پیل سوختی با الگوی جریان گاز و خنک‌کاری موازی طراحی شده و مطابق شکل ۲ نمودار ولتاژ-چگالی جریان آن با نمودار عملکرد در مرجع [۱۲] مقایسه شده‌است که تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌شود.



شکل ۲. مقایسه نمودار ولتاژ - جریان بین مدل موازی و مرجع [۱۲]

برای صحت‌سنجی نتایج میدان جریان خنک‌کاری به مقایسه‌ای افت فشار و عدد ناسلت در کانال خنک‌کاری مدل تولیدی با مرجع [۱۳] پرداخته شده‌است. رابطه‌ی (۲۷) حاصل ضرب ضریب اصطکاک در عدد رینولدز برای کانال مستطیلی با طول و عرض a و b را نشان می‌دهد.

$$f Re_{D_h} = 4 \times 24 \frac{a^2 + b^2}{(a+b)^2} \quad (27)$$

طبق رابطه‌ی (۲۸) افت فشار در کانالی با طول L و قطر هیدرولیکی D_h محاسبه می‌شود.

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \rho \frac{V^2}{2} \quad (28)$$

$$D_h = \frac{4A_{ch}}{P_{ch}} = \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (29)$$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (30)$$

با انتخاب یک میدان جریان خنک‌کاری از مدل موازی با طول ۵۰ میلی‌متر و محاسبه قطر هیدرولیکی و یافتن پارامترهای فشار، سرعت و چگالی از خروجی حل عددی در ولتاژی مشخص، پارامتر f به دست می‌آید. از رابطه‌ی (۲۹) قطر هیدرولیکی برای کانالی با طول و عرض ۲ و ۰/۸ میلی‌متر برابر با ۱/۱۴۲ میلی‌متر مربع است. خروجی فلوئنت افت فشار (پاسکال) و سرعت (متر بر ثانیه) را به ترتیب ۲۸/۷۸ و ۰/۰۲۵ نشان می‌دهد؛ از این‌رو عدد رینولدز در کانال خنک‌کاری ۲۸/۴۱ محاسبه می‌شود. طبق رابطه‌های (۲۸) و (۳۰) حاصل ضرب ضریب اصطکاک در عدد رینولدز ($f.Re$) برابر با ۵۹/۶۶ است که در مقایسه با عدد حاصل از رابطه‌ی (۲۷) که برابر ۵۶/۸۱ می‌باشد، تطابق خوبی دارد. رابطه‌ی (۳۱) عدد ناسلت متوسط و رابطه‌ی (۳۲) ضریب انتقال حرارت جابجایی را بر حسب دمای دیواره‌ی کانال و دمای توده‌ی سیال ارائه می‌دهند:

$$Nu = \frac{h D_h}{K} \quad (31)$$

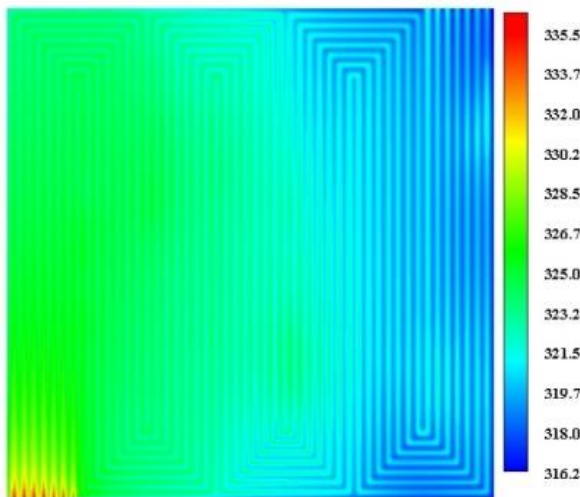
$$h = \frac{q''_{ch}}{T_w - T_{bulk}} \quad (32)$$

از حل عددی میزان شار (وات بر مترمربع کلونین)، دمای دیواره (کلونین) و دمای توده‌ی سیال (کلونین)، به ترتیب ۵۶۷۱/۱، ۳۲۱/۳۴ و ۳۱۸/۷۲ به دست می‌آید بنابراین $Nu = 4.13$ است.

مطابق مرجع [۱۴]، عدد ناسلت برای کانال مستطیلی با ابعاد ۲ در ۰/۸ میلی‌متر، ۴/۳۸ است و نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج تحلیلی دارد.

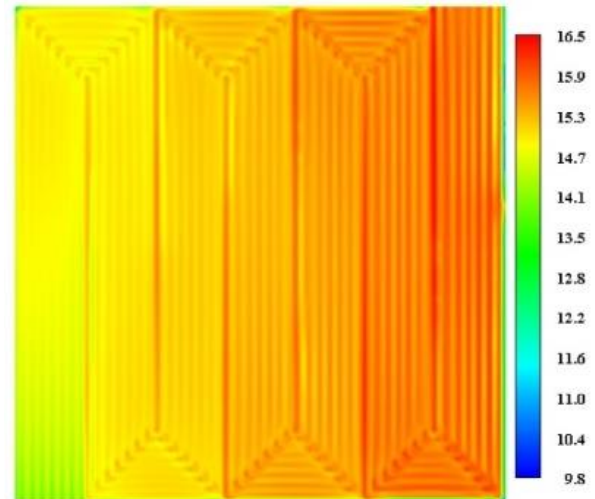
نتایج

مطابق شکل ۵، مناطقی از غشا که روی کانال گاز قرار دارند نسبت به قسمت‌هایی که روی شانه‌ی کانال هستند، دمای بالاتری دارند. علت این امر این است که در این مناطق غلظت گازها بالاتر بوده و به تبع آن نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی بالاتر است. نرخ بالاتر واکنش‌های الکتروشیمیایی منجر به تولید بیشتر گرما شده که دمای این مناطق پیل را بالا می‌برد. اختلاف دما در نقاط مختلف نسبتاً زیاد است و به تبع آن یکنواختی دما کم است. دمای بیشینه‌ی سطح، مهم‌ترین عامل برای سنجش آسیب‌های حرارتی در غشا است. مدل بررسی شده دمای سطح غشا نسبتاً بالا دارد.



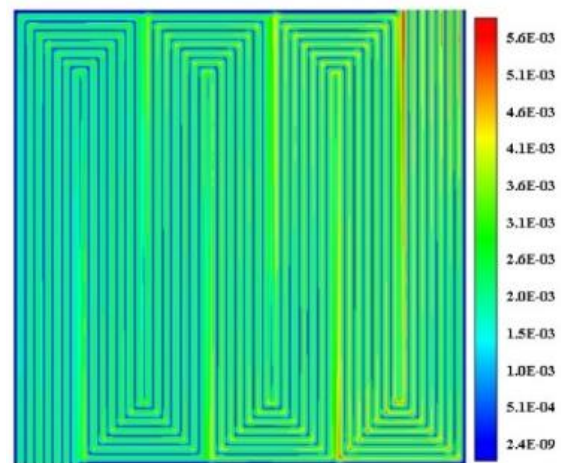
شکل ۳. توزیع دما برحسب کلون در سطح غشا/کاتالیست کاتد در ولتاژ ۰/۱۶۵ ولت

محتوی آب، تاثیر مستقیم بر هدایت پروتونی و در نتیجه عملکرد مناسب غشا دارد. محتوی آب داخل غشا حدود ۱۶/۵ است که نشان می‌دهد غشا کاملاً هیدراته بوده و هدایت پروتونی مناسبی دارد. محتوی آب غشا معمولاً رفتاری مخالف با دما دارد. یعنی در نقاطی که دما پایین‌تر است، محتوی آب بالاتر و برعکس. این موضوع با مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ مشهود است.



شکل ۴. توزیع محتوی آب در سطح غشا/کاتالیست کاتد در ولتاژ ۰/۱۶۵ ولت

شکل ۵ توزیع غلظت مولی اکسیژن بر حسب کیلو مول بر مترمکعب در سطح مشترک غشا و کاتالیست کاتد را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، غلظت اکسیژن در نواحی زیر کانال، بسیار بیشتر از نواحی زیر شانه‌ی کانال است. غلظت اکسیژن بالاتر منجر به تولید آب بیشتر و چگالی جریان بالاتر می‌شود.



شکل ۵. توزیع غلظت اکسیژن در سطح غشا/کاتالیست کاتد در ولتاژ ۰/۱۶۵ ولت

نتیجه‌گیری

تاثیر استفاده از کانال‌های مارپیچی چند مسیره بر توزیع دما و واکنشگرها و محصولات در این مقاله بررسی شده است. بدین منظور یک مدل سه بعدی پیل سوختی با در نظر گرفتن تمامی نواحی شامل صفحات قطبی، کانال‌های گاز آند و کاتد، لایه‌های پخش گاز، لایه‌های کاتالیست و غشا به همراه کانال‌های خنک‌کاری مدل‌سازی عددی شده است. تایج نشان می‌دهند که استفاده از الگوی مارپیچی به توزیع نسبتاً یکنواخت اکسیژن و به تبع آن دانسیته جریان منجر شده است. ضمن این که غشا نیز کاملاً هیدراته است و منجر به عبور مناسب پروتون از آن می‌شود. اما توزیع دمای پیل در این آرایش یکنواخت نیست.

مراجع

- [1] Shimpalee S, Van Zee JW. Numerical studies on rib & channel dimension of flow-field on PEMFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007 May 31;32(7):842-56.
- [2] Liu HC, Yan WM, Soong CY, Chen F. Effects of baffle-blocked flow channel on reactant transport and cell performance of a proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*. 2005 Mar 24;142(1):125-33., *Renewable Energy* (96), pp.928-939, 2016.
- [3] Wang CT, Ou YT, Wu BX, Thangavel S, Hong SW, Chung WT, Yan WM. A modified serpentine flow slab for in Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs). *Energy Procedia*. 2017 Dec 31; 142:667-73.
- [4] Roshandel R, Arbabi F, Moghaddam GK. Simulation of an innovative flow-field design based on a bio inspired pattern for PEM fuel cells. *Renewable Energy*. 2012 May 31; 41:86-95.
- [5] Afshari E, Mosharaf-Dehkordi M, Rajabian H. An investigation of the PEM fuel cells performance with partially restricted cathode flow channels and metal foam as a flow distributor. *Energy*. 2017 Jan 1;118:705-15.
- [6] Afshari E, Ziaei-Rad M, Shariati Z. A study on using metal foam as coolant fluid distributor in the polymer electrolyte membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016 Jan 21;41(3):1902-12.
- [7] Chen FC, Gao Z, Loutfy RO, Hecht M. Analysis of optimal heat transfer in a PEM fuel cell cooling plate. *Fuel Cells*. 2003 Dec 1;3(4):181-8.
- [8] Choi J, Kim YH, Lee Y, Lee KJ, Kim Y. Numerical analysis on the performance of cooling plates in a PEFC. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2008 Jul 1;22(7):1417-25.
- [9] Afshari E, Ziaei-Rad M, Dehkordi MM. Numerical investigation on a novel zigzag-shaped flow channel design for cooling plates of PEM fuel cells. *Journal of the Energy Institute*. 2017 Oct 1;90(5):752-63.
- [10] Scholta J, Häussler F, Zhang W, Küppers L, Jörissen L, Lehnert W. Development of a stack having an optimized flow field structure with low cross transport effects. *Journal of Power Sources*. 2006 Apr 18;155(1):60-5.
- [11] Sasmito AP, Birgersson E, Mujumdar AS. Numerical investigation of liquid water cooling for a proton exchange membrane fuel cell stack. *Heat Transfer Engineering*. 2011 Feb 1;32(2):151-67.
- [12] Toghyani S, Nafchi FM, Afshari E, Hasanpour K, Baniasadi E, Atyabi SA. Thermal and electrochemical performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell under assembly pressure on gas diffusion layer. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018 Mar 1;43(9):4534-45.
- [13] Afshari E, Ziaei-Rad M, Jahantigh N. Analytical and numerical study on cooling flow field designs performance of PEM fuel cell with variable heat flux. *Modern Physics Letters B*. 2016 Jun 20;30(16):1650155.
- [14] Bejan A. *Convection heat transfer*. 4th. John wiley & sons; 2013 Mar 28:103-20.

ACEC2021-42219

بررسی شاخص های اقتصادی نیروگاه های خورشیدی بر مبنای سه دوره اخیر نرخ پایه

هادی مرانلو^۱، سیامک علی بابایی^۲

^۱ کارشناس ارشد بازرگانی بین الملل، مدیریت توسعه انرژی تامین؛ hmaranlou@gmail.com

^۲ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، مدیریت توسعه انرژی تامین؛ sababaei@yahoo.com

چکیده

انرژی های تجدیدپذیر منابع انرژی پاک، بی پایان و در حال حاضر کاملاً رقابتی هستند که عمدتاً از نظر تنوع، فراوانی و پتانسیل استفاده در هر نقطه از کره زمین قابل استفاده می باشند. همانگونه که در آمارهای سالانه توسط آژانس بین المللی انرژی های تجدیدپذیر نشان داده می شود رشد انرژی های پاک غیرقابل توقف است. بر اساس آمارها تقریباً نیمی از کل ظرفیت تولید برق جدید نصب شده در سال ۲۰۱۴ را پس از زغال سنگ انرژی های تجدیدپذیر تشکیل می دهند [1]. بر اساس همین گزارشات، تقاضای برق جهان تا سال ۲۰۴۰ میلادی بیش از ۷۰ درصد افزایش خواهد یافت. بدیهی است که توسعه انرژی های تجدیدپذیر در کشورهای مختلف ناشی از سیاست های مختلف اجرا شده ای است که در جهت فائق آمدن بر موانع خاصی است که در آن کشور بر توسعه این حوزه تاثیر می گذارند [2]. در ایران سیاست مبتنی بر فروش برق تضمینی برای حمایت از توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر با ارائه قیمت تضمین شده و بالاتر از بازار برای تولیدکنندگان طراحی شده است [3]. همانگونه که از آمارهای وزارت نیرو بر میآید در ایران بیشترین سهم توسعه انرژی های تجدید پذیر به انرژی های خورشیدی (فتوولتائیک) و بادی باز می گردد. لذا این مقاله به بررسی شاخص های اقتصادی نتایج سرمایه گذاری در حوزه خورشیدی با استفاده از دو معیار بازده داخلی و خالص ارزش فعلی در سه دوره موخر نرخ گذاری خرید برق تضمینی پرداخته است. واژه های کلیدی: انرژی پاک، فروش برق تضمینی، سرمایه گذاری، فتوولتائیک، بازده داخلی، خالص ارزش فعلی

مقدمه

فناوری های انرژی تجدیدپذیر منابع انرژی های پاک هستند که با استفاده بهینه از آنها اثرات زیست محیطی تولید انرژی به حداقل رسیده، کمترین ضایعات ثانویه تولید شده و بر اساس نیازهای اقتصادی و اجتماعی فعلی و آینده نقش موثری در توسعه پایدار

خواهند داشت [4]. ابلاغ قانون اصلاح الگوی مصرف و ظرفیت ماده ۸ آن برای تأسیس یک سازمان با شخصیت حقوقی مستقل جهت استفاده هر چه بیشتر از منابع تجدید پذیر، منجر به تدوین و ابلاغ اساسنامه سازمان انرژی های تجدید پذیر و بهره وری انرژی (ساتبا) به عنوان یکی از معاونت های وزارت نیرو از ادغام سازمان انرژی های نو و سازمان بهره وری انرژی گردید [5]. در ماده یک قانون تشکیل سازمان انرژی های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی برق علت تشکیل این سازمان را ارتقای بهره وری انرژی و بهره گیری از منابع انرژی های تجدیدپذیر از طریق ایجاد زیرساخت های لازم و بهبود و ارتقای بهره وری عرضه و کاهش تلفات انتقال، توزیع و مصرف انرژی در کنار بهره گیری از برق تجدیدپذیر ذکر شده است. در ادامه و در ماده دو به کارگیری بخش خصوصی و حمایت و تشویق مشارکت سرمایه گذاران از طریق ایجاد سیاست های تشویقی در جهت حمایت و افزایش استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به عنوان اهداف این سازمان ذکر شده است [6]. سیاست تعیین تعرفه های ترجیحی بالاتر خرید برق به صورت تضمین شده توسط بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه در سطح جهان به عنوان مکانیزمی برای ترویج توسعه انرژی های تجدید پذیر استفاده می شود [7]. بنا بر دسته بندی صورت گرفته در ساتبا، سیاست خرید برق تضمینی با نرخ ترجیحی، به عنوان اهرم اصلی در تشویق سرمایه گذاران در دو حوزه نیروگاه های کوچک و بزرگ به کار گرفته شده است. IRR (نرخ بازده داخلی) و NPV (ارزش خالص فعلی) دو شاخص رایج و مهم در تصمیمات سرمایه گذاری هستند. اما این دو شاخص تفاوت های ذاتی با یکدیگر دارند، لذا در کنار یکدیگر به کار برده می شوند. نرخ بازده داخلی یک شاخص مالی و ارزش فعلی خالص یک شاخص اقتصادی سرمایه گذاری سرمایه ای است که اولی دیدگاه سرمایه گذار خصوصی و دومی دیدگاه جامعه را ارائه می دهد [8].

ایوانز و فوربز بر این باورند که نرخ بازده داخلی از لحاظ شناختی کارآمدتر از ارزش خالص فعلی است، زیرا نرخ بازده داخلی به عنوان

در این رابطه:

Rf: نرخ بهره بدون ریسک

RPm: تفاوت بازدهی در بازار و نرخ بهره (حاشیه سود حاصل از بازار)

RPi: تفاوت بازدهی سرمایه گذاری بین نرخ بازدهی در صنعت برق

و بازار

CPR: ریسک سرمایه در کشور به میزان درصد

علاوه بر موارد ذکر شده شاخص های مالی سرمایه گذاری در نیروگاه های تجدیدپذیر به "ضریب تورم هزینه های جاری" طرح و "ضریب تعدیل درآمد های آتی" نیز بستگی دارد. بر اساس قرارداد خرید تضمینی برق و به استناد تبصره (۲) ماده (۲) شرایط خصوصی قرارداد نحوه اعمال ضریب ساعتی (یا ضریب فصلی ساعتی) وفق ابلاغیه شماره ۹۴/۲۳۹۹۰/۲۰۰ مورخ ۱۳۹۴/۰۵/۰۳ توسط ساتبا شرایط تنظیم صورت حساب فروشندگان برق به شرح زیر می باشد:

بر اساس بند ۱ ابلاغیه فوق صراحتاً قید شده است که جهت محاسبه قیمت خرید برق در هر ساعت، می بایست صرفاً پایه نرخ ابلاغی مربوط به هر تکنولوژی در ضریب آمادگی ساعتی مربوطه (مورد استفاده در بازار برق) ضرب شود. لذا بر این اساس ضریب آمادگی ساعتی به روش زیر محاسبه می گردد:

$$A = \text{نرخ پایه ابلاغی} \times (1 - \text{ضریب آمادگی ساعتی}) \times \text{تولید خالص}$$

با توجه به اینکه ضریب آمادگی ساعتی از رابطه بالا بدست می آید و تولید خالص نیز در فرمول B مجدداً محاسبه می گردد، لذا در این مرحله فقط ضریب بدست آمده (۱- ضریب آمادگی ساعتی) محاسبه می شود. سپس بر اساس تبصره (۳) ماده (۲) شرایط خصوصی قرارداد، نرخ خرید "انرژی الکتریکی خالص" در سال های پرداخت بر اساس فرمول قرارداد تعدیل می گردد. که در این خصوص دو نکته ضروری می باشد:

الف) بر اساس تبصره (۳) ماده (۳) مصوبه شورای اقتصاد فقط نرخ پایه بر اساس فرمول مندرج در قرارداد تعدیل می گردد.

ب) عبارت "انرژی الکتریکی خالص" در تبصره (۳) ماده (۲) شرایط خصوصی قرارداد نیز به این نکته تاکید می نماید که فقط نرخ پایه خالص انرژی الکتریکی تولید شده باید تعدیل گردد که بر این اساس نرخ تعیین شده بصورت زیر محاسبه می گردد:

$$B = \text{ضریب تعدیل} \times \text{تولید خالص} \times (\text{نرخ انتقال} + \text{نرخ پایه})$$

جهت پرداخت قیمت خرید برق، محاسبات انجام شده مربوط به ضریب آمادگی ساعتی (A) با محاسبات انجام شده مربوط به تعدیل نرخ پایه (B) با یکدیگر جمع می گردد لذا همانطور که دیده می شود در تنظیم صورتحساب فروشندگان پنج عامل زیر در نظر گرفته شده است:

۱. ضریب تعدیل
۲. تولید خالص
۳. نرخ پایه

درصد (یا نرخ بازگشت) است در حالی که ارزش خالص فعلی ارزش پولی بود و از نظر شناختی برای تصمیم گیرندگان تا حد زیادی ناکارآمد است و بنابراین استفاده از نرخ بازده داخلی باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد [9]. تحولات اقتصادی دهه ۹۰ خورشیدی نشأت گرفته از تشدید تحریم ها، کاهش صادرات ایران و از جمله مهمترین آن درآمدهای ناشی از محصولات نفتی سبب ایجاد جهش نرخ ارز شده است [10]. در طی این دهه و به طور شاخص در سال های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۷ نرخ ارز به صورت چندصد درصدی افزایش یافت. جهش نرخ ارز در کنار سایر ابزار تحریم همچون محدودیت های تجاری سبب شد تا تولید ملی کاهش یافته و در کنار کاهش تولید و صادرات نفت، تولید و صادرات غیرنفتی نیز افت قابل توجهی یابد. نهایتاً در اسفند ماه ۱۳۹۹ نسبت به فروردین ۱۳۹۰ تورم بسیار بالا و بی سابقه ۷۶۳ درصدی بر اقتصاد ایران حاکم بوده است.

معرفی مدل

به طور کلی هر دو مفهوم نرخ بازده داخلی و ارزش فعلی از جریان نقدی تنزیل شده سرمایه گذاری (پروژه) بدست می آیند. فرمول جریان نقدی تنزیل شده به شکل زیر می باشد:

$$DCF = \frac{CF_1}{(1+x^1)} + \frac{CF_2}{(1+x^2)} + \dots + \frac{CF_n}{(1+x^n)} \quad (1)$$

در این رابطه:

DCF: جریان نقدی تنزیل شده

CF: جریان نقدی

X: نرخ تنزیل (WACC)

همانطور که دیده می شود ارزش سرمایه گذاری در پروژه به جریان نقدی آتی پروژه (شامل دوره زمانی و تعداد سال دوره بهره برداری) و نرخ تنزیل بستگی دارد [11]. اگرچه تعیین نرخ تنزیل در پروژه هایی نظیر پروژه های نیروگاهی که با اهداف عالی توسعه ملی مورد توجه قرار دارند، امر پیچیده ای است و دربردارنده هزینه هایی نظیر هزینه فرصت اجتماعی^۱ و نرخ رجحان زمانی اجتماعی^۲ [12] نیز می باشد اما در بسیاری از شرکت های سرمایه گذار، نرخ تنزیل به تنهایی مورد استفاده قرار می گیرد [13]. بر اساس تحقیقات صورت گرفته در اغلب پروژه ها نرخ تنزیل بر اساس ریسک نرخ بهره، ریسک تورم و تسعیر ارز محاسبه می گردد [13]. با توجه به سرمایه گذاری بخش خصوصی در احداث نیروگاه های تجدیدپذیر، در این مقاله نرخ تنزیل در محاسبه جریان نقدی تنزیل شده به معنی نرخ بهره ای است که به منظور محاسبه ارزش فعلی مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله نرخ تنزیل حداکثر نرخ سود بدون ریسک همچون اوراق مشارکت دولتی و یا سود سپرده های بانکی (بلند مدت) بعلاوه ریسک ها مترتب بر سرمایه در نظر گرفته شده است. فرمول نرخ تنزیل به شرح زیر می باشد:

$$\text{Discount Rate} = R_f + (R_{Pm} + R_{Pi}) + CRP \quad (2)$$

^۲ Social Rate of Time Preference

^۱ Social Opportunity Cost



| | | |
|------|------|--------|
| ۱۳۸۵ | 18.0 | 11,763 |
| ۱۳۸۴ | 16.0 | 11,017 |

۴. ضریب آمادگی ساعتی

۵. نرخ انتقال

همانطور که ذکر شد، ضریب آلفا توسط فروشنده بین ۰,۱۵ الی ۰,۳ تعیین می گردد، در این مطالعه حداقل، حداکثر و میانه عددی^۳ دو مقدار فوق الذکر با استفاده از فرمول زیر به عنوان سه سناریو تعیین شدند:

$$\min = \sum_{i=1}^N |x_i - M| \quad (۴)$$

از آنجا که در این تحقیق دوره زمانی سالانه مبنای تهیه جریان نقدینگی می باشد لذا با در نظر گرفتن فرضی سه مقدار ۰,۱۵، ۰,۲۷۵ و ۰,۳ به عنوان ضریب آلفا به عنوان سه احتمال که توسط فروشندگان برق تعیین گردد، میزان ضریب تعدیل در سالهای مورد مطالعه به شرح زیر می باشد:

جدول ۲: ضریب تعدیل در دوره های زمانی

| سال | ضریب آلفا | | |
|------|-----------|-------|------|
| | 0.15 | 0.275 | 0.3 |
| 1400 | 109% | 111% | 112% |
| 1399 | 186% | 178% | 176% |
| 1398 | 156% | 153% | 152% |
| ۱۳۹۷ | 183% | 173% | 171% |
| ۱۳۹۶ | 115% | 114% | 114% |
| ۱۳۹۵ | 106% | 107% | 107% |
| ۱۳۹۴ | 99% | 100% | 101% |
| ۱۳۹۳ | 118% | 118% | 118% |
| ۱۳۹۲ | 173% | 167% | 165% |
| ۱۳۹۱ | 108% | 111% | 112% |
| ۱۳۹۰ | 112% | 114% | 114% |
| ۱۳۸۹ | 100% | 101% | 102% |
| ۱۳۸۸ | 104% | 105% | 105% |
| ۱۳۸۷ | 107% | 110% | 110% |
| ۱۳۸۶ | 112% | 113% | 113% |
| ۱۳۸۵ | 108% | 108% | 108% |

به منظور پیش بینی با توجه به ویژگی های متعدد اعداد فوق الذکر اعم تغییرات نرخ ارز و تورم و به منظور پیش بینی ضریب تعدیل جهت دوره زمانی پیش رو، از میانگین هندسی^۴ در سه دوره زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ سال اخیر با استفاده از فرمول زیر بدست آمد:

$$G.M = (X^1 \times X^2 \times \dots \times X^n)^{\frac{1}{n}} \quad (۵)$$

با استفاده از میانگین هندسی، میانگین ضریب تعدیل درآمد آتی نیروگاه از دوره های زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ سال گذشته به صورت جدول زیر بدست می آید:

در این رابطه تولید خالص تابعی از نوع فن آوری به کارگرفته در نیروگاه، مکان جغرافیایی و سایر عناصر فنی می باشد که در این مطالعه به صورت فرضی عدد ثابتی در نظر گرفته شده است. در خصوص ضریب آمادگی ساعتی و نرخ انتقال نیز به همین ترتیب اعداد ثابتی در نظر گرفته شده است زیرا در شرایط مشابه، این ضرایب برای نیروگاه های خورشیدی عددی برابر خواهد بود. "ضریب تعدیل" به عنوان عنصر اساس خرید تضمینی برق به شرح زیر تعیین می گردد:

$$\left[\frac{\text{متوسط نرخ رسمی ارز در دوره یکساله قبل زمان پرداخت}}{\text{متوسط نرخ رسمی ارز در دوره یکساله قبل بهره برداری}} \right]^{1-\alpha} \times \left[\frac{\text{شاخص خرده فروشی در ابتدای سال پرداخت}}{\text{شاخص خرده فروشی در ابتدای سال بهره برداری}} \right]^{\alpha} \quad (۳)$$

از آنجا که تعیین ضریب α (آلفا) توسط سرمایه گذاران تعیین می گردد (در دامنه ۰,۱۵ $\leq \alpha \leq$ ۰,۳) و از طرفی نیز برای تعیین جریان نقدی تنزیل شده نیاز به تخمین و ارزیابی دوره بهره برداری وجود دارد، لذا تعیین متوسط ضریب تعدیل برای بررسی درآمدهای سال های آتی امری با اهمیت می باشد. در این تحقیق با استفاده از داده های در دسترس، بررسی و تعیین متوسط ضریب تعدیل سالانه در دوره های زمانی مختلف به شرح زیر پرداخته شده است. داده های موجود از سال ۱۳۸۴ مندرج در پایگاه اطلاع رسانی بانک مرکزی و مرکز آمار ایران مورد استفاده قرار گرفته اند. داده های دوره زمانی فوق الذکر به شرح زیر می باشد:

جدول ۱: داده های نرخ ارز و تورم

| سال | میانگین نرخ خرده فروشی | میانگین نرخ ارز یورو (ریال) |
|------|------------------------|-----------------------------|
| 1400 | 310.2 | 263,265 |
| 1399 | 252.6 | 246,089 |
| 1398 | 185.1 | 125,194 |
| ۱۳۹۷ | 136.9 | 78,401 |
| ۱۳۹۶ | 109.6 | 39,949 |
| ۱۳۹۵ | 100.0 | 34,484 |
| ۱۳۹۴ | 91.7 | 32,619 |
| ۱۳۹۳ | 81.9 | 33,813 |
| ۱۳۹۲ | 70.9 | 28,552 |
| ۱۳۹۱ | 52.6 | 15,808 |
| ۱۳۹۰ | 40.3 | 15,120 |
| ۱۳۸۹ | 33.2 | 13,653 |
| ۱۳۸۸ | 29.5 | 14,014 |
| ۱۳۸۷ | 26.7 | 13,647 |
| ۱۳۸۶ | 21.3 | 13,088 |

^۴ Geometric Mean

^۳ میانه عددی Median



| | | |
|---------|-------|-----------------------------------------|
| درصد | 21.3 | ضریب ظرفیت نیروگاه |
| درصد | ۰,۰۵ | ضریب افت [16] |
| ماه | 12 | دوره ساخت |
| سال | ۱۹ | دوره بهره برداری |
| درصد | ۲۰ | نرخ تنزیل |
| سال خطی | ۱۵ | روش استهلاک ^۸ |
| ریال | ۴,۹۰۰ | نرخ پایه خرید تضمینی برق |
| | ۶,۳۷۰ | |
| | ۸,۹۱۸ | |
| درصد | 31 | ضریب تعدیل افزایش سالیانه درآمد نیروگاه |
| درصد | ۲۰,۳۹ | ضریب افزایش سالیانه هزینه های جاری طرح |
| درصد | ۵ | ضریب بهای آمادگی ساعتی |
| درصد | ۰ | ضریب ساخت داخل |

در خصوص ضریب بهای آمادگی ساعتی در نیروگاه های خورشیدی، با توجه به اینکه اطلاعات دقیقی در خصوص میزان دریافتی نیروگاه های کشور (با توجه به موقعیت های متفاوت جغرافیایی) منتشر نگردیده است، لذا نویسندگان بر اساس تجربیات خویش متوسط نرخ ۵ درصد را برای این شاخص به طور ثابت و برای همه سناریو های مندرج در این تحقیق در نظر گرفته اند. همچنین در این تحقیق با فرض عدم داخلی سازی تجهیزات مورد استفاده در نیروگاه، ضریب ساخت داخل ۰ درصد در نظر گرفته شده است. (بر اساس قوانین و مقررات در صورت استفاده از تجهیزات ۱۰۰٪ ساخت داخل کشور در نیروگاه ها حداکثر ۳۰٪ افزایش نرخ خرید برق تضمینی در نظر گرفته خواهد شد) در خصوص هزینه های جاری شامل هزینه تراز شده انرژی^۹ در سال اول نشان می دهد که درصد هزینه های عملیاتی نسبت سرمایه گذاری ثابت^{۱۰} نسبتی در حدود ۵ درصد را دارا می باشد [17]. گفتنی است مطالعات و تجربیات محققین این مقاله نشان می دهد که با توجه به سهم بالای هزینه نیروی انسانی در هزینه های جاری کل، نسبت فوق الذکر در ایران در حدود ۱ تا ۲ درصد می باشد. نمودار زیر بر گرفته از پروژه ای واقعی در نواحی مرکزی ایران که در آن درصد وزنی هزینه های جاری نیروگاه خورشیدی را نسبت به یکدیگر نشان می دهد.

جدول ۳: ضریب تعدیل در سه دوره

| دوره زمانی | ضریب آلفا | | |
|--------------|-----------|-------|------|
| | 0.3 | 0.275 | 0.15 |
| دوره ۱۵ ساله | 122% | 122% | 123% |
| دوره ۱۰ ساله | 130% | 130% | 131% |
| دوره ۵ ساله | 142% | 143% | 146% |

همانطور که مشاهده می شود، با در نظر گرفتن هر سه انتخاب ضریب آلفا شامل ۰,۱۵، ۰,۲۷۵ و ۰,۳، شیب ضریب تعدیل به ترتیب در دوره های زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ روند افزایشی داشته است که نشان از تغییرات بیشتر دو شاخص تغییرات نرخ ارز و تورم دارد. از طرفی همانگونه که ملاحظه می شود، با انتخاب ضریب آلفا به میزان ۰,۱۵ در هر سه دوره زمانی، ضریب تعدیل بالاتری بدست می آید، لذا در انجام مطالعات این مقاله فرض بر انتخاب ضریب آلفا به میزان ۰,۱۵ و همچنین با توجه به وجود سه دوره زمانی، میانه دوره های زمانی یعنی دوره زمانی ۱۰ ساله جهت انجام محاسبات و به کار گیری در تهیه جریان نقدی پروژه مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه با توجه به تعیین و ارزیابی هزینه های جاری (OPEX^۵)، میانگین هندسی دوره ۱۰ ساله برابر با سالانه ۲۰,۳۹٪ جهت انجام محاسبات بدست آمد.

اطلاعات ورودی

در خصوص ظرفیت نامی تولید و بر اساس گزارش های منتشره توسط سابقا نیروگاه با ظرفیت نامی ۱۰ مگاوات با بیشترین پراکندگی درخواست توسط سرمایه گذاران، به عنوان ظرفیت نامی طرح مبنای مطالعه قرار گرفت. در خصوص ضریب ظرفیت^۶ به عنوان نسبت خروجی واقعی نیروگاه در بازه زمانی مشخص به خروجی بالقوه آن، با در نظر گرفتن فن آوری پایه های ثابت^۷ (زاویه و جهت هر دو ثابت)، بررسی مطالعات نشان می دهند که بیشترین و کمترین ضریب ظرفیت در کشور ۲۶,۱ و ۱۶,۵ درصد می باشد [14]، لذا میانگین این دو، برابر با ۲۱,۳ درصد مورد استفاده قرار گرفت. دوره ساخت نیروگاه عموماً بین ۶ تا ۱۲ ماه می باشد [15] که در این مطالعه با توجه به دامنه گسترده تامین تجهیزات از خارج از کشور و مشکلات تحریم، مجموعاً ۱۲ ماه در نظر گرفته شده است. جدول زیر برای هر ۳ سری زمانی و هر ۳ ضریب تعدیل، جهت استفاده در جریان نقدی مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات ورودی به شرح جدول ۴ می باشد.

جدول ۴: اطلاعات ورودی

| نام ورودی | مقادیر | واحد |
|------------------|--------|-------------|
| ظرفیت نامی تولید | ۱۰ | مگاوات ساعت |

^۵ Operating expense^۶ Capacity Factor^۷ Ground-mounted systems, fixed-tilt and axis^۸ بر اساس قوانین سازمان امور مالیاتی کشور تا تاریخ نگارش این مقاله، نرخ استهلاک نیروگاه های خورشیدی و بادی ۱۵ سال در نظر گرفته شده است.^۹ Levelized cost of energy^{۱۰} Capital Expenditure

جهانی نشان از کاهش نسبی نسبتاً بالای هزینه های سرمایه گذاری در نیروگاه های خورشیدی در نیمه اول دهه ۹۰ خورشیدی دارد که بویژه در بخش پنل های فتوولتائیک بوده است. با توجه به اینکه هر سه سناریوی فرضی این طرح در نیمه دوم دهه ۹۰ خورشیدی می باشند و از طرفی نیز پروژه های اجرا شده در کشور هر یک نسبت به دیگری، تفاوت معناداری ناشی از استفاده از تجهیزات متفاوت، دوره زمانی اجرای طرح، محل های جغرافیایی متفاوت (موثر بر هزینه های اتصال به شبکه، حمل و نقل تجهیزات و هزینه های عمرانی) تغییرات نرخ ارز، قوانین بالادست هزینه های مربوط به تعرفه ها و مالیات گمرکی داشته اند، لذا در این تحقیق با استناد به منابع معتبر بین المللی مقدار ۸۸۳ دلار^{۱۱} به ازای هر کیلووات بهای تمام شده سرمایه گذاری (شامل مهندسی، تامین تجهیزات، ساخت و راه اندازی^{۱۲}) در نظر گرفته شده است [18] که به نظر نویسندگان این مقاله عددی معقول برای استفاده از هر سه دوره زمانی در ایران می باشد. بر اساس تاریخ ابلاغ نرخ های اعلامی توسط ساتبا مندرج در جدول ۶، در این مطالعه ۳ سناریو فرضی به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

جدول ۶: سه سناریوی فرضی تحقیق

| نرخ تسعیر | نرخ پایه | آغاز فرضی | آغاز بردهای |
|----------------------------|--------------------|-----------|-------------|
| دلار به ریال ^{۱۳} | خرید تضمینی (ریال) | فرضی ساخت | بردهای |
| 35.810 | ۴,۹۰۰ | ۱۳۹۵/۲ | ۱۳۹۶/۲ |
| 113,000 | ۶,۳۷۰ | ۱۳۹۸/۷ | ۱۳۹۹/۷ |
| 245,558 | ۸۹۱,۸ | ۱۴۰۰/۲ | ۱۴۰۱/۲ |

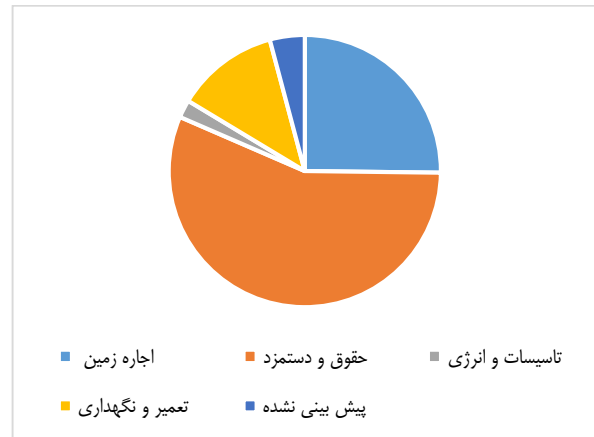
لذا با استفاده از سناریوهای فوق الذکر، مدل اقتصادی جهت شبیه سازی سرمایه گذاری در سه سناریوی فوق تهیه گردید.

نتایج

نتایج حاصله با استفاده از نرم افزار کامفار^{۱۴} به شرح مندرج در جدول ۷ می باشد:

جدول ۷: نتایج

| ردیف | نام سناریو | نرخ بازده داخلی (درصد) | خالص ارزش فعلی (میلیون ریال) |
|------|-------------|------------------------|------------------------------|
| ۱ | سناریوی اول | ۵۵ | ۲,۳۴۵,۶۹۵ |



نمودار ۱: درصد هزینه های جاری نیروگاه های خورشیدی

با توجه به نمودار فوق الذکر، در این تحقیق هزینه های جاری سناریو های بررسی شده، میزان ۲٪ هزینه سرمایه گذاری در سال اول در نظر گرفته شده است و در سال های آتی با متوسط هندسی تورم (در دوره ۱۰ ساله مورد مطالعه) افزایش سالانه داشته است. در خصوص کسورات قانونی با توجه به اینکه اغلب نیروگاه های خورشیدی در مناطق کمتر توسعه یافته هستند لذا بر اساس ماده ۱۳۲ قانون مالیاتهای مستقیم (بخش معافیت ها)، با استناد به ماده ۳۱ قانون رفع موانع تولید رقابت پذیر و ارتقا نظام مالی کشور به مدت ۱۰ سال از معافیت مالیاتی برخوردار هستند و در دوره ۱۰ ساله دوم با نرخ ۲۵٪ مشمول مالیات خواهند بود.

فرمول و قرارداد خرید برق تضمینی

در این تحقیق سه دوره اخیر تغییرات نرخ خرید تضمینی برق شامل نرخ خرید پایه و ضریب کاهشی آتی مورد بررسی قرار گرفته است. نرخ پایه خرید تضمینی برق و ضرایب کاهشی به شرح مندرج در جدول ۵ می باشد:

جدول ۵: نرخ پایه در سه دوره اخیر

| ردیف | نرخ پایه خرید تضمینی برق (ریال) | تاریخ ابلاغ | ضریب کاهش نرخ پایه خرید تضمینی برق |
|------|---------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------|
| ۱ | ۴,۹۰۰ | ۱۳۹۵/۲ | یک پله در ابتدای سال دهم به میزان ۰,۷ |
| ۲ | ۶,۳۷۰ | ۱۳۹۸/۷ | یک پله در ابتدای سال دهم به میزان ۰,۷ |
| ۳ | ۸۹۱,۸ | ۱۴۰۰/۲ | سه پله در ابتدای سال های هشتم، نهم و دهم و شانزدهم به میزان ۰,۶ |

محاسبه و تحلیل سرمایه گذاری

اگرچه از حجم سرمایه گذاری ثابت در طرح های اجرا شده در کشور اطلاعات دقیقی در دسترس نبوده و از جمله اطلاعات داخلی و محرمانه شرکت های دارنده نیروگاه به حساب می آید، اما تجربیات

^{۱۱} دلار آمریکا مد نظر می باشد.

^{۱۲} منبع: میانگین ماهانه نرخ موزون ارز سنا در آخرین روز ماه فرضی ساخت

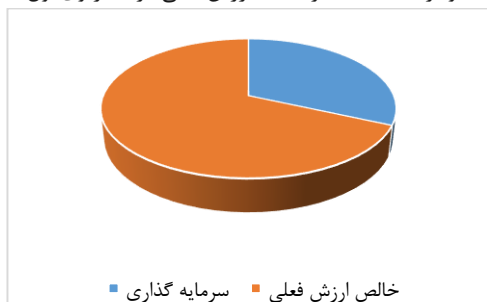
^{۱۴} Comfar III Expert

^{۱۳} EPC

زیر مقایسه ای از خالص ارزش فعلی و سرمایه گذاری را در دو سناریوی اول و دوم نسبت به یکدیگر نشان می دهد:



نمودار ۴: نسبت سرمایه به ارزش فعلی در سناریوی اول



نمودار ۵: نسبت سرمایه به ارزش فعلی در سناریوی دوم

در خصوص سناریوی سوم، با توجه به ورودی های اطلاعات مشابه در دو سناریوی دیگر و با توجه به عدم سوددهی طرح، تحلیل حساسیت نشان می دهد که افزایش یا کاهش دامنه ۲۰ درصدی هزینه های ثابت سرمایه گذاری ثابت، هزینه های جاری و در آمد های هیچ گاه وضعیتی حتی نزدیک به دو سناریوی دیگر ایجاد نخواهد کرد. جدول زیر تحلیل حساسیت نرخ بازده داخلی سناریوی سوم را نشان می دهد:

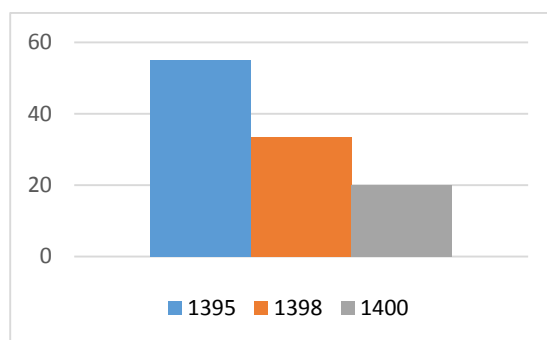
جدول ۸: تحلیل حساسیت نرخ بازده داخلی سناریوی سوم

| درصد تغییر | - | - | 0% | 12% | 20% |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| فروش و درآمد | 16% | 18% | 20% | 22% | 23% |
| سرمایه گذاری ثابت | 23% | 22% | 20% | 18% | 18% |
| هزینه های جاری | 21% | 20% | 20% | 19% | 19% |

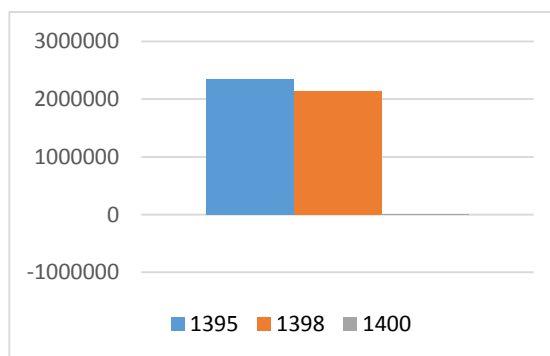
بنابراین تنها در یک صورت نرخ بازده داخلی و به تبع آن خالص ارزش فعلی سرمایه گذاری افزایش می یابد و آن این است که نرخ افزایش درآمد ها ناشی از ضریب تعدیل، بیش از عدد در نظر گرفته شده در این تحقیق (۳۱٪ سالانه) باشد. توجه به تغییرات نرخ و پله کان کاهشی آن که هر دو به منظور کنترل بدهی های آتی ساتبا به سرمایه گذاران و منطقی سازی سرمایه گذاری در این بخش بوده است نشان می دهد که روند کاهشی مشاهده شده همانگونه که در سناریوی اول

| | | | |
|---|-------------|------|-----------|
| ۲ | سناریوی دوم | ۳۳,۴ | ۲,۱۴۹,۰۸۸ |
| ۳ | سناریوی سوم | ۱۹,۹ | -۱۰,۱۴۷ |

همانگونه که مشاهده می شود بر خلاف انتظار و با افزایش نرخ پایه خرید تضمینی برق، افزایش هزینه های سرمایه گذاری متاثر از افزایش نرخ ارز با همراهی افزایش ضریب کاهشی نرخ پایه، روند معکوسی در سود دهی در دوره های متاخر داشته است. نمودار نرخ بازده داخلی سه سناریوی مطروحه به شرح زیر می باشد:



نمودار ۲: مقایسه نرخ بازده داخلی سه سناریو



نمودار ۳: مقایسه خالص ارزش فعلی سه سناریو

نتیجه گیری و جمع بندی

از آنجا که افزایش نرخ تورم موجب کاهش بازده سرمایه گذاری می شود و سرمایه گذار به منظور حفظ توان مالی خود، بازده بالاتری را مد نظر خواهد داشت، لذا بر خلاف روند افزایش تورم همانگونه که در نتایج مشاهده شد، نرخ بازده داخلی سناریوهای فرضی، کاهش قابل ملاحظه ای داشته و در سناریوی سوم طرح به طور کلی نه تنها سود دهی نداشته، بلکه ضرر و زیان اندکی نیز ملاحظه می شود. مقایسه این سه سناریو با فرضیات مشابه نشان می دهد که سیاست های دولتی و بویژه وزارت نیرو در سال های اخیر متاثر از پیش بینی های غیر دقیق و علمی بوده است. به عنوان نمونه، سرمایه گذاران فرضی که در سناریوی اول سرمایه گذاری نمودند، بار مالی بسیار بالایی برای ساتبا (به عنوان متولی این بخش) داشته اند و نتیجتاً ساتبا در دوره های بعدی سعی در کاهش بدهی های آتی خود نموده است. نمودار



- 10.1080/00137910308965052.
- [9] D. A. EVANS and S. M. FORBES, "DECISION MAKING AND DISPLAY METHODS: THE CASE OF PRESCRIPTION AND PRACTICE IN CAPITAL BUDGETING," <http://dx.doi.org/10.1080/00137919308903114>, vol. 39, no. 1, pp. 87–92, 2007, doi: 10.1080/00137919308903114.
- [10] M. R. Farzanegan, "Oil revenue shocks and government spending behavior in Iran," *Energy Econ.*, vol. 33, no. 6, pp. 1055–1069, Nov. 2011, doi: 10.1016/J.ENERCO.2011.05.005.
- [11] P. Krueger, A. Landier, and D. Thesmar, "The WACC Fallacy: The Real Effects of Using a Unique Discount Rate," *SSRN Electron. J.*, Jan. 2012, doi: 10.2139/SSRN.1764024.
- [12] L. Young, "A Service of zbw Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft Leibniz Information Centre for Economics Determining the Discount Rate for Government Projects Standard-Nutzungsbedingungen," Accessed: Sep. 07, 2021. [Online]. Available: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/www.econstor.eu>.
- [13] J. R. Graham *et al.*, "The theory and practice of corporate "nance: evidence from the "eld Frank Ryan, and Fuqua MBA students for help in gathering the data," *J. financ. econ.*, vol. 60, 2001, Accessed: Sep. 07, 2021. [Online]. Available: <http://www.duke.edu/~charvey/Research/indexr.htm>.
- [14] S. M. Besarati, R. V. Padilla, D. Y. Goswami, and E. Stefanakos, "The potential of harnessing solar radiation in Iran: Generating solar maps and viability study of PV power plants," *Renew. Energy*, vol. 53, pp. 193–199, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.11.012.
- [15] "Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants In partnership with a project Developer's GuIde," 2015.
- [16] D. C. Jordan, S. R. Kurtz, K. VanSant, and J. Newmiller, "Compendium of photovoltaic degradation rates," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 24, no. 7, pp. 978–989, Jul. 2016, doi: 10.1002/PIP.2744/FULL.
- [17] D. F. Ran Fu, "U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark," *NREL*, 2018.
- [18] T. International Renewable Energy Agency, "Total installed cost, capacity factor and levelised cost of electricity trends by technology, 2010 and 2020," 2021.
- [19] SATBA, "Statistics of RE Power Plants," *Renewable Energy and Energy Efficiency Organization*. <http://www.satba.gov.ir/en/investmentpowerplants/statisticsofrepowerplants> (accessed Apr. 08, 2020).

واقع بینانه نبوده و نرخ های بسیار بالایی را نشان می دهد، در سناریوی سوم نیز به وضعیت مشابه ای مبتلا شده اما این بار سرمایه گذاری در این بخش را غیر اقتصادی نموده است. این مسئله در آمار های منتشره در خصوص نیروگاه های راه اندازی شده در کشور به وضوح مشاهده می شود به طوریکه ظرفیت نیروگاه های احداث شده تجدیدپذیر از حدود ۲۳۰ مگاوات در ابتدای سال ۱۳۹۴، در بازه ای کمتر از ۴ سال به بیش از ۳۰۰ درصد یعنی حدود ۸۰۰ مگاوات در انتهای سال ۱۳۹۸ رسیده است. این ارقام تا پایان سال ۹۹ تنها ۱۰۰ مگاوات و یا به عبارتی در حدود ۱۲ درصد افزایش داشته است [19] که خود نشان از توقف این رشد بوده است.

مراجع

- [1] International Renewable Energy Agency - IRENA, *Renewable Capacity Statistics 2020*. 2020.
- [2] A. H. Ghorashi and H. Maranlou, "Essential infrastructures and relevant policies for renewable energy developments in oil-rich developing countries: Case of Iran," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 141, p. 110839, May 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110839.
- [3] "Iran Feed-in Tariff – Policies - IEA," *IRENA Renewables Policies Database*, 2018. <https://www.iea.org/policies/4819-iran-feed-in-tariff> (accessed Aug. 29, 2021).
- [4] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1513–1524, Apr. 2011, doi: 10.1016/J.RSER.2010.11.037.
- [5] ز. مصطفی and ک. زهره، "تبیین روند تأسیس سازمان انرژی های تجدید پذیر و بهره وری انرژی: توضیح تغییر خط مشی با استفاده از نظریه جریانان چندگانه کینگدون،" Sep. 1395, Accessed: Aug. 30, 2021. [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/531171/certificate/print/>.
- [6] "معرفی سازمان | سازمان انرژی های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی برق" <http://www.satba.gov.ir/fa/aboutorganization/introduction-معرفی-سازمان> (accessed Aug. 30, 2021).
- [7] S. W. Ndiritu and M. K. Engola, "The effectiveness of feed-in-tariff policy in promoting power generation from renewable energy in Kenya," *Renew. Energy*, vol. 161, pp. 593–605, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.07.082.
- [8] S. L. TANG and H. J. TANG, "TECHNICAL NOTE: THE VARIABLE FINANCIAL INDICATOR IRR AND THE CONSTANT ECONOMIC INDICATOR NPV," <http://dx.doi.org/10.1080/00137910308965052>, vol. 48, no. 1, pp. 69–78, 2007, doi:

ACEC2021-45680

طراحی کنترل کننده توان اکتیو در راستای پاسخ اینرسی مجازی در ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک

میلاد اسدی^۱، مسعود رشیدی نژاد^۲، حسین هژبری هوتکی^۳، امیر عبداللهی^۴، ابراهیم پیرمرادی^۵، محمدرضا صالحی زاده^۶

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران milad.asadi14@gmail.com
^۲ استادیار گروه برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران mrashidi@uk.ac.ir
^۳ استادیار گروه برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران hhojabri@uk.ac.ir
^۴ دانشیار گروه برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران a.abdollahi@uk.ac.ir
^۵ دانشجوی دکتری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران ebpirmoradi@yahoo.com
^۶ استادیار گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، ایران salehizadeh@miau.ac.ir

واژه های کلیدی: ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک، اینرسی مجازی، تنظیم فرکانس، استراتژی همتا به همتا، استراتژی پیشرو پیرو

چکیده

امروزه در سیستم های قدرت با نفوذ بالای انرژی های نو مشکل کمبود اینرسی نسبت به سیستم های سنتی پر رنگ تر شده است. یکی از راهکارهای رفع این مشکل استفاده از ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک^۱ می باشد. نیروگاه های فتوولتائیک موجود بدون ذخیره انرژی برای مشارکت در مدولاسیون فرکانس شبکه برق^۲ مورد نیاز هستند، اما ژنراتورهای سنکرون مجازی فتوولتائیک موجود با ذخیره انرژی، کارایی لازم را برای کنترل هماهنگ ایجاد می کنند. بنابراین، ذخیره توان اکتیو ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک^۳ مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس روش های مختلف، برای به دست آوردن حداکثر نقطه تولید توان^۴ در واحدهای فتوولتائیک، استراتژی های همتا به همتا و پیشرو-پیرو^۵ توان اکتیو رزرو ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک پیشنهاد شده اند. از روش های عمده تحمیل اینرسی به صورت مجازی و ایجاد توان اولیه مدولاسیون فرکانس سیستم، استفاده از منابع ذخیره ساز انرژی و همچنین تنظیم نقطه کار اینورترهای فتوولتائیک کمتر از نقطه ی بیشینه تولید توان می باشد. این روش ها واحد فتوولتائیک را به قابلیت مدولاسیون فرکانس مجهز می کنند. اثربخشی استراتژی های کنترل پیشنهادی با نتایج شبیه سازی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

۱. مقدمه

تقاضا برای انرژی پاک در سیستم قدرت مدرن در حال افزایش است، که بر اساس عواملی چون قیمت سوخت و قوانین و مقررات پیش می رود. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند فتوولتائیک و انرژی باد، اکنون به تدریج شروع به تسلط بر ترکیب تولید انرژی می کنند و جایگزین منابع تولید سنتی مانند زغال سنگ و هسته ای می شوند. [۱ و ۲]. محبوبیت نیروگاه های توزیع شده فتوولتائیک بیشتر نفوذ انرژی های تجدیدپذیر را در سیستم قدرت مدرن افزایش می دهد. اگر چه این از نقطه نظر برداشت RES^۶ سودمند است، اما تولید مبتنی بر اینورتر هیچگونه پاسخ مکانیکی ایجاد نمی کند و از این رو ثبات فرکانس را به خطر می اندازد. [۳ و ۴].

به طور کلی موضوع کنترل بار-فرکانس بر اساس بازه زمانی پاسخ بازیابی ها، به سه مرحله بازیابی فرکانس بعد از بروز نامتعادلی توان مطابق شکل ۱ تقسیم می شود [۱]:

^۴ Maximum Power Point
^۵ Master-slave
^۶ Renewable Energy Source

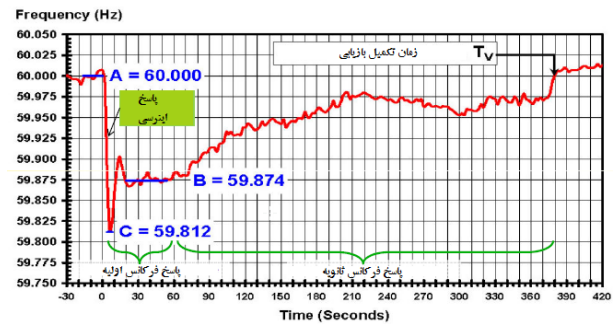
^۱ photovoltaic virtual synchronous generator
^۲ Frequency modulation
^۳ Active Power Reserve

برنامه‌ریزی شده است. برای این منظور، بهره‌بردارهای سیستم انتقال متکی به کنترل اتوماتیک تولید هستند و چارچوب زمانی کنترل فرکانس در محدوده چندین ثانیه تا چند دقیقه قرار می‌گیرد.

با توجه به بحث فوق، تنظیم سرعت چرخش توسط عملکرد گاورنر برای کنترل فرکانس انجام می‌شود اما گاورنر به طور سریع و در ثانیه‌های اول پاسخ نداده و اندکی تأخیر دارد. در طول این تأخیر، اینرسی جسم گردان ماشین‌های سنکرون نقش مهمی در محدود کردن نرخ تغییرات فرکانس به محض رخ دادن اغتشاش بزرگ در سیستم و در نتیجه جلوگیری از قطع بار دارد (زمان گذرای بعد از وقوع رخداد). از دیدگاه قابلیت اطمینان شبکه، حداقل فرکانس نیز بسیار قابل توجه بوده و باید بالاتر از تنظیمات رله‌های زیر فرکانسی باشد تا موجب عملکرد آن‌ها نگردد؛ بنابراین مقدار اینرسی سیستم تأثیر بسیاری بر پایداری فرکانس و شاخص‌های آن دارد و کاهش آن با نفوذ منابع مبتنی بر اینورتر، موجب افزایش نرخ تغییر فرکانس و حداکثر انحراف فرکانس و به طور کلی تأثیر منفی بر پایداری فرکانس می‌شود.

بنابراین، ژنراتور سنکرون مجازی، که ویژگی‌های خارجی ژنراتورهای سنکرون را شبیه‌سازی می‌کند، به تدریج در حال توسعه است. [۷و۸] از آنجایی که سیستم‌های فتوولتائیک مستعد تأثیرات محیطی هستند، برخی از محققان ژنراتور سنکرون مجازی را پیشنهاد داده‌اند که فناوری VSG را در سیستم‌های تولید برق فتوولتائیک سنتی اعمال می‌کند و آنها را در تنظیم فرکانس شبکه مشارکت می‌دهد. دو راه برای پیاده‌سازی این فناوری ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک وجود دارد: سیستم‌های ذخیره انرژی^۷ (ESS) و ذخیره توان اکتیو. ESSها معمولاً در سمت DC یا AC سیستم‌های فتوولتائیک به کار گرفته می‌شوند و می‌توانند مدولاسیون فرکانس (مدولاسیون فرکانس) خروجی توان را در مدت زمان کوتاهی با کنترل شارژ و دشارژ ESS به خوبی ارائه کنند. اجرای این نوع ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک نیاز به ذخیره ساز انرژی دارد، اما هزینه تجهیزات ذخیره انرژی همچنان بالاست. می‌توان با جابجایی نقطه کار از حداکثر نقطه تولید توان به ذخیره توان اکتیو دست یافت و توان اکتیو رزرو شده به عنوان خروجی توان اینرسی چرخشی و تنظیم فرکانس اولیه مورد استفاده قرار گیرد. در مرجع [۸]، سیستم فتوولتائیک با کاهش خروجی این قابلیت را در مقابل تغییرات سریع فرکانس استفاده می‌کند. با این حال، از توان ذخیره به طور موثر استفاده نمی‌شود و انرژی هدر می‌رود. مرجع [۹] روش‌های کنترل پیش‌بینی‌کننده اینورتر فتوولتائیک را پیشنهاد می‌کند که پاسخ فرکانس سریعی را ارائه می‌دهد، اما دقت پیش‌بینی نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

در این مقاله با توجه به روش‌های مختلف کسب حداکثر نقطه تولید توان نیروگاه‌های PV، استراتژی‌های کنترل هم‌تا به هم‌تا و پیش‌رو پیرو ذخیره توان اکتیو ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک پیشنهاد شده است که در آن ذخیره توان به عنوان توان اینرسی و توان اولیه



شکل ۱. پاسخ فرکانسی سیستم برای یک حادثه فرکانس

(۱) پاسخ اینرسی

قطع ناگهانی یکی از ژنراتورها در سیستم بهم پیوسته، در وهله‌ی اول باعث ایجاد نوسانات روتور بین ژنراتورهای باقیمانده در همان نیروگاه و ژنراتورهای سایر نقاط سیستم می‌گردد. پاسخ اینرسی با مصرف کردن انرژی جنبشی ذخیره‌شده در روتور توربین آغاز می‌شود، چراکه آزاد کردن این انرژی سریعتر از ثابت زمانی کنترل کننده‌ها است.

پیش از پاسخ دهی حلقه‌های کنترل فرکانس، انرژی جنبشی ذخیره شده در اجسام گردان تنها عاملی است که عدم تعادل توان را محدود می‌کند. بر این اساس، از انرژی جنبشی تمام ژنراتورهای موجود در مدار استفاده‌شده که این به نوبه‌ی خود سبب کاهش سرعت و متعاقباً فرکانس می‌شود. در این مرحله، تحت عنوان پاسخ اینرسی، مشارکت هر ژنراتور در مواجهه با عدم تعادل توان صرفاً به اینرسی آن وابسته است. پاسخ اینرسی تا زمان عکس‌العمل پاسخ اولیه، رفتار فرکانسی سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

(۲) کنترل اولیه فرکانس

کنترل اولیه توسط حلقه‌های کنترلی ("کنترل کننده‌های سرعت") قرار داده شده در ژنراتورها انجام می‌شود و در صورت در دسترس بودن ذخیره اولیه‌ی کافی، تنظیم سریع (در عرض چند ثانیه) و غیرمتمرکز تعادل بین تولید و مصرف بعد از وقوع اغتشاش را ممکن می‌سازد.

کنترل اولیه، در اصل توسط مکانیسم کنترل به وسیله گاورنر سرعت در توربین ژنراتور حاصل می‌شود. وقتی فرکانس سیستم افت میکند، گاورنر توربین برای افزایش توان مکانیکی خروجی آن وارد عمل می‌شود. هرچند که کنترل اولیه فرکانس تعادل بین تولید و مصرف را بازیابی میکند، اما نمی‌تواند فرکانس را به مقدار قبل از وقوع اغتشاش برگرداند.

(۳) کنترل ثانویه فرکانس توسط کنترل اتوماتیک تولید (AGC)

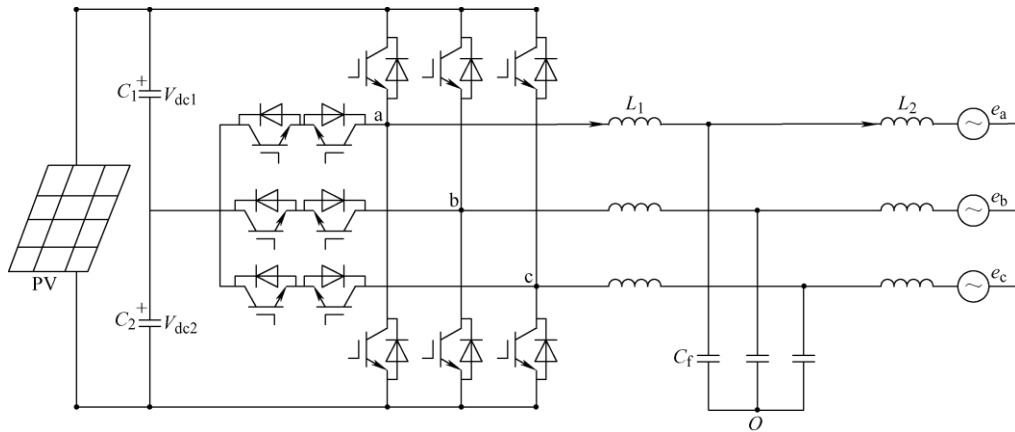
پس از عکس‌العمل کنترل اولیه به منظور بازیابی تعادل، مقداری انحراف فرکانس باقی می‌ماند که باعث وقوع تغییرات در توان عبوری بین نواحی مختلف کنترلی می‌شود. تمام مجموعه ژنراتورهای نواحی کنترلی مختلف به تغییرات فرکانس مشترک واکنش نشان می‌دهند، حتی اگر اغتشاش در ناحیه دیگری از سیستم به هم پیوسته رخ داده باشد. اهداف کنترل ثانویه برگرداندن فرکانس به مقدار نامی و همچنین بازگرداندن تبادل توان بین نواحی کنترلی به مقادیر از پیش



که در آن k_f ضریب فرکانس اولیه، τ ثابت زمانی تاخیر، ω_g سرعت زاویه‌ای شبکه، P_{ref} خروجی توان اکتیو، J اینرسی مجازی، ω_{ref} سرعت زاویه‌ای روتور نامی، s عملگر لاپلاس، u_{ref} مقدار مرجع ولتاژ، Q_{ref} خروجی توان راکتیو، Q_0 فرمان توان راکتیو بالا، n ضریب افت توان راکتیو و u_d جزء محور d ولتاژ خروجی است.

۳. استراتژی کنترل هم‌تا به هم‌تا

در استراتژی کنترل هم‌تا به هم‌تا، MPPT به طور جداگانه توسط هر اینورتر انجام می‌شود. سپس توان اکتیو به نسبت معینی ذخیره می‌شود و پس از ذخیره توان، مدولاسیون فرکانس در نزدیکی نقطه توان انجام می‌شود. در این مدت، توان مدولاسیون فرکانس نمی‌تواند از توان ذخیره تجاوز کند. به دلیل تغییر تابش خورشید، اعمال فوق در فواصل زمانی تکرار می‌شود. کنترل ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک هم‌تا به هم‌تا باید بین حالت MPPT و مدولاسیون فرکانس جابجا شود. توان اکتیو داده شده کلید این تغییر است و با مدار کنترلی نشان داده شده در شکل ۳ مشخص می‌شود.



شکل ۲. توپولوژی مدار اصلی ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک

$$P_{limit} = (u_{dc} - u_{lit})G_{lit}(s) \quad (4)$$

که در آن u_{lit} ولتاژ هشدار و $G_{lit}(s)$ کنترل کننده PI با حداکثر خروجی صفر است.

فرمان توان اکتیو در حالت تنظیم فرکانس برابر است با:

$$P_{ref2} = (1 - k)P_{mpp} + P_{ref} + P_{limit} \quad (5)$$

که در آن k ضریب ذخیره است که به طور کلی ۱۰٪ تنظیم می‌شود و P_{mpp} توان MPP است.

برای اطمینان از سرعت فرکانس قطع سمت فیلتر، یک حلقه توان اضافه شده و یک کنترل کننده PID نیز استفاده می‌شود.

$$P_{dref} = (P_{ref} - P_e)G_p(s) \quad (6)$$

که در آن P_{ref} مقدار مشخص شده حلقه توان، P_{dref} خروجی حلقه توان، P_e توان الکترومغناطیسی و $G_p(s)$ کنترل کننده PID است. وقتی توان اکتیو رزرو ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک در حالت

مدولاسیون فرکانس استفاده می‌شود. این دو استراتژی با هم مقایسه می‌شوند. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی برای تأیید اثربخشی استراتژی‌های کنترل پیشنهادی ارائه می‌شود.

۲. توپولوژی و کنترل پایه

ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک توپولوژی مدار اصلی اینورتر فتوولتائیک متمرکز سنتی را مورد استفاده قرار می‌دهد که در شکل ۲ نشان داده شده است. $C1$ و $C2$ خازن‌های جانبی DC هستند. با نادیده گرفتن مقاومت سلف و خازن فیلتر، سلف سمت پل $L1$ ، خازن فیلتر Cf و سلف سمت شبکه $L2$ فیلتر LCL را تشکیل می‌دهند. با توجه به تغییرات نیروگاه‌های سنتی PV، ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک حالت کنترل منبع جریان را به کار می‌گیرد. کنترل اصلی به شرح زیر است:

$$P_{ref} = \frac{J\omega_{ref}\tau s}{\tau s + 1}(\omega_{ref} - \omega_g) + k_f(\omega_{ref} - \omega_g) \quad (1)$$

$$Q_{ref} = Q_0 + \frac{1}{n}(u_{ref} - u_d) \quad (2)$$

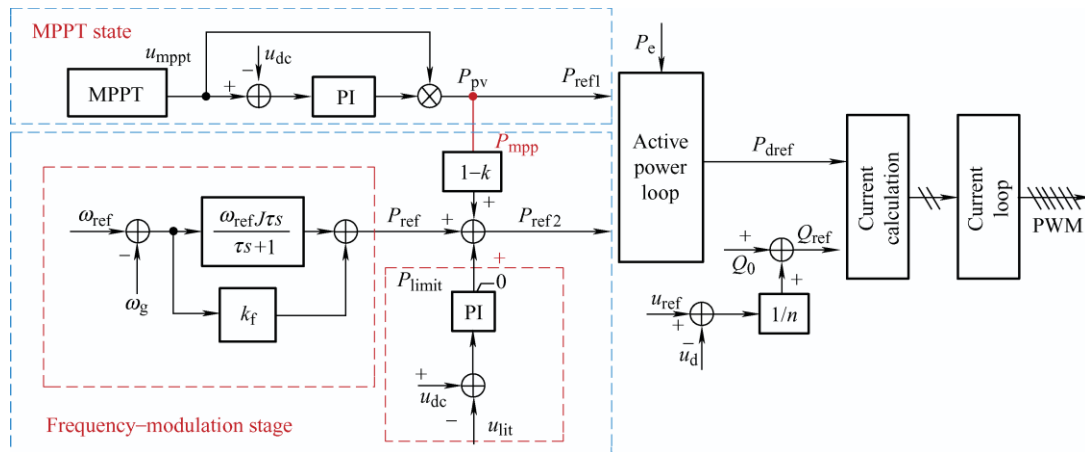
در حالت MPPT، الگوریتم MPPT می‌تواند از روش مشاهده-اغتشاش برای به دست آوردن u_{mppt} ولتاژ مرجع سمت DC استفاده کند. توان اکتیو خروجی P_{ref1} به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{ref1} = u_{mppt}(u_{mppt} - u_{dc})G_{dc}(s) \quad (3)$$

که در آن u_{dc} ولتاژ سمت DC و $G_{dc}(s)$ کنترل کننده PI است. هنگامی که MPP به حالت MPPT رسید، وضعیت عملکرد به حالت تنظیم فرکانس با توجه به الزامات کنترلی تغییر می‌کند. برای اطمینان از اینکه ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک به طور پایدار در سمت راست منحنی فتوولتائیک [۱۰] کار کند، حداقل ولتاژ در سمت DC باید محدود شود. ولتاژ MPP با یک حاشیه مشخص به عنوان یک مقدار هشدار باقی می‌ماند و خروجی یک کنترل کننده PI (حداکثر مقدار صفر است) بر روی فرمان توان اکتیو تنظیم فرکانس قرار می‌گیرد. حد توان برابر است با:

محاسبه توان و حلقه داخلی جریان مانند VSG منبع جریان سنتی است و در اینجا مورد بحث قرار نخواهد گرفت.

MPPT است $P_{ref} = P_{ref1}$ و وقتی توان اکتیو رزرو ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک در حالت تنظیم فرکانس است $P_{ref} = P_{ref2}$.

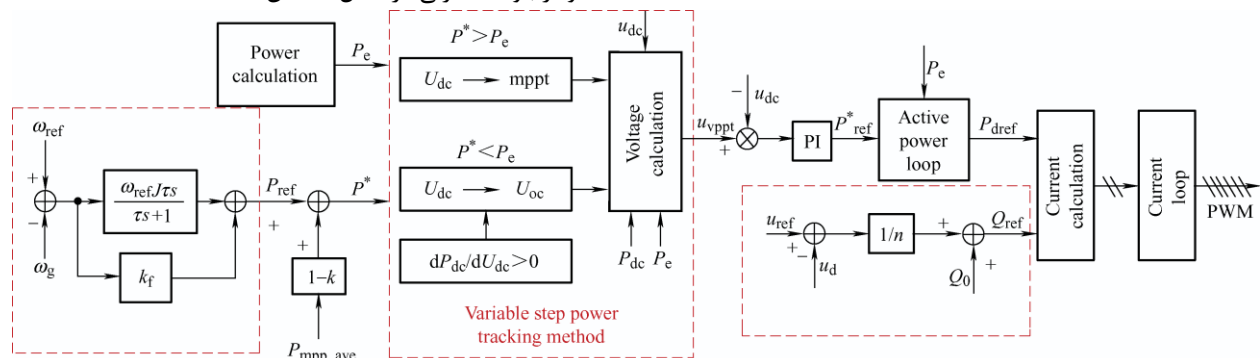


شکل ۳. بلوک دیاگرام کنترل همتا به همتا توان اکتیو رزرو ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک

منتقل می شود. اینورتر پیرو میانگین توان MPP و ولتاژ دریافتی اینورترهای اصلی را محاسبه می کند. سپس توان رزرو و ضریب فرکانس اولیه را با توجه به میانگین حداکثر توان و ولتاژ تنظیم می کند و مدولاسیون فرکانس را نزدیک نقطه کار رزرو انجام می دهد. نمودار بلوک کنترلی در شکل ۴ نشان داده شده است.

۴. استراتژی کنترل پیشرو-پیرو

بر اساس اصل تصادفی، تعداد معینی از اینورترهای فتوولتائیک به عنوان مبدل اصلی انتخاب می شوند. همه اینورترهای اصلی الگوریتم MPPT را انجام می دهند و توان و ولتاژ MPP به اینورترهای پیرو



شکل ۴. نمودار کنترل اینورتر پیشرو-پیرو توان اکتیو رزرو ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک

ولتاژ سمت DC، u_{vppt} با روش فوق به دست می آید. مرجع توان اکتیو برابر است با:

$$P_{ref}^* = (u_{vppt} - u_{dc})G_{dc}(s) \quad (8)$$

از آنجایی که از کنترل منبع جریان نیز استفاده می شود، در کنترل پیشرو-پیرو، اینورتر پیرو با حالت کنترل همتا به همتا در کنترل توان راکتیو، محاسبه جریان، حلقه جریان، و مدولاسیون پهنای پالس (PWM) یکسان است.

میانگین حداکثر توان P_{mpp_ave} از طریق مخابره به دست می آید. فرمان توان خروجی اکتیو برابر است با:

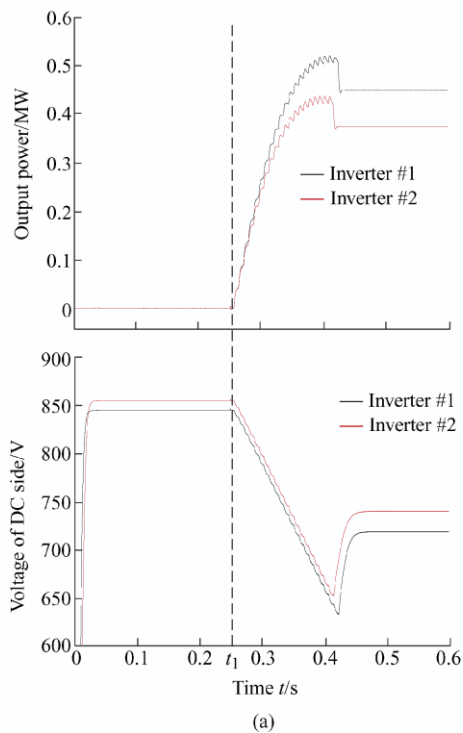
$$P^* = (1 - k)P_{mpp_ave} + P_{ref} \quad (9)$$

که در آن k ضریب توان ذخیره، و $(1 - k)P_{mpp_ave}$ توان نقطه کار ذخیره اینورتر پیرو است.

جهت بررسی ولتاژ سمت DC، u_{dc} با تفاوت بین فرمان توان اکتیو خروجی P^* و توان اکتیو لحظه ای P_e کنترل می شود. وقتی $P^* < P_e$ ، u_{dc} به سمت MPP منتقل می شود. وقتی $P^* > P_e$ ، u_{dc} به سمت ولتاژ مدار باز حرکت می کند. برای به کار انداختن ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک در نیم صفحه سمت راست منحنی P-U، زمانی که مقدار تفاضلی توان سمت DC، P_{dc} به ولتاژ u_{dc} بیشتر از صفر باشد، U_{dc} به سمت ولتاژ مدار باز منتقل می شود. مرجع



کار دو توان اکتیو رزرو ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک به دلیل تابش های مختلف متفاوت است. مطابق شکل ۵b، فرکانس شبکه زمانی که بار به طور ناگهانی در t_2 افزایش یابد، کاهش می یابد و دو ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک شروع به تعدیل فرکانس می کنند. توان خروجی افزایش می یابد و ولتاژ سمت DC کاهش می یابد. با این حال، فرکانس شبکه کندتر از فرکانس شبکه بدون مدوله کاهش می یابد و انحراف از مقدار مرجع نیز کوچکتر است که اینرسی و میرایی سیستم را افزایش می دهد.



شکل ۵. نتایج شبیه سازی استراتژی کنترل همتا به همتا توان اکتیو رزرو ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک

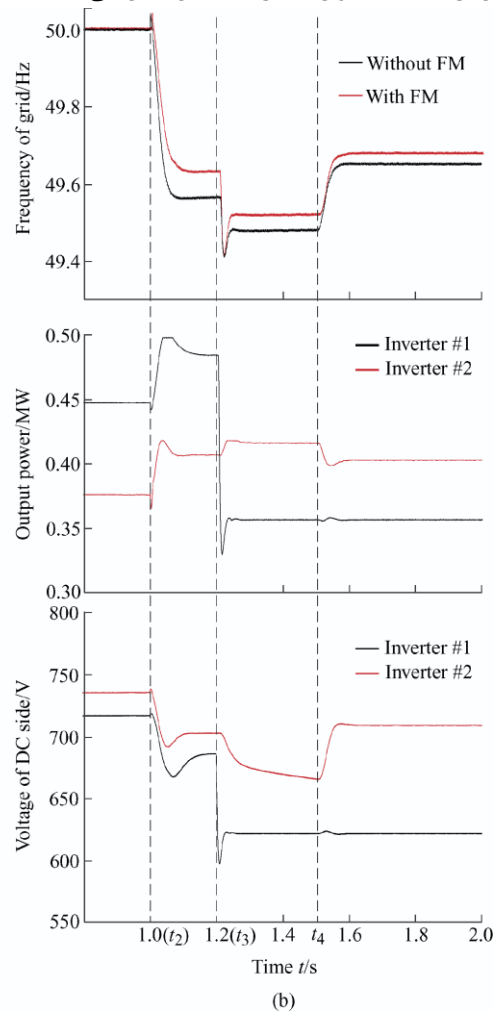
توان را با مدولاسیون فرکانس در خروجی می دهد. هنگامی که افت دوم در شبکه رخ می دهد، اینورتر شماره ۲ به دلیل محدودیت توان خود، فقط اینرسی و میرایی کوچک را ایجاد می کند، بنابراین توان کمی افزایش می یابد. در زمان t_4 ، بار مشترک به طور ناگهانی کاهش می یابد. به دلیل فرکانس شبکه پایین تر، اینورتر شماره ۱ حداکثر توان را تولید می کند و اینورتر شماره ۲ توان را با اینرسی و میرایی کم تولید می کند.

۵. نتایج شبیه سازی

در این مقاله، نیروگاه فتوولتائیک شبیه سازی شده دارای ظرفیت کل 1 MVA شامل اینورترهای #۱ و #۲ هر یک با ظرفیت ۵۰۰ کیلو ولت آمپر می باشد.

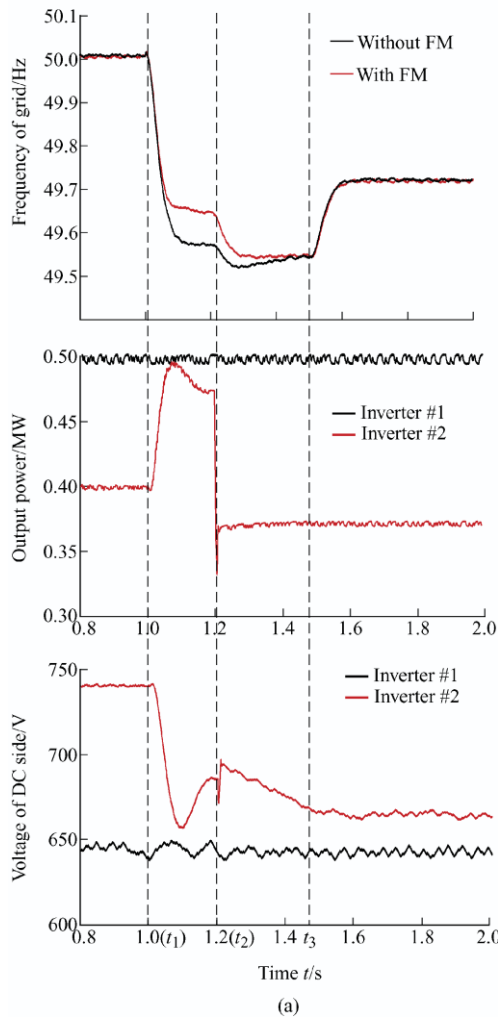
۱.۵. تأیید کنترل همتا به همتا

نتایج شبیه سازی استراتژی همتا به همتا در شکل ۵ نشان داده شده است. طبق شکل ۵a، پس از راه اندازی ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک در زمان t_1 ، ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک به MPP می رسد و پس از حفظ یک ذخیره مشخص عمل می کند. نقاط



سپس، اینورتر شماره ۱ در t_3 سایه میزند و تابش به طور ناگهانی از $1000 W/m^2$ به $700 W/m^2$ تغییر می کند. توان فتوولتائیک اینورتر شماره ۱ کاهش می یابد، در حالی که توان متصل به شبکه بدون تغییر باقی می ماند. از آنجایی که توان اکتیو لحظه ای کمبود دارد، فرکانس شبکه دو بار کاهش می یابد و ولتاژ سمت DC کاهش می یابد. هنگامی که ولتاژ کمتر از مقدار هشدار است، کمترین مازول محدود کننده ولتاژ توان منفی را تولید می کند، به طوری که توان خروجی در نزدیکی MPP تثبیت می شود و اینورتر شماره ۱ حداکثر

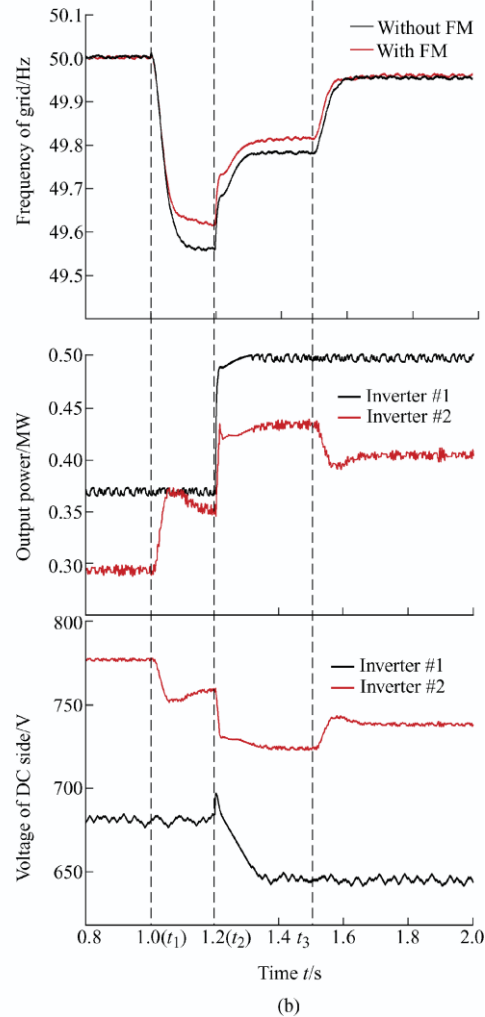
میرایی توسط اینورتر پیرو ارائه می‌شود. در زمان t_2 ، تابش اینورتر پیرو از 1000 W/m^2 به 700 W/m^2 کاهش می‌یابد. با کنترل ولتاژ DC، توان خروجی اینورتر پیرو به حداکثر توان کاهش می‌یابد و ولتاژ سمت DC به طور قابل توجهی کاهش نمی‌یابد. در زمان t_3 ، یک بار مقاومتی 0.2 مگاواتی به طور ناگهانی در نقطه PCC کاهش می‌یابد. از آنجایی که سایه ابرها حذف نمی‌شود، اینورتر پیرو تنها حداکثر توان را تولید می‌کند.



۲.۵. تأیید کنترل پیشرو-پیرو

نتایج شبیه سازی استراتژی پیشرو-پیرو در شکل ۶ نشان داده شده است. اینورتر شماره ۱ مبدل اصلی است و روش مشاهده-اغتشاش اعمال شده است. اینورتر شماره ۲ اینورتر پیرو است که از الگوریتم ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک استفاده می‌کند.

شکل ۶a نتایج را با بار و تابش اینورتر پیرو متفاوت نشان می‌دهد. در زمان t_1 ، یک بار مقاومتی 0.5 مگاواتی به طور ناگهانی در نقطه PCC افزایش می‌یابد. فرکانس شبکه کاهش می‌یابد، و پشتیبانی اینرسی و



شکل ۶. نتایج شبیه سازی استراتژی کنترل پیشرو-پیرو توان اکتیو رزرو ژنراتور سنکرون مجازی فتوولتائیک

اینورتر پیرو است. اینورتر افزایش ناگهانی فرکانس شبکه را تشخیص می‌دهد که در نتیجه خروجی انرژی اینرسی منفی است. بنابراین توان خروجی اینورتر پیرو با رسیدن به حالت پایدار، اندکی کاهش می‌یابد و در نهایت تعادل حاصل می‌شود. در زمان t_3 ، بار کاهش می‌یابد و فرکانس توسط اینورتر پیرو با اینرسی و میرایی زیاد مدوله می‌شود.

شکل ۶b نتایج را با بار و تابش اینورتر اصلی و پیرو متفاوت نشان می‌دهد. در زمان t_1 ، پشتیبانی اینرسی و میرایی تنها زمانی می‌تواند توسط اینورتر پیرو ارائه شود که یک بار مقاومتی 0.5 مگاواتی به طور ناگهانی در نقطه PCC افزایش می‌یابد. در زمان t_2 ، تابش اینورترهای اصلی و پیرو افزایش می‌یابد. از آنجایی که MPP اینورتر اصلی تنظیم می‌شود، ضریب مدولاسیون فرکانس و توان ذخیره اینورتر پیرو نیز تنظیم می‌شود و فرکانس شبکه افزایش می‌یابد. این فرآیند عمدتاً ناشی از تغییر ناگهانی توان خروجی اینورتر اصلی و افزایش توان ذخیره



- [3] A Etxegarai, P Eguia, E Torres, et al. Review of grid connection requirements for generation assets in weak power grids. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 1501-1514.
- [4] T W Zheng, L J Chen, T Y Chen, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(21): 165-175..
- [5] Z Lü, W Sheng, Q Zhong, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [6] B Hassan, T Ise, Y Miura. Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 54: 244-254.
- [7] Q C Zhong, G Weiss. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2011, 58: 1259-1267.
- [8] A Sangwongwanich, Y Yang, F Blaabjerg. A sensorless power reserve control strategy for two-stage grid-connected pvsystems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(11): 8559-8569.
- [9] X Li, H Wen, Y Zhu, et al. A novel sensorless photovoltaic power reserve control with simple real-time MPP estimation. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2019, 34(8): 7521-7531.
- [10] T W Zheng, L J Chen, W Liu, et al. Multi-mode operating control for photovoltaic virtual synchronous generator considering the dynamic characteristics of primary source. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 454-463.
- [11] R. Leelaruji and M. Bollen, "Synthetic inertia to improve frequency and how often it is needed," *STRI AB*, 2015.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله اثربخشی دو استراتژی کنترلی جهت استفاده از توان اکتیو رزرو در سیستم های فتوولتائیک که فاقد پاسخ اینرسی هستند مورد بررسی قرار گرفت که هر کدام دارای مزایا و معایب خود به شرح زیر هستند:

جدول ۱: مقایسه دو طرح

| پیشرو-پیرو | همتا به همتا | |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------|
| تغییر حالت مورد نیاز نیست | مناسب برای طیف گسترده ای از کاربردها، غیر ارتباطی | مزایا |
| فقط برای مناطق مسطح، ارتباط مورد نیاز است | نیاز به جابجایی بین حالت های MPPT و مدولاسیون فرکانس | معایب |

از مباحث فوق می شود نتیجه گرفت که هر یک از دو روش پیشنهادی را می توان با توجه به هدف و مدل مورد مطالعه استفاده نمود و به پاسخ های بهتری در کاربرد مد نظر دست یافت.

مراجع

- [1] X Yang, Y Song, G Wang, et al. A comprehensive review on the development of sustainable energy strategy and implementation in China. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, 1(2): 57-65.
- [2] R H Lasseter. *Microgrids and distributed generation. Intelligent Automation & Soft Computing*, 2007, 133(3): 225-234.

ACEC2021-48072

تهیه نانوکامپوزیت نانومیله ZnO و نانوذرات CuO و بررسی عملکرد فوتوکاتالیستی آن در تولید هیدروژن تحت تابش خورشید

قادر حسین زاده

گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه بنباب، بنباب، ایران ghader87@gmail.com

چکیده

در این مطالعه نانوکامپوزیت ZnO-CuO حاوی ۲۰ درصد وزنی اکسید مس، از نانومیله های ZnO و نانوذره های CuO با روش هیدروترمال تهیه گردید و برای اولین بار به عنوان فوتوکاتالیست برای تولید هیدروژن از تجزیه آب تحت تابش نور خورشید مورد استفاده قرار گرفت. بلورینگی، شکل و اندازه ذرات، خواص اپتیکی نانوکامپوزیت تهیه شده با آنالیزهای XRD, FESEM, PL, DRS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که نانوکامپوزیت به صورت موفق تهیه شده و در مقایسه با ZnO و CuO دارای عملکرد فوتوکاتالیستی بهتری برای تولید هیدروژن میباشد که دلیل آن میتواند بهبود خواص اپتیکی (افزایش قابلیت جذب نور مرئی) و کاهش بازترکیب الکترون و حفره باشد. **واژه های کلیدی:** نانوکامپوزیت، ZnO، CuO، فوتوکاتالیست، تولید هیدروژن

مقدمه

به دلیل مسائل و مشکلات متعدد مرتبط با سوختهای فسیلی مانند گرم شدن جهانی، تغییرات گسترده آب و هوایی و آلودگی هوا، توسعه منابع انرژی پاک و تجدید پذیر بیش از پیش احساس میشود [۱]. هیدروژن به دلیل دانسیته انرژی بالا و آلودگی زیست محیطی کم به عنوان منبع انرژی تجدید پذیر و پاک برای جایگزینی سوختهای فسیلی بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است [۲-۴]. فوتوکاتالیستهای نیم رسانا به عنوان روشی موثر و کم هزینه برای تولید فوتوکاتالیستی هیدروژن از تجزیه آب میتوانند به کار برده شوند [۵]. در این زمینه ZnO به دلیل ارزان بودن، غیر سمی بودن و پایدار شیمیایی بالا به عنوان یک نیم رسانا n مورد مطالعه قرار گرفته است [۴، ۶-۹]. اما این نیم رسانا به دلیل جذب کم نور مرئی و همچنین باز ترکیب بالا الکترون و حفره عملکرد چندان جالبی در زمینه تولید هیدروژن از تجزیه آبدار تابش نور خورشید ندارد. و

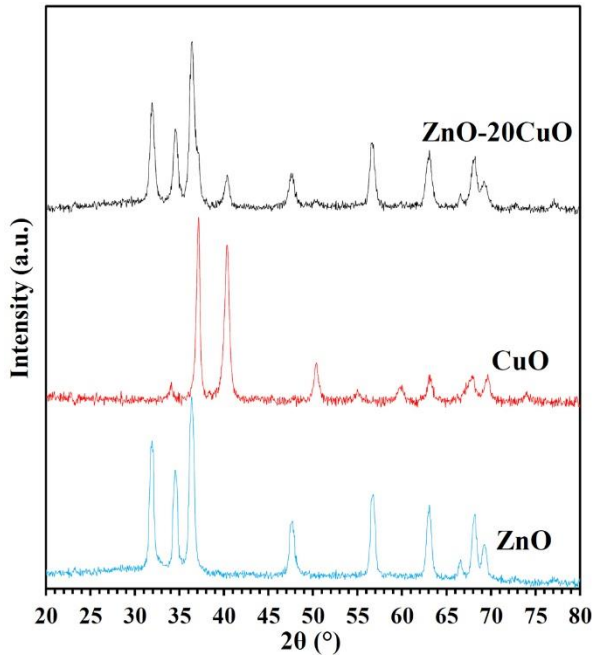
همین عوامل استفاده از آن را با محدودیتهای جدی روبرو کرده است. به همین دلیل روشهای متعددی در سالهای اخیر برای بهبود عملکرد فوتوکاتالیستی ZnO انجام شده است که از آن جمله میتوان به مواردی مانند آلتییدن با فلزات یا نافلزات، کامپوزیت کردن با مواد کربنی با رسانایی بالا مانند گرافن، حساس سازی با رنگهای آلی، مهندسی سطح و ساختار مانند تغییر مورفولوژی و ترکیب نانوکامپوزیتی با نیم رساناهای دیگر اشاره کرد. تهیه کامپوزیت نامتجانس ZnO با نیم رساناهای دیگر میتواند یک روش موثر در بهبود عملکرد فوتوکاتالیستی این نیم رسانا باشد زیرا میتواند باعث کاهش چشم گیر با ترکیب الکترون و حفره شود [۳، ۷، ۱۰-۱۴]. به همین دلایل در سالهای اخیر کامپوزیتهای نامتجانس فراوانی از ZnO با سایر نیم رساناها تولید شده اند مانند ZnO/SrTiO₃, ZnO/CdSe, ZnIn₂S₄/ZnO, C₃N₄/ZnO [۳، ۱۵، ۱۶].

در سالهای اخیر نیم رسانای CuO به عنوان یک نیم رسانا نوع p ایده آل توجه بسیاری را برای کاربردهای تولید فوتوکاتالیستی هیدروژن به دلیل فراوانی و در دسترس بودن، سمیت کم، گاف انرژی کم و قابلیت جذب بالا برای نور خورشید و ارزان بودن به خود جلب کرده است [۱۷]. اما به دلیل بازترکیب بالا الکترون و حفره در سطح این نیم رسانا عمدتاً به صورت کامپوزیت با سایر نیم رساناها مورد استفاده قرار میگیرد [۱۸]. به همین دلیل در مطالعه حاضر ما با کامپوزیت کردن نیم رسانا ZnO با نیم رسانا CuO میخواهیم عملکرد آن را در تولید فوتوکاتالیستی هیدروژن از تجزیه آب در تابش نور خورشید مورد ارزیابی قرار دهیم..

بخش تجربی

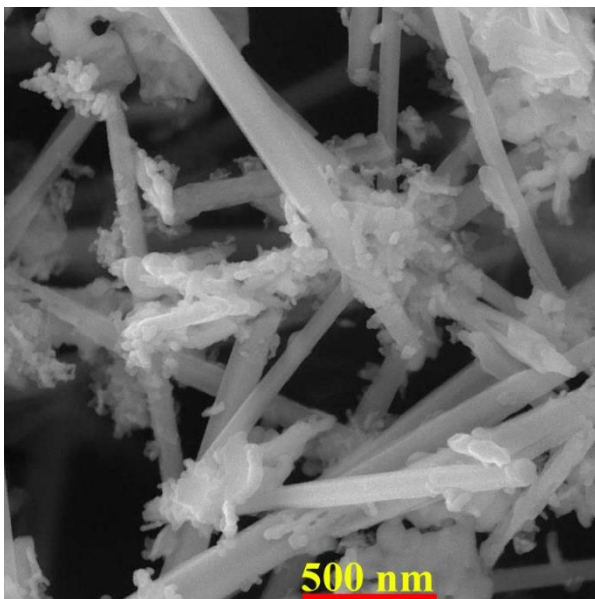
برای تهیه نانومیله های ZnO ۵ میلی مول Zn(NO₃)₂·6H₂O در ۵۰ میلی لیتر اتیلن گلیکول حل گردید و سپس با اضافه کردن ۳ میلی لتر محلول آمونیاک ۲۵ درصد و ۵ میلی مول Na₂CO₃ محلول نهایی تهیه گردید. این محلول در اتوکلاو ۷۵ میلی لیتری به

مشهود است. همچنین پهن شدگی پیکهای پرش نشان دهنده نانوساختار بودن نمونه ها میباشد.



شکل ۱- طیف های XRD نمونه های تهیه شده.

با استفاده از آنالیز SEM میتوان اطلاعاتی در رابطه با اندازه و مورفولوژی ذرات تشکیل دهنده نانوکامپوزیت بدست آورد که نتایج حاصل برای نمونه ZnO-20CuO در شکل ۲ آورده شده است. در تصویر SEM نانوميله های ZnO با قطر تقریباً ۶۰ نانومتر و نانوذرات ریز CuO با اندازه تقریباً ۲۰ نانومتر مشاهده میشود.



شکل ۲- تصویر SEM نانو کامپوزیت ZnO-20CuO

به منظور بررسی عملکرد فوتوکاتالیستی یک فوتوکاتالیست باید رفتار اپتیکی آن مورد ارزیابی قرار گیرد به این منظور طیف جذب

مدت ۱۰ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد تحت فرآیند هیدروترمال قرار گرفت.

برای تهیه نانو ذرات CuO، ۰.۱ گرم $\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ در ۵۰ میلی لیتر DMF حل گردید و سپس در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴ ساعت تحت چرخش قرار گرفت تا نانوذرات تشکیل شوند.

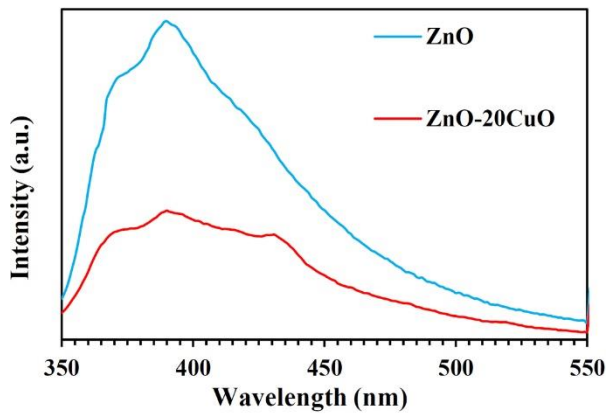
برای تهیه کامپوزیت ZnO-20CuO حاوی ۲۰ درصد وزنی اکسید مس، مقادیر مطلوبی از نانوميله های ZnO و نانوذرات CuO در ۵۰ میلی لیتر اتیلن گلیکول توسط پروب فراصوت پخش گردیدند و سپس سوسپانسیون حاصل بعد از انتقال به اتوکلاو ۷۵ میلی لیتری به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد تحت فرآیند هیدروترمال قرار گرفت. و در پایان کامپوزیت حاصل با استفاده از سانتریفیوژ جدا گردید.

آنالیز XRD با دستگاه Philips X'Pert MPD Pro X-ray diffractometer with Cu K α irradiation ($\lambda = 1.54018$ Å) انجام شد. آزمون FESEM با دستگاه FESEM, MIRA3 (A) انجام شد. آزمون Tescan FESEM, Czech Republic فوتولومینسانس (PL) با دستگاه VARIAN (Cary Eclips) انجام شد. آزمون Shimadzu-UV-3101PC در دستگاه Shimadzu-UV-3101PC انجام شد. آزمون UV/Vis spectrophotometer انجام شد.

برای بررسی کارایی فوتوکاتالیستی تولید هیدروژن بر روی نمونه های تهیه شده ۵۰ میلی گرم از نمونه های تهیه شده در ۵۰ میلی لیتر آب توسط پروب فراصوت پخش و پس از اضافه کرده ۱ گرم $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ و ۰.۲۵ گرم Na_2SO_3 ، سوسپانسیون حاصل توسط دمش گاز نیتروژن به مدت ۳۰ دقیقه اکسیژن زدایی شده و سپس تحت تابش نور خورشید مصنوعی lamp 570W Xenon قرار گرفت. مقدار هیدروژن تولیدی توسط Shimadzu GC-2014 gas chromatograph اندازه گیری شد.

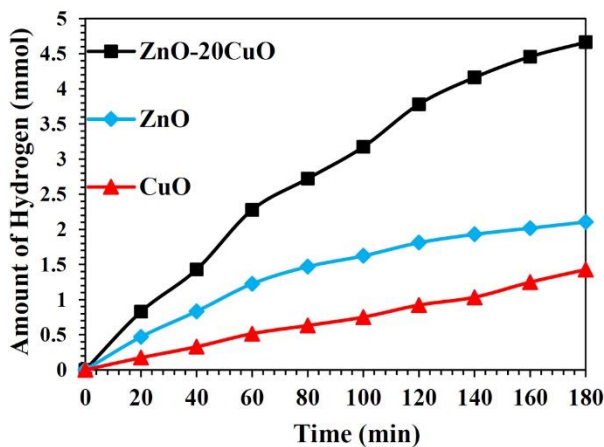
نتایج و بحث

طیف های XRD نمونه های تهیه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. در طیف XRD نمونه ZnO پیکهای مربوط به صفحات پراش (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201) به ترتیب در $2\theta = 31.7^\circ, 34.3^\circ, 36.2^\circ, 47.6^\circ, 56.4^\circ, 62.9^\circ, 66.3^\circ, 67.9^\circ, 69.1^\circ$ مشاهده میشود که کاملاً با JCPDS #36-1451 ساختار کریستالی ورتزیت ZnO منطبق است و نشان دهنده فاز هگزاگونال ZnO است. در طیف XRD نمونه CuO پیکهای صفحات (110), (002), (111), (201), (311), (020), (113), (022), (201), (311) به ترتیب در $2\theta = 34.1^\circ, 37.9^\circ, 40.4^\circ, 50.4^\circ, 59.9^\circ, 63.1^\circ, 67.9^\circ, 69.6^\circ$ مشاهده میشود و نشان دهنده فاز تنوریت CuO میباشد (JCPDS Card No. 05-0661). در نمودار XRD مربوط به نانوکامپوزیت ZnO-20CuO حضور پیکهای ZnO و CuO کاملاً



شکل ۴- مقایسه طیف PL نمونه های مختلف

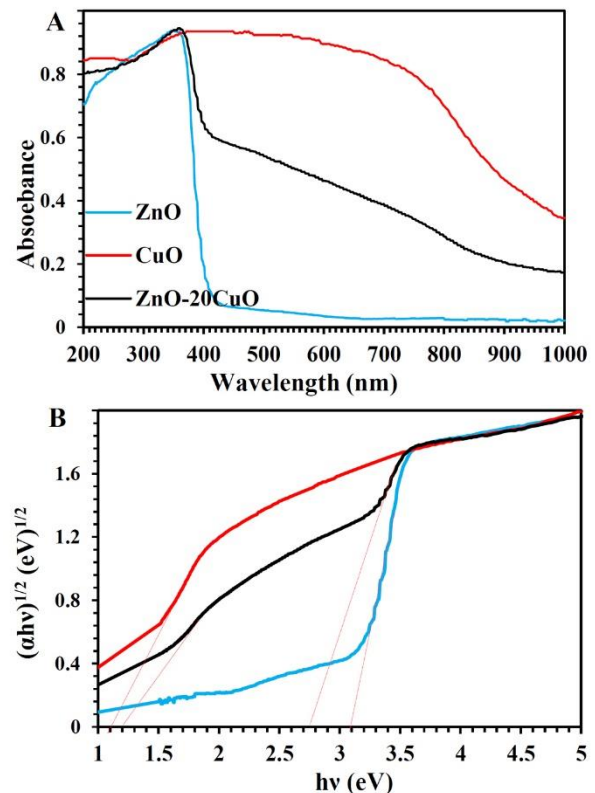
در شکل ۵ کارایی فوتوکاتالیستی نمونه های مختلف تهیه شده در تولید هیدروژن از تجزیه آب تحت تابش نور خورشید مصنوعی باهم مقایسه شده اند. همچنان که مشاهده میشود کامپوزیت کردن ZnO و CuO در نمونه ZnO-20CuO عملکرد کاتالیست را به طور قابل توجهی افزایش داده است بهبود کارایی فوتوکاتالیست در ZnO در کامپوزیت کردن آن با CuO میتواند به عواملی مانند بهبود جذب تابش مرئی با کاهش گاف انرژی و کاهش بازترکیب الکترون و حفره مربوط باشد.



شکل ۵- نمودار میزان تولید هیدروژن از تجزیه آب تحت تابش نور خورشید بر روی نمونه های تهیه شده.

به منظور بررسی پایداری و امکان بازیافت فوتوکاتالیست ZnO-20CuO آزمایش چرخه ای بر روی آن انجام شد. همچنان که در شکل ۶ مشاهده میشود بعد از ۵ چرخه استفاده از کامپوزیت ZnO-20CuO عملکرد فوتوکاتالیستی تولید هیدروژن تنها ۸ درصد کاهش یافته که نشانگر پایداری قابل قبول این فوتوکاتالیست میباشد.

نوری نمونه های تهیه شده مورد آزمون قرار گرفت که نتایج مربوطه در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنان که مشاهده میشود نانومیله های ZnO عمدتاً در ناحیه فرابنفش جذب دارند. در حالی که CuO دارای جذب گسترده در ناحیه مرئی میباشد. حضور CuO در ZnO باعث جابجایی جذب آن به سمت طول موجهای بلند تر و محدوده نور مرئی شده است که میتواند باعث بهبود عملکرد فوتوکاتالیست کامپوزیتی در تابش طبیعی خورشید شود. به منظور بررسی دقیق تر این اثر، گاف انرژی نمونه ها بررسی شد و مشاهده شد که گاف انرژی ZnO ۳٫۱ الکترون ولت میباشد، گاف انرژی CuO ۱٫۱ الکترون ولت میباشد و نانوکامپوزیت ZnO-20CuO دارای دو گاف انرژی در ۲٫۷۵ و ۱٫۲ الکترون ولت میباشد



شکل ۳- (A) طیف DRS (B) گاف انرژی محاسبه شده نمونه ها.

یکی از عوامل موثر در عملکرد فوتوکاتالیستی، جدایش حامل های بار یعنی الکترون و حفره تولید شده توسط تابش میباشد. برای بررسی این پدیده میتوان از طیف بینی فوتولومینسانس (PL) بهره برد. در این حالت کاهش شدت PL نشان دهنده کاهش باز ترکیب الکترون و حفره میباشد. همچنان که در شکل ۴ مشاهده میشود شدت PL نمونه نانوکامپوزیتی ZnO-20CuO از نمونه ZnO کمتر است پس میتوان نتیجه گرفت که کامپوزیت کردن ZnO با CuO به طور موثری باز ترکیب الکترون و حفره را کاهش داده است.

performance of 3-D hierarchical porous zinc oxide, International Journal of Hydrogen Energy, 39 (2014) 13486-13490.

[7] X. Wang, Q. Li, H. Xu, L. Gan, X. Ji, H. Liu, R. Zhang, CuS-modified ZnO rod/reduced graphene oxide/CdS heterostructure for efficient visible-light photocatalytic hydrogen generation, International Journal of Hydrogen Energy, 45 (2020) 28394-28403.

[8] M.H. Hsu, C.J. Chang, S-doped ZnO nanorods on stainless-steel wire mesh as immobilized hierarchical photocatalysts for photocatalytic H₂ production, International Journal of Hydrogen Energy, 39 (2014) 16524-16533.

[9] K. Govatsi, A. Seferlis, S.G. Neophytides, S.N. Yannopoulos, Influence of the morphology of ZnO nanowires on the photoelectrochemical water splitting efficiency, International Journal of Hydrogen Energy, 43 (2018) 4866-4879.

[10] X. Wang, G. Liu, G.Q. Lu, H.M. Cheng, Stable photocatalytic hydrogen evolution from water over ZnO-CdS core-shell nanorods, International Journal of Hydrogen Energy, 35 (2010) 8199-8205.

[11] Z. Liu, H. Bai, S. Xu, D.D. Sun, Hierarchical CuO/ZnO "corn-like" architecture for photocatalytic hydrogen generation, International Journal of Hydrogen Energy, 36 (2011) 13473-13480.

[12] T.F. Hou, A. Shanmugasundaram, M.A. Hassan, M.A. Johar, S.W. Ryu, D.W. Lee, ZnO/Cu₂O-decorated rGO: Heterojunction photoelectrode with improved solar water splitting performance, International Journal of Hydrogen Energy, (2019) 19177-19192.

[13] P. Gomathisankar, K. Hachisuka, H. Katsumata, T. Suzuki, K. Funasaka, S. Kaneco, Photocatalytic hydrogen production with CuS/ZnO from aqueous Na₂S + Na₂SO₃ solution, International Journal of Hydrogen Energy, 38 (2013) 8625-8630.

[14] Y.C. Chang, C.L. Tasi, F.H. Ko, Construction of ZnIn₂S₄/ZnO heterostructures with enhanced photocatalytic decomposition and hydrogen evolution under blue LED irradiation, International Journal of Hydrogen Energy, 46 (2021) 10281-10292.

[15] D. Kim, K. Yong, Boron doping induced charge transfer switching of a C₃N₄/ZnO photocatalyst from Z-scheme to type II to enhance photocatalytic hydrogen production, Applied Catalysis B: Environmental, 282 (2021) 119538.

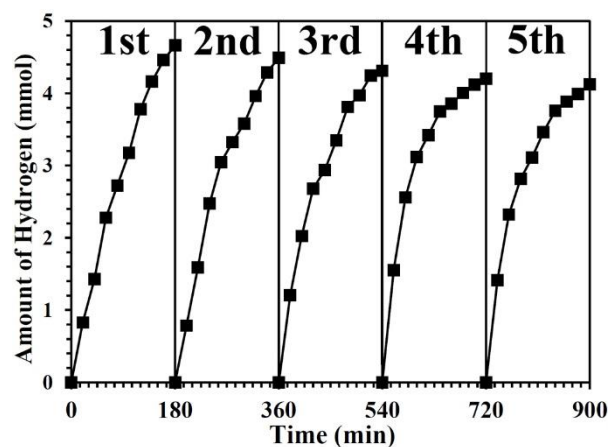
[16] Z. Li, D. Jin, Z. Wang, ZnO/CdSe-diethylenetriamine nanocomposite as a step-scheme photocatalyst for photocatalytic hydrogen evolution, Applied Surface Science, 529 (2020) 147071.

[17] S. Chu, Y. Hu, J. Zhang, Z. Cui, J. Shi, Y. Wang, Z. Zou, Constructing direct Z-scheme CuO/PI heterojunction for photocatalytic hydrogen evolution from water under solar driven, International Journal of Hydrogen Energy, 46 (2021) 9064-9076.

[18] L. Sun, Y. Zhuang, Y. Yuan, W. Zhan, X.J. Wang, X. Han, Y. Zhao, Nitrogen-Doped Carbon-Coated CuO-In₂O₃ p-n Heterojunction for Remarkable Photocatalytic Hydrogen Evolution, Advanced Energy Materials, 9 (2019) 1902839.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه نانوکامپوزیت ZnO-CuO حاوی ۲۰ درصد وزنی اکسید مس، از نانوميله های ZnO و نانوذره های CuO با روش هیدروترمال تهیه گردید و برای اولین بار به عنوان فوتوکاتالیست برای تولید هیدروژن تحت تابش نور خورشید مورد استفاده قرار گرفت. بلورینگی، شکل و اندازه ذرات، خواص اپتیکی نانوکامپوزیت تهیه شده با آنالیزهای XRD, FESEM, PL, DRS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که نانوکامپوزیت به صورت موفق تهیه شده و در مقایسه با ZnO و CuO دارای عملکرد فوتوکاتالیستی بهتری برای تولید هیدروژن میباشد که دلیل آن میتواند بهبود خواص اپتیکی (افزایش قابلیت جذب نور مرئی) و کاهش باز ترکیب الکترون و حفره باشد.



شکل ۶- بررسی میزان پایداری فوتوکاتالیست ZnO-20CuO در شرایط آزمایش بعد از چندین بار بازیافت.

مراجع

- [1] F. Barbir, T.N. Veziroğlu, H.J. Plass Jr, Environmental damage due to fossil fuels use, International Journal of Hydrogen Energy, 15 (1990) 739-749.
- [2] D. Xing, Y. Liu, P. Zhou, Z. Wang, P. Wang, Z. Zheng, X. Zhang, X. Qin, Y. Dai, B. Huang, Enhanced photocatalytic hydrogen evolution of CdWO₄ through polar organic molecule modification, International Journal of Hydrogen Energy, 44 (2019) 4754-4763.
- [3] Y. Zhao, Y. Guo, J. Li, P. Li, Efficient hydrogen evolution with ZnO/SrTiO₃ S-scheme heterojunction photocatalyst sensitized by Eosin Y, International Journal of Hydrogen Energy, 46 (2021) 18922-18935.
- [4] D. Popugaeva, T. Tian, A.K. Ray, Hydrogen production from aqueous triethanolamine solution using Eosin Y-sensitized ZnO photocatalyst doped with platinum, International Journal of Hydrogen Energy, 45 (2020) 11097-11107.
- [5] T. Hisatomi, K. Domen, Reaction systems for solar hydrogen production via water splitting with particulate semiconductor photocatalysts, Nature Catalysis, 2 (2019) 387-399.
- [6] Y. Zhao, Y. He, D.B. Xiong, W. Ran, Z. Liu, F. Gao, Dual template synthesis and photoelectrochemical

ACEC2021-49420

عملکرد فصلی سامانه CIGS دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان در شرایط محیطی مختلف

میلاذ مالکی مقدم^۱، علیرضا شمسی^۲، مجتبی رحیمی^۳، سید محمدباقر مرعشی^۴

^۱ دانشجو، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان؛ malekimilad94@gmail.com

^۲ عضو هیات علمی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان؛ shamsi@vru.ac.ir

^۳ عضو هیات علمی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان؛ m_rahimi@vru.ac.ir

^۴ عضو هیات علمی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان؛ smb_marashi@yahoo.com

چکیده

پنل‌های خورشیدی نانوساختار CIGS دارای مزایای فراوان نسبت به پنل‌های رایج سیلیکون جهت استفاده در مناطق مختلف ایران می‌باشند. در این مقاله عملکرد فصلی این پنل‌ها در مقایسه با پنل‌های سیلیکونی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در تمامی فصول سال انرژی تولیدی متوسط روزانه هر کیلووات این پنل‌ها بیشتر از ۵ کیلووات ساعت بوده و نسبت به پنل‌های سیلیکونی برتری دارند. همچنین کاهش بازدهی توان تولیدی این پنل‌ها، ناشی از افزایش دما به مراتب کمتر از پنل‌های سیلیکونی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سامانه فوتوولتائیک، پنل CIGS، عملکرد فصلی.

مقدمه

افزایش تقاضا برای انرژی و نگرانی‌های فزاینده برای محیط زیست منجر به نیاز فوری به انرژی‌های تجدیدپذیر شده است [۱]. رشد سریع تقاضای انرژی در سراسر جهان و مسائل زیست محیطی مرتبط باعث می‌شود مردم به طور فزاینده‌ای بر برداشت انرژی از خورشید تمرکز کنند [۲]. بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برای تولید برق با استفاده از سلول‌های فوتوولتائیک به عنوان اثر فوتوولتائیک شناخته می‌شود. محبوب‌ترین فناوری‌های پنل فوتوولتائیک را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم کرد، اولی فناوری‌های کریستالی (که شامل تک کریستالی (Mono C-Si)، پلی کریستالی (Poly C-Si)، نیمه هادی‌های گروه III-V و سیلیکون نواری است) و دومی فناوری‌های لایه نازک (که شامل گالیوم سولنید مس ایندیم (CIGS)، کادمیوم تلوراید (CdTe) و سیلیکون لایه نازک آمورف (a-Si) است) [۳].

تاکنون فناوری فوتوولتائیک کریستالی در اولویت بوده است، در حالی که فناوری لایه نازک مانند CIGS توجه همگان را به خود جلب نموده و دارای محبوبیت شده است. علاوه بر این، فناوری لایه نازک

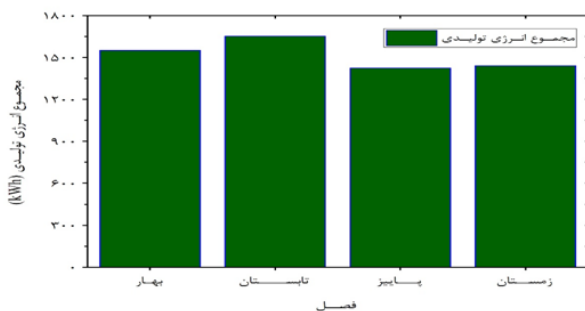
CIGS به دلیل ضریب دمایی پایین آن برای کاربردهای پنل فوتوولتائیک در گرمای شدید مناسب‌تر است. CIGS همچنین انرژی بیشتری نسبت به فناوری‌های کریستالی در مناطق نیمه سایه یا در شرایط کم نور تولید می‌کند زیرا آن‌ها نور را به طور متفاوتی جذب می‌کنند. برای کاربرد در مناطق گرمسیری، ضرایب دمایی بهتر CIGS ممکن است نسبت به پنل‌های فوتوولتائیک سیلیکونی برتری داشته باشد [۴-۶]. از آنجایی که بخش‌های با طول موج بزرگ نور خورشید توسط ساختارهای چند اتصال جذب می‌شوند و این سلول‌های خورشیدی بازده بالاتری دارند، CGS، CIGS و سیلیکون آمورف مواد نیمه هادی ارزان قیمتی هستند که می‌توانند در ساختارهای سلول خورشیدی استفاده شوند. یک لایه CIGS دارای یک گاف انرژی قابل تنظیم است که نیمه هادی CIGS را به انتخاب مناسب برای طراحی سلول خورشیدی تبدیل کرده است [۷]. بنابراین محققان برای برآوردن نیاز همیشگی سه عامل اصلی (یعنی هزینه، کارایی و طول عمر)، در چند دهه اخیر سخت روی مواد مختلف کار می‌کنند. CIGS به دلیل راندمان تبدیل بالا، پایداری بالا، هزینه کم و شکاف باند قابل تنظیم، نامزد امیدوارکننده‌ای برای سلول‌های خورشیدی مواد لایه نازک بوده است [۸-۹].

مزیت این نسل استفاده کمتر از مواد نیمه‌رسانا است. همچنین فناوری فرآیندهای تولید سلول فوتوولتائیک توسط لایه نازک پیچیدگی کمتری دارند و انرژی کمتری مصرف می‌کنند و بنابراین هزینه آن‌ها کمتر است. ماژول‌های لایه نازک به طور تجاری در چندین فناوری استفاده می‌شوند، مانند CdTe، CIGS و سیلیکون آمورف. در چند سال اخیر، یک پیشرفت بزرگ فناوری فیلم نازک مشاهده شده است [۱۰]. با این حال، راندمان تبدیل توان و سایر پارامترهای فوتوولتائیک ثابت نیستند. آنها به شدت تحت تأثیر دما و روشنایی هستند. افزایش دما باعث کاهش فاصله گاف نواری یک نیمه هادی می‌شود و در نتیجه پارامترهای الکتریکی آن را تغییر می‌دهد. بسته به نوع ماژول تلفات توان با افزایش دما ممکن است

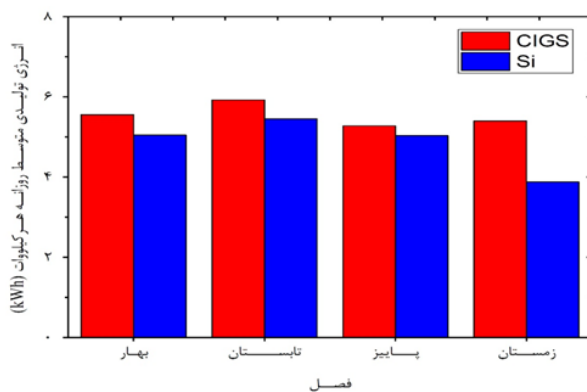
عملکرد فصلی سامانه ۳ کیلوواتی CIGS

بررسی عملکرد فصلی سامانه مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشینه انرژی تولیدی به میزان $1652,023 \text{ kWh}$ مربوط به تابستان که فصل گرم سال است و کمینه انرژی تولیدی به میزان $1423,933 \text{ kWh}$ مربوط به پاییز است که فصل سرد سال می‌باشد.

همچنین مقایسه انرژی تولیدی توسط پنل‌های سیلیکونی نصب شده در همان محل با پنل‌های CIGS در شکل ۳ نشان دهنده برتری پنل‌های CIGS نسبت به پنل‌های سیلیکونی است. به دلیل ظرفیت‌های متفاوت پنل‌های CIGS و سیلیکونی و مقایسه انرژی آن‌ها، انرژی به صورت متوسط روزانه هر کیلووات محاسبه شده است. انرژی تولیدی متوسط روزانه پنل‌های CIGS در تمامی فصول سال از پنل‌های سیلیکونی بیشتر است. همانگونه که در نمودار شکل ۲ مشخص است، انرژی تولیدی متوسط روزانه هر کیلووات پنل CIGS در فصول مختلف بیش از ۵ کیلووات ساعت می‌باشد به طوری که در فصل تابستان به ۶ کیلووات ساعت نیز می‌رسد.



شکل ۲. انرژی کل تولیدی پنل‌های CIGS در هر فصل



شکل ۳. نمودار انرژی تولیدی متوسط روزانه هر کیلووات پنل CIGS و سیلیکونی در هر فصل

بیشتر یا کمتر باشد. بنابراین لازم است بدانیم که عملکرد سلول چگونه با تغییر این پارامترها تغییر می‌کند [۱۱]. فناوری لایه نازک مزایای بیشتری را به عنوان کاهش شدید هزینه مواد در مقایسه با هزینه‌های ویفرهای سیلیکونی مورد نیاز معرفی می‌کند و همچنین سلول‌های فوتوولتائیک خورشیدی لایه نازک دارای ضریب دمای کمی هستند [۱۲]. مزایای کلیدی CIGS در مقایسه با دستگاه‌های سیلیکونی کریستالی شامل وابستگی دمای جاذب، زمان بازگشت انرژی کوتاه و پیش‌بینی هزینه‌ها سودمند است: به دلیل کاهش مقدار مواد مورد نیاز برای سلول‌های خورشیدی لایه نازک و امکان استفاده از تکنیک‌های تولید کم هزینه، کاهش هزینه‌ها به دلیل افزایش تولید بیشتر پیش‌بینی می‌شود [۱۳].

سامانه ۳ کیلوواتی CIGS دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان

این نوع سلول‌ها، دومین نسل از سلول‌های خورشیدی هستند که برای نخستین بار در کشور نصب شده‌اند. پس از انتخاب مکان، تعداد ۲۴ عدد پنل ۱۲۵ واتی CIGS ساخت شرکت سولبرو^۱ هلند در ۳ ردیف ۸ تایی به ظرفیت کل ۳ کیلووات بر روی سازه‌های متغیر فصلی با امکان تغییر زاویه، نصب گردید (شکل ۱). برق تولیدی سامانه توسط اینورتر ۵ کیلوواتی ساخت شرکت فرونیوس^۲ به شبکه سراسری برق متصل گردید. اینورتر این سامانه، اطلاعاتی از قبیل توان تولیدی، انرژی روزانه دریافتی، انرژی کل دریافتی، شدت تابش مستقیم خورشید، دمای پنل، دمای محیط و سرعت باد را به همراه مشخصات ولتاژ و جریان سیستم در هر ۵ دقیقه یکبار ثبت و ذخیره می‌کند.



شکل ۱. سامانه ۳ کیلوواتی فوتوولتائیک CIGS متصل به شبکه دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان.

^۱ Solibro

^۲ Fronius

سرد سال اتفاق می‌افتد. در تیر ماه دمای سطح سلول خورشیدی CIGS حداکثر به ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و دمای ماژول با شدت تابش، افزایش می‌یابد. با شروع از آبان ماه هنگامی که حداکثر تابش حدود 1093 W/m^2 است، افزایش تابش به همراه افزایش دمای ماژول مشاهده می‌شود. از طرفی شدت تابش بالا منجر به افزایش دمای ماژول به خاطر افزایش دمای محیط و حرارت مستقیم سطح ماژول‌ها می‌شود و این افزایش درجه حرارت ماژول‌ها عاملی برای کاهش بازدهی است که با وجود افزایش شدت تابش، بازدهی کاهش داشته است.

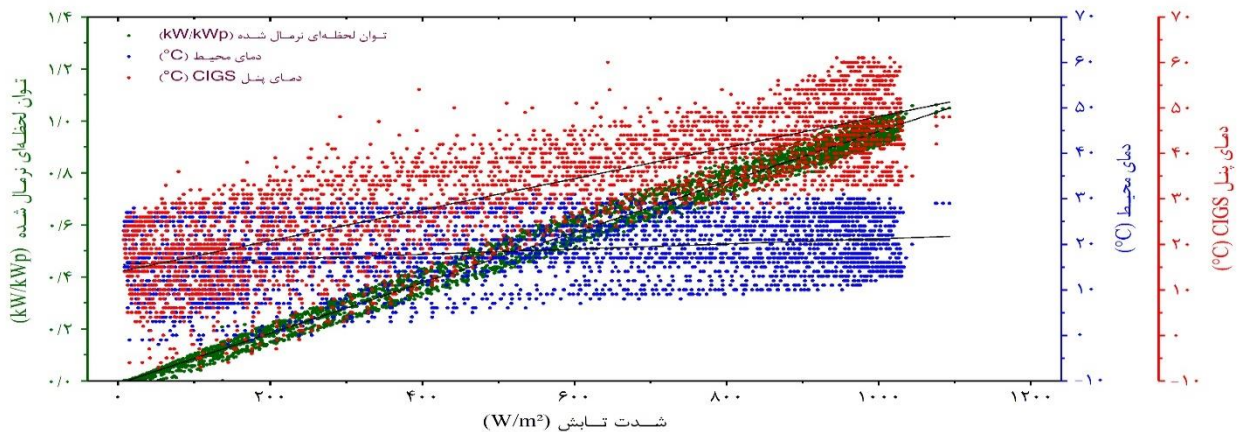
در جداول ۱ تا ۹ عدد پیرسون و ضریب تعیین مربوط به هر ماه برای توان لحظه‌ای نرمال شده، دمای محیط و دمای پنل نمایش داده شده است. عدد پیرسون، همبستگی دو متغیر و ضریب تعیین، احتمال همبستگی میان متغیر وابسته و متغیر مستقل را نشان می‌دهد که در ماه‌های گرم سال، بیشینه و در ماه‌های سرد سال کمینه شده‌اند.

بررسی تغییرات توان تولیدی پنل‌های CIGS در شرایط مختلف دمایی

با توجه به اینکه دمای پنل‌های خورشیدی مختلف بر روی عملکرد پنل‌ها تأثیر مستقیم دارد و این یکی از عوامل مؤثر و مهم بر کاهش انرژی تولیدی پنل‌ها در روزهای گرم مناطق کویری می‌باشد. در ادامه به بررسی عملکرد توان تولیدی CIGS و همچنین تغییرات دمای محیط و پنل در شدت‌های مختلف پرداخته می‌شود.

منحنی تغییرات توان لحظه‌ای، دمای محیط و دمای پنل بر حسب شدت تابش (از آبان ماه ۹۸ تا تیر ماه ۹۹) در شکل‌های ۴ تا ۱۲ ترسیم شده است. توان لحظه‌ای نرمال شده از تقسیم توان لحظه‌ای بر توان اسمی دستگاه در هر لحظه به دست می‌آید.

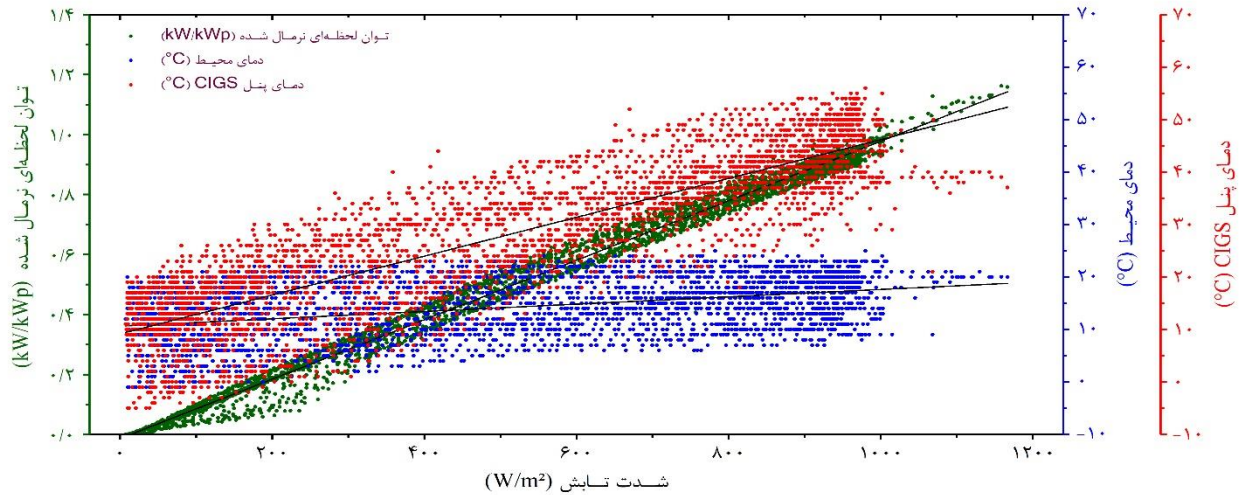
با توجه به نمودارها و جداول مربوطه، مشخص است که توان لحظه‌ای تولیدی سامانه و دمای پنل با دقت بسیار بالایی وابستگی خطی با شدت تابش لحظه‌ای خورشید دارد. اما در مورد دمای محیط این وابستگی به مراتب کمتر است. نکته قابل توجه پیشی گرفتن توان تولیدی سامانه از توان نامی آن است که دلیل این امر شدت تابش بیش از 1000 W/cm^2 در بعضی از زمان‌ها می‌باشد. همچنین با توجه به نمودارهای رسم شده، تفاوت آشکاری بین ماه‌های گرم و



شکل ۴. نمودار توان لحظه‌ای نرمال شده، دمای محیط و پنل CIGS آبان ماه بر حسب شدت تابش.

جدول ۱: اطلاعات آماری ناشی از برازش منحنی شکل ۴ (۳۷۰۸ نقطه).

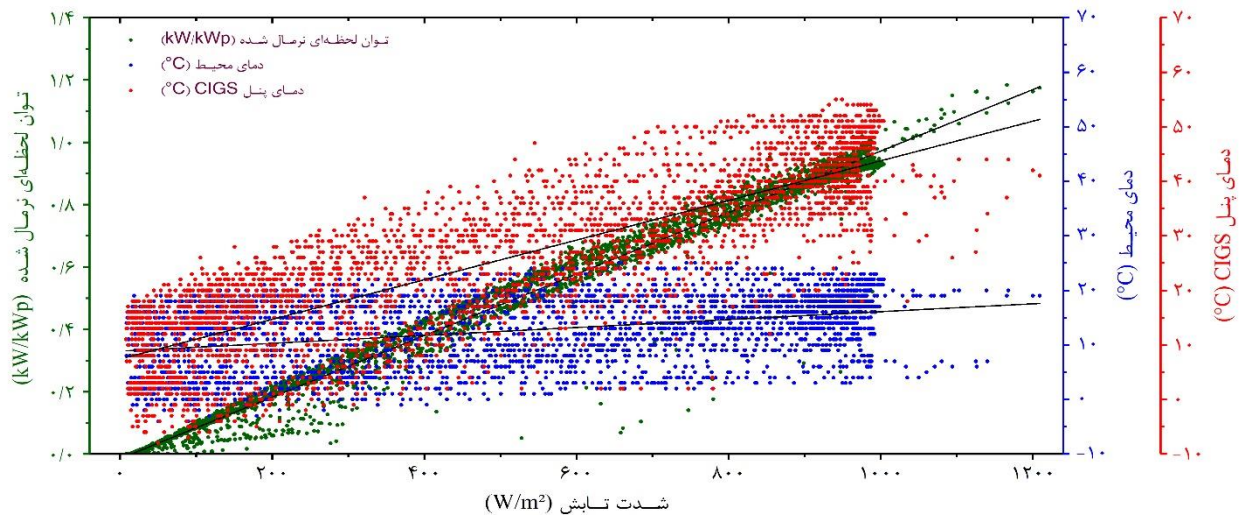
| آبان ماه | توان لحظه‌ای نرمال شده | دمای محیط | دمای پنل CIGS |
|------------|------------------------|-----------|---------------|
| عدد پیرسون | ۰٫۹۹۵۳۳ | ۰٫۲۸۳۱۲ | ۰٫۸۲۸۹۹ |
| ضریب تعیین | ۰٫۹۹۰۶۸ | ۰٫۰۸۰۱۶ | ۰٫۶۸۷۲۲ |



شکل ۵. نمودار توان لحظه‌ای نرمال شده، دمای محیط و پنل CIGS آذر ماه بر حسب شدت تابش

جدول ۲: اطلاعات آماری ناشی از برازش منحنی شکل ۵ (۳۵۵۹ نقطه).

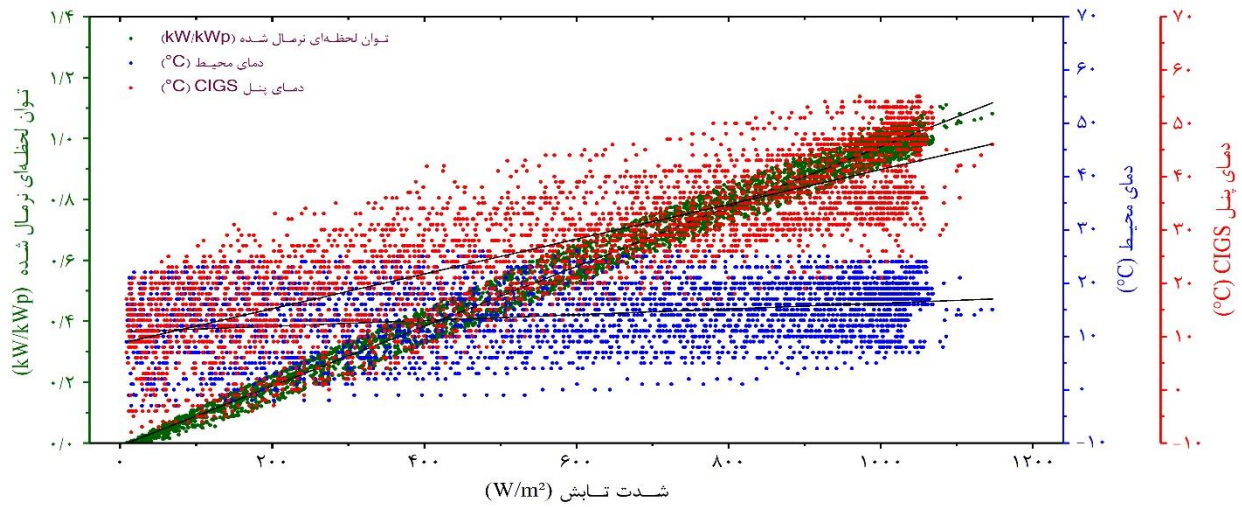
| آذر ماه | توان لحظه‌ای نرمال شده | دمای محیط | دمای پنل CIGS |
|------------|------------------------|-----------|---------------|
| عدد پیرسون | ۰٫۹۹۵۸۲ | ۰٫۴۲۲۴۶ | ۰٫۸۷۲۴۳ |
| ضریب تعیین | ۰٫۹۹۱۶۵ | ۰٫۱۷۸۴۷ | ۰٫۷۶۱۱۳ |



شکل ۶. نمودار توان لحظه‌ای نرمال شده، دمای محیط و پنل CIGS دی ماه بر حسب شدت تابش

جدول ۳: اطلاعات آماری ناشی از برازش منحنی شکل ۶ (۳۴۳۱ نقطه).

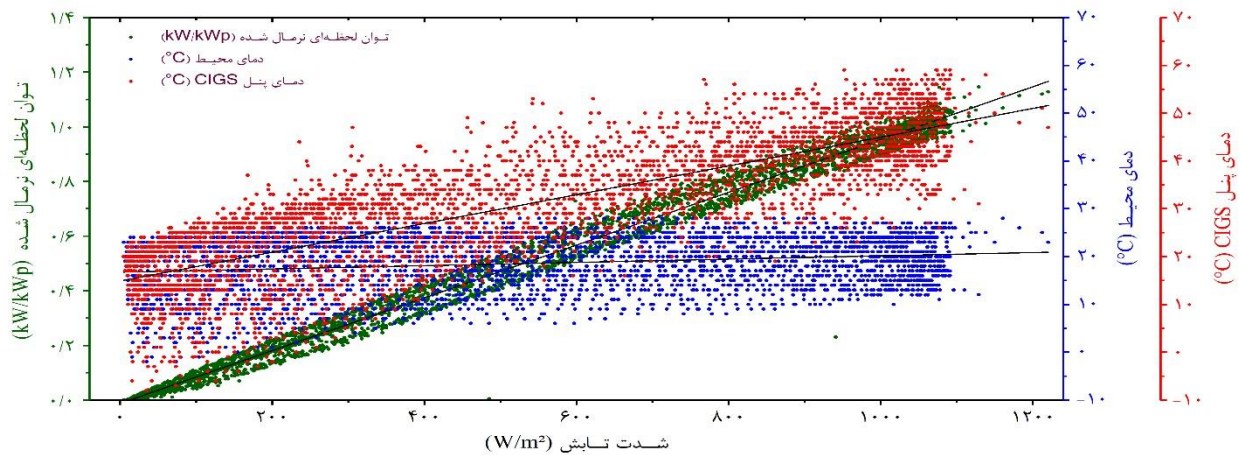
| دی ماه | توان لحظه‌ای نرمال شده | دمای محیط | دمای پنل CIGS |
|------------|------------------------|-----------|---------------|
| عدد پیرسون | ۰٫۹۸۹۲۴ | ۰٫۳۸۳۹۵ | ۰٫۸۳۶۵۳ |
| ضریب تعیین | ۰٫۹۷۸۶ | ۰٫۱۴۷۴۱ | ۰٫۶۹۹۷۸ |



شکل ۷. نمودار توان لحظه‌ای نرمال شده، دمای محیط و پنل CIGS بهمن ماه بر حسب میزان شدت

جدول ۴: اطلاعات آماری ناشی از برازش منحنی شکل ۷ (۳۷۸۰ نقطه).

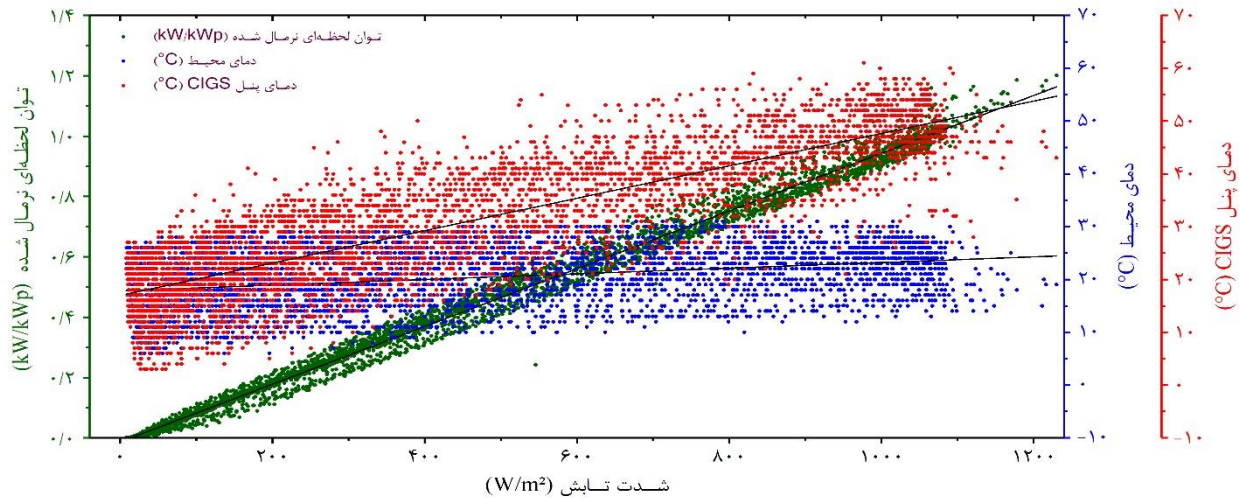
| بهمن ماه | توان لحظه‌ای نرمال شده | دمای محیط | دمای پنل CIGS |
|------------|------------------------|-----------|---------------|
| عدد پیرسون | ۰٫۹۹۴۸۶ | ۰٫۳۰۳۳۷ | ۰٫۸۲۷۸ |
| ضریب تعیین | ۰٫۹۸۹۷۴ | ۰٫۰۹۲۰۴ | ۰٫۶۸۵۲۵ |



شکل ۸. نمودار توان لحظه‌ای نرمال شده، دمای محیط و پنل CIGS اسفند ماه بر حسب شدت تابش

جدول ۵: اطلاعات آماری ناشی از برازش منحنی شکل ۸ (۳۸۵۷ نقطه).

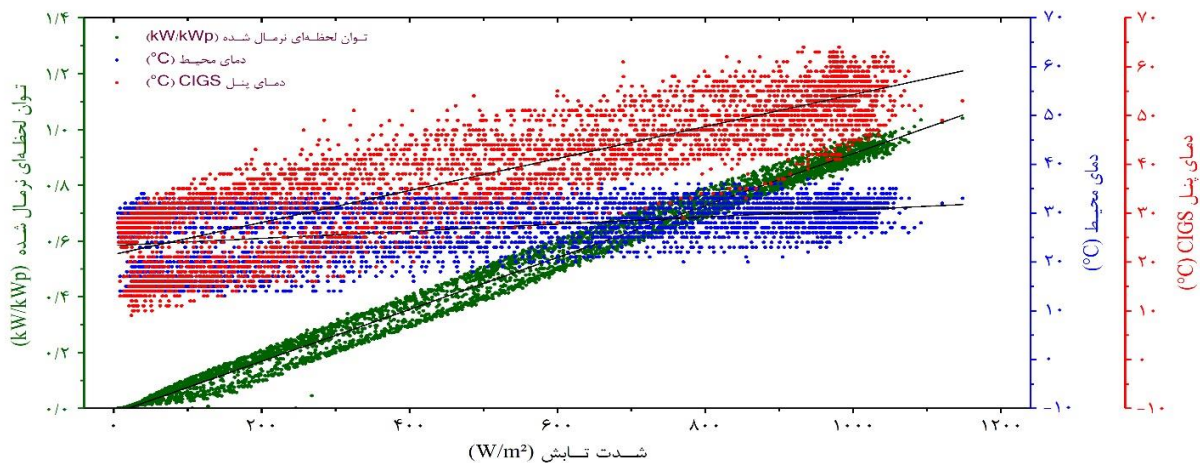
| اسفند ماه | توان لحظه‌ای نرمال شده | دمای محیط | دمای پنل CIGS |
|------------|------------------------|-----------|---------------|
| عدد پیرسون | ۰٫۹۹۴۱۳ | ۰٫۲۱۸۸ | ۰٫۸۱۸۹۱ |
| ضریب تعیین | ۰٫۹۸۸۳ | ۰٫۰۴۷۸۷ | ۰٫۶۷۰۶۱ |



شکل ۹. نمودار توان لحظه‌ای نرمال شده، دمای محیط و پنل CIGS فروردین ماه بر حسب شدت تابش

جدول ۶: اطلاعات آماری ناشی از برازش منحنی شکل ۹ (۴۳۷۹ نقطه).

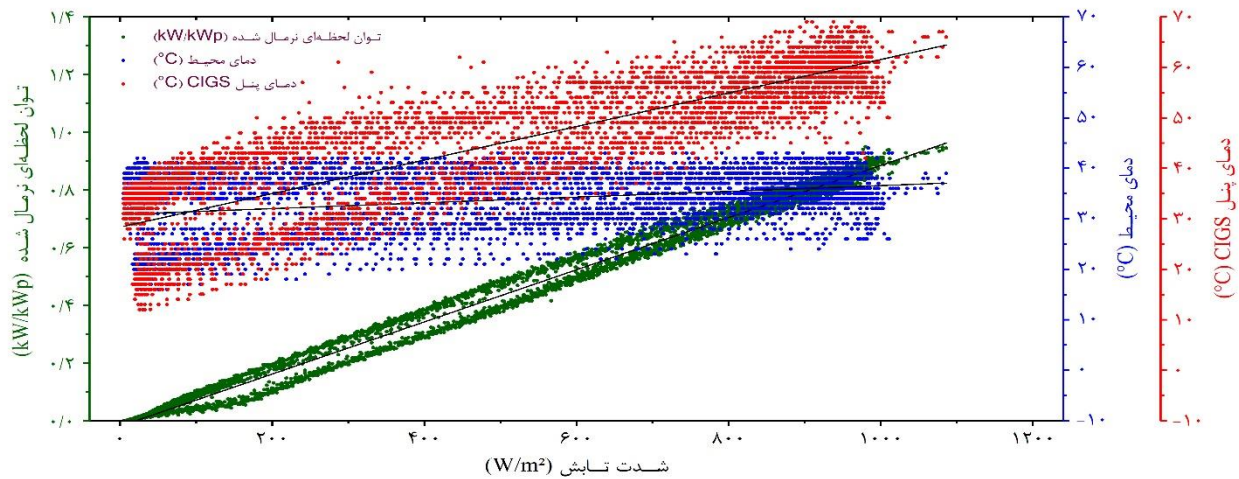
| فروردین ماه | توان لحظه‌ای نرمال شده | دمای محیط | دمای پنل CIGS |
|-------------|------------------------|-----------|---------------|
| عدد پیرسون | ۰٫۹۹۶۰۶ | ۰٫۳۴۳۵۹ | ۰٫۸۴۶۲۵ |
| ضریب تعیین | ۰٫۹۹۲۱۳ | ۰٫۱۱۸۰۵ | ۰٫۷۱۶۱۳ |



شکل ۱۰. نمودار توان لحظه‌ای نرمال شده، دمای محیط و پنل CIGS اردیبهشت ماه بر حسب شدت تابش

جدول ۷: اطلاعات آماری ناشی از برازش منحنی شکل ۱۰ (۴۷۱۷ نقطه).

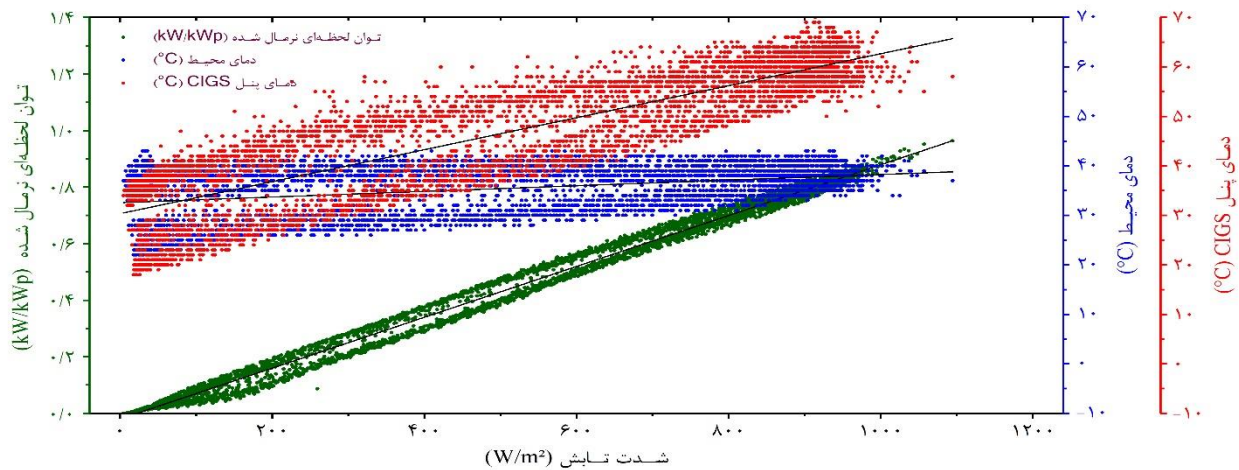
| اردیبهشت ماه ۹۹ | توان لحظه‌ای نرمال شده | دمای محیط | دمای پنل CIGS |
|-----------------|------------------------|-----------|---------------|
| عدد پیرسون | ۰٫۹۹۵۳۸ | ۰٫۴۷۱۳ | ۰٫۸۷۶۲۸ |
| ضریب تعیین | ۰٫۹۹۰۷۸ | ۰٫۲۲۲۱۳ | ۰٫۷۶۷۸۷ |



شکل ۱۱. نمودار توان لحظه‌ای نرمال شده، دمای محیط و پنل CIGS خرداد ماه بر حسب شدت تابش

جدول ۸: اطلاعات آماری ناشی از برازش منحنی شکل ۱۱ (۴۹۶۸ نقطه).

| خرداد ماه | توان لحظه‌ای نرمال شده | دمای محیط | دمای پنل CIGS |
|------------|------------------------|-----------|---------------|
| عدد پیرسون | ۰٫۹۹۵۰۳ | ۰٫۳۳۲۸۲ | ۰٫۸۵۳۳۳ |
| ضریب تعیین | ۰٫۹۹۰۰۹ | ۰٫۱۱۰۷۷ | ۰٫۷۲۸۱۸ |



شکل ۱۲. نمودار توان لحظه‌ای نرمال شده، دمای محیط و پنل CIGS تیر ماه بر حسب شدت تابش

جدول ۹: اطلاعات آماری ناشی از برازش منحنی شکل ۱۲ (۴۹۳۱ نقطه).

| تیر ماه | توان لحظه‌ای نرمال شده | دمای محیط | دمای پنل CIGS |
|------------|------------------------|-----------|---------------|
| عدد پیرسون | ۰٫۹۹۶۱۹ | ۰٫۳۸۴۷۵ | ۰٫۸۶۶۰۷ |
| ضریب تعیین | ۰٫۹۹۲۳۹ | ۰٫۱۴۸۰۳ | ۰٫۷۵۰۰۸ |

- evaluation of crystalline-silicon and thin-film photovoltaic modules". *Microelectronics Reliability*, 88, pp. 1014-1018.
- [5] ZinBer, B., Makrides, G., Schubert, M., Georghiou, G. E., and Werner, J. H., 2009. "Temperature and irradiance effects on outdoor field performance". In *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 4083-4086.
- [6] Friesen, G., Chianese, D., Dittmann, S., Dominé, D., Burà, E., Strepparava, D., Margni, B., Denicolà, M., Meoli, R., and Pola, I., 2010 "Performance intercomparison of 13 different PV modules based on indoor and outdoor tests". In *25th european photovoltaic solar energy conference*, pp. 3779 – 3784.
- [7] Soheili, A., Hayati, M., and Shama, F., 2020. "An optimized efficient double junction CGS/CIGS solar cell with improved performance". *Optik*, 222, pp. 165461.
- [8] Bouabdelli, M.W., Rogti, F., Lakhdar, N., Maache, M., 2020. "Theoretical investigation on improvement of CIGS-based solar cells". *J. Nano Electron. Phys*, 12(3).
- [9] Schmid, M., 2017. "Review on light management by nanostructures in chalcopyrite solar cells" *Semiconductor Science and Technology*, 32(4), pp. 043003.
- [10] Krc, J., 2013. *Optical modeling and simulation of thin-film photovoltaic devices*. Crc Press.
- [11] Kurnik, J., Jankovec, M., Brecl, K., and Topic, M., 2011. "Outdoor testing of PV module temperature and performance under different mounting and operational conditions". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(1), pp. 373-376.
- [12] Emery, K., Hishikawa, Y., and Warta., W. D., 2012. "Solar cell efficiency tables (version 39)". *Progress in photovoltaics: research and applications*, 20(1).
- [13] Feurer, T., Reinhard, P., Avancini, E., Bissig, B., Löckinger, J., Fuchs, P., Carron, R., Weiss, T.P., Perrenoud, J., Stutterheim, S., and Buecheler, S, 2017. "Progress in thin film CIGS photovoltaics—Research and development, manufacturing, and applications". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(7), pp. 645-667.

بحث و نتیجه گیری

بررسی داده‌ها و نتایج سامانه فوتوولتائیک متصل به شبکه CIGS دانشگاه ولی عصر رفسنجان (عج) نشان می‌دهد که این سامانه در بازه یک سال کارکرد (با در نظر گرفتن خاموشی ناشی از مشکلات شبکه برق دانشگاه در طول یک سال) 6067.23 kWh (بیش از 5.5 kWh به ازای هر کیلووات پنل در طول یک روز) برق به شبکه تزریق کرده است. بیشینه و کمینه میزان آن به ترتیب در تابستان و پاییز به میزان 16527.23 kWh و 14237.933 kWh بوده است. از مقایسه نمودار انرژی تولیدی متوسط روزانه هر کیلووات پنل CIGS و سیلیکونی می‌توان به عملکرد بهتر پنل CIGS نسبت به پنل سیلیکونی در منطقه کویری رفسنجان پی برد.

بررسی نمودار تغییرات توان تولیدی پنل‌های CIGS در شرایط مختلف دمایی با توجه به برازش منحنی‌های صورت گرفته، نشان می‌دهد که توان تولیدی وابستگی خیلی بالایی به شدت تابش نور خورشید دارد و همین وابستگی تا حدودی برای دمای پنل نیز صدق می‌کند اما دمای محیط وابستگی چندانی به شدت تابش ندارد.

تشکر و قدردانی

از همکاری شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان و دانشگاه ولی عصر(عج) در جهت حمایت مالی و معنوی از این پژوهش قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Deng, X., and Lv, T., 2020. "Power system planning with increasing variable renewable energy: A review of optimization models". *Journal of Cleaner Production*, 246, pp. 118962.
- [2] Ginley, D. S., and Cahen, D., (Eds.), 2011. *Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability*. Cambridge university press.
- [3] Schilling, M. A., and Esmundo, M., 2009. "Technology S-curves in renewable energy alternatives: Analysis and implications for industry and government". *Energy policy*, 37(5), pp. 1767-1781.
- [4] Ahsan, S., Niazi, K. A. K., Khan, H. A., and Yang, Y., (2018). "Hotspots and performance

ACEC2021-50183

بررسی و مقایسه اثر زاویه نصب بر عملکرد کلکتور صفحه تخت و لوله خلاء در شرایط اقلیمی شهر کرمان

هادی فرزنان^۱

^۱استادیار، مجتمع آموزش عالی بم، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، آدرس پست الکترونیکی: hadi.farzan@bam.ac.ir

چکیده

آبگرمکن‌های خورشیدی یکی از پرکاربردترین سیستم‌های استفاده از انرژی خورشید هستند. این سیستم‌ها زمانی بالاترین راندمان خود را خواهند داشت که در شیب بهینه نصب شوند و البته این امر به پارامترهای مختلف از جمله موقعیت جغرافیایی بستگی دارد. پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر زاویه نصب کلکتورهای صفحه تخت و لوله خلاء بر راندمان سالیانه و انرژی حرارتی جذب شده در شرایط اقلیمی شهر کرمان می‌پردازد. برای این منظور برای زوایای نصب 25° ، 30° و 35° دو کلکتور صفحه تخت و لوله خلاء با مساحت یکسان ۲ متر مربع در نرم افزار TSOL مدل‌سازی شده‌اند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد، بالاترین راندمان و بیشترین مقدار انرژی جذب شده در زاویه برابر عرض جغرافیایی حاصل می‌شود. **واژه‌های کلیدی:** راندمان حرارتی، کلکتور لوله خلاء، کلکتور صفحه تخت، آبگرمکن خورشیدی، زاویه نصب

مقدمه

انرژی خورشیدی به عنوان پاک‌ترین، ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین انرژی خدادادی شناخته شده است؛ بنابراین استفاده از علم و تکنولوژی برای بهره برداری هرچه بهتر از این موهبت الهی، قابل اهمیت است. کلکتورهای صفحه تخت حرارتی، ساده‌ترین و پرکاربردترین وسیله برای جمع آوری انرژی خورشیدی و تأمین انرژی گرمایی هستند. این کلکتورها یک مبدل حرارتی‌اند و تبادل حرارت به صورت تشعشع بین خورشید با سیال جاری در لوله‌های کلکتور صورت می‌گیرد. مزیت اصلی کلکتورهای تخت، اعم از حرارتی یا الکتریکی، دریافت انرژی با هزینه ای کم است. با وجود این، متأسفانه تمامی انرژی تشعشعی برخوردی به کلکتورها جذب نمی‌شود. این موضوع و بهینه‌سازی سیستم‌های خورشیدی، هدف تحقیق بسیاری از محققان انرژی خورشیدی از گذشته تاکنون بوده است. برای افزایش تشعشع دریافتی از خورشید روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها است

افزایش سطح کلکتور است. برای این کار کلکتورهای با مساحت بیشتر استفاده شود که باعث افزایش هزینه می‌شود. یک راهکار دیگر، تغییر زاویه شیب کلکتور به دلیل تغییر موقعیت خورشید در آسمان و شرایط تابش خورشید در روزها، ماه‌ها و فصل‌های مختلف است. همچنین از آنجا که ضریب جذب کلکتورها وابسته به جهت تشعشع ورودی است، هرچه قرارگیری کلکتور از این لحاظ مناسبتر باشد، علاوه بر اینکه تشعشع خورشیدی ورودی به کلکتور بیشتر می‌شود، سهم بیشتری نیز جذب می‌شود. در یکی از روش‌ها تنظیم زوایای قرارگیری کلکتور با استفاده از سیستم‌های تعقیب کننده خورشید انجام می‌شود. در این روش، کلکتور با تنظیم پیوسته هم‌زمان حول چند محور می‌چرخد تا زاویه بین عمود بر سطح آن و راستای ورود تشعشع خورشیدی مستقیم همیشه کمترین مقدار باشد. روش دیگری که برای کلکتورهای واقع در نیمکره شمالی توصیه می‌شود، تنظیم زاویه کلکتور با چرخاندن آن فقط حول محور شرقی غربی برای قرار دادن آن به سمت جنوب است. این زاویه که به زاویه شیب کلکتور معروف است، برای یک بازه زمانی که می‌تواند بین یک دقیقه تا یک سال باشد، ثابت می‌ماند و تنظیم می‌تواند دستی یا اتوماتیک باشد. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی تخت، برای نقاط مختلف جهان انجام شده است. الکسانی [۱] به مطالعه زاویه بهینه کلکتور خورشیدی، برای تنظیم روزانه و ماهیانه در عرض‌های جغرافیایی بین صفر تا 60° در نیمکره شمالی پرداخت. وی با استفاده از روش حداقل مربعات، چهار رابطه تجربی را برای محاسبه زاویه بهینه در هر ماه به دست آورد. سلیمان [۲] همین مطالعه را با استفاده از یک روش تئوری ساده انجام داد. نیجگورودو و همکاران [۳] تعدادی رابطه تجربی برای تنظیم ماهیانه و بهینه زاویه شیب کلکتور در محدوده عرض جغرافیایی بین 60° تا 60° ارائه نمودند. مورکوس [۴] با استفاده از یک مدل ریاضی برای محاسبه تشعشع کل روی سطح شیب دار، به تعیین زاویه بهینه شیب برای کلکتور تخت و زوایای بهینه شیب و سمت برای کلکتور از نوع متمرکزکننده، در منطقه آسیوت

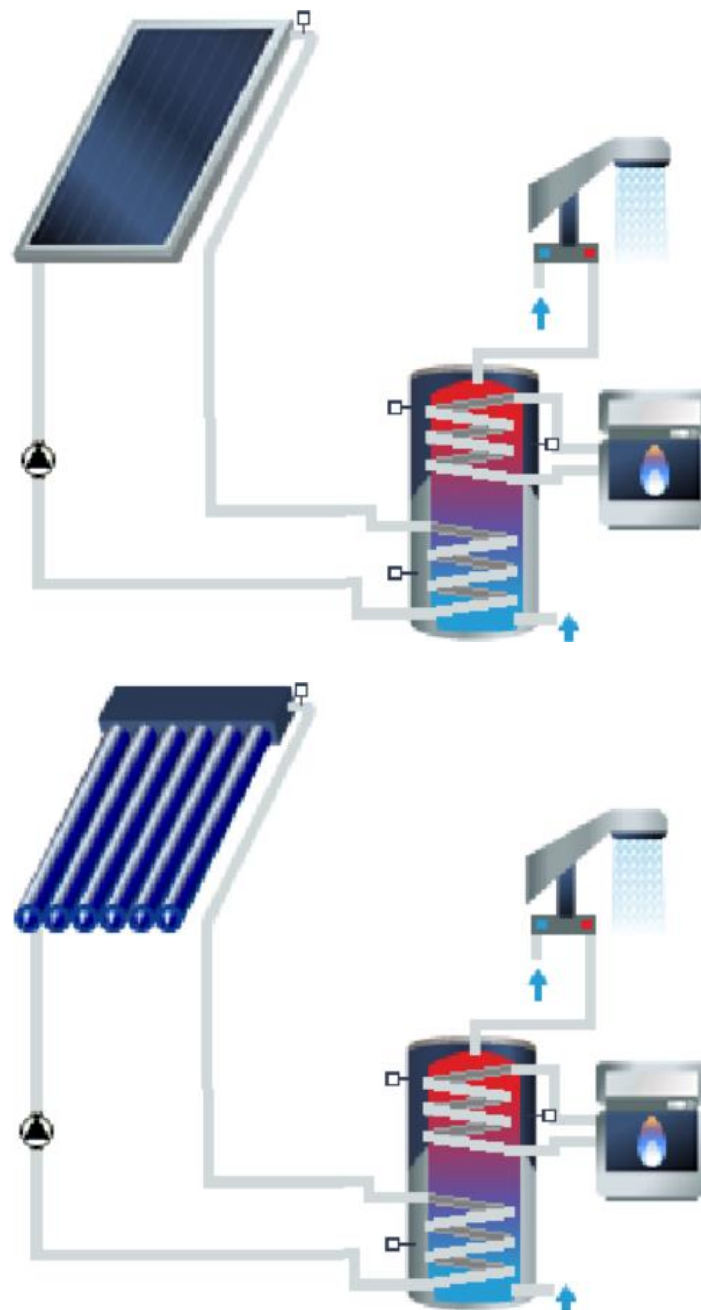
ژنتیک در ناحیه ای از ایران با عرض جغرافیایی 32.5° پرداختند. آن ها در مطالعه دیگری [17] زاویه بهینه شیب کلکتور را در شهرهای کرمان، یزد، زاهدان، بیرجند، شیراز و طبس با اطلاعات اندازه گیری شده در چند محل خاص، بدست آورده و نمودار زاویه بهینه شیب کلکتور بر حسب عرض جغرافیایی را برای ماه های مختلف، فصول مختلف و سال رسم نمودند. بر همین اساس، آن ها چند رابطه عمومی را برای محاسبه برای زاویه بهینه شیب برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه برای عرض جغرافیایی بین 20° تا 40° در نیمکره شمالی ارائه نمودند. صلواتی پور و همکاران [18] با استفاده از اطلاعات اندازه گیری شده متوسط ماهیانه تشعشع روزانه، زاویه بهینه شیب کلکتور را برای شهر اصفهان برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه به دست آوردند.

مطالعه حاضر به بررسی اثر زاویه نصب ابگرمن خورشیدی مجهز به کلکتور لوله خلاء و کلکتور صفحه تخت بر روی مقدار راندمان و مقدار انرژی جذب شده سالیانه در شهر کرمان می پردازد. برای این منظور دو کلکتور لوله خلاء و صفحه تخت هر یک با مساحت 2 مترمربع در شهر کرمان برای سه زاویه نصب 25° ، 30° و 35° درجه در نرم افزار TSOL مدلسازی شده اند و نتایج عددی بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده است.

مدلسازی عددی

نرم افزار شبیه سازی ویژه ای است که با شما اجازه میدهد تا عملکرد یک سیستم حرارتی خورشیدی را به صورت کاملاً پویا طی چرخه ای یکساله و با دقت بالایی محاسبه کنید. با استفاده از این برنامه میتوانید سیستم های حرارتی خورشیدی را به صورت کاملاً بهینه طراحی کنید و محاسباتی همچون ابعاد سلولهای خورشیدی، مخازن ذخیره سازی و همچنین محاسبه بهره وری اقتصادی پروژه را انجام دهید. این برنامه بیش از 200 سیستم از پیش تعیین شده در دیتابیس خود دارد که برای مقاصد مختلفی تعریف شده و کاربران میتوانند بر اساس نیاز خود یکی از آنها را انتخاب و سفارشی کنند، البته اگر سیستم مورد نیاز شما در بین این لیست وجود نداشته باشد راحتی میتوانید تمامی پارامترها و خصیصه های تکنیکی را به صورت دستی خودتان تنظیم کنید و در نهایت خروجی مورد نظر خود را تحویل بگیرید TSOL. به خاطر دقت بالا در محاسبات و امکانات مختلفی که فراهم دیده است، یک برنامه ایده آل در این شاخه میباشد و استفاده از آن تاثیر محسوسی در کاهش هزینه های نهایی در پی خواهد داشت.

مصر پرداخت. یکوپ و مالیک [5] از یک مدل ریاضی، مبتنی بر تشعشع خارج جو، برای تخمین تشعشع کل روی سطح شیب دار استفاده کردند و زاویای بهینه شیب و سمت کلکتورهای خورشیدی را در برونی دارالس را به دست آوردند. آن ها دریافتند که تنظیم ماهیانه کلکتور مقدار تشعشع ورودی کل را نزدیک به مقدار حداکثر برای شرایط تنظیم روزانه با زاویه بهینه روزانه می نماید. باری [6] عوامل مؤثر بر عملکرد کلکتورهای خورشیدی در کشورهای با عرض جغرافیایی پایین را مورد بررسی قرار داد. او همچنین به مقایسه اثر متغیرهایی مانند زاویه شیب سطح، زاویه سمت آن یا هر دو در کشورهای با عرض جغرافیایی پایین و کشورهای با عرض جغرافیایی بالاتر پرداخت. گونرهان و هیپاسلی [7] زاویه بهینه شیب کلکتور را در ازبیر ترکیه به دست آوردند و توصیه نمودند که برای افزایش بهره وری، کافی است که کلکتور به صورت ماهیانه تنظیم شود. جمیل احمد و تایواری [8] زاویه بهینه کلکتور را برای ده مکان مختلف در جهان، از جمله بعضی از شهرهای هند برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه به دست آوردند. اسکیکر [9] نیز با مدل سازی ریاضی مبتنی بر تشعشع خارج از جو، به مطالعه زاویه بهینه قرارگیری کلکتور خورشیدی در مناطق مختلف سوریه پرداخت. بن قانم [10] زاویه بهینه شیب کلکتور را در مدینه عربستان سعودی برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه به دست آورد. نتایج او نشان داد که با تنظیم ماهیانه، می توان حداکثر انرژی خورشیدی را برای منطقه مذکور به دست آورد و زاویه بهینه برای تنظیم سالانه تقریباً با عرض جغرافیایی مدینه برابر است. در ایران نیز مطالعاتی درباره زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی تخت برای چند محل انجام شده است. عبدل زاده و همکاران [11] با استفاده از مدل های ریاضی مختلف، زاویه شیب بهینه کلکتور خورشیدی تخت را برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه در کرمان به دست آوردند. ثقفی و همکاران [12] تابش دریافتی ماهیانه کلکتور خورشیدی تخت واقع در تهران را به ازای زوایای شیب گوناگون محاسبه کردند و نتایج را برای انتخاب زاویه بهینه شیب، مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. مقدم و همکاران [13] با استفاده از مدل سازی ریاضی تخمین تشعشع و مقایسه آن با اطلاعات اندازه گیری شده، به مطالعه زاویه بهینه شیب کلکتور در زاهدان برای تنظیم روزانه، ماهیانه، سالانه پرداختند. عبدل زاده و مهربان [14] برای شهرهای کرمان، یزد، زاهدان، بیرجند و طبس که همه در ناحیه گرم و خشک ایران واقع هستند، زاویه بهینه شیب کلکتور را به دست آوردند. طالبی زاده و همکاران [15، 16] به مطالعه زوایای بهینه شیب و سمت سطح با استفاده از روش الگوریتم



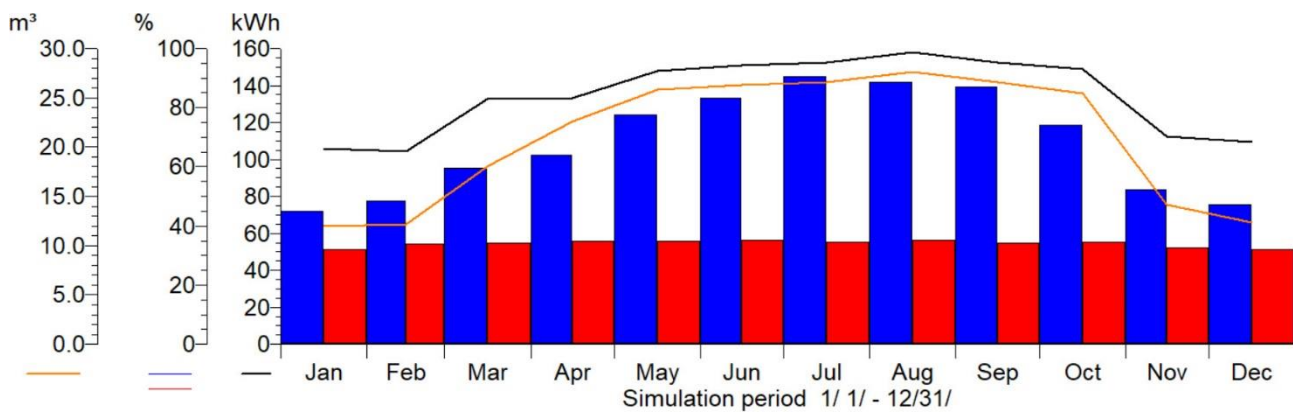
شکل ۱. نمونه ابگرمکن خورشیدی مجهز به کلکتور (الف) صفحه تخت (ب) و لوله خلا شبیه سازی شده در نرم افزار TSOL

همانگونه که در شکل نشان داده شده است، انحراف ۵ درجه از زاویه نصب ۳۰ درجه تاثیر چندانی بر روی راندمان کلکتور صفحه تخت ندارد، اگرچه مقدار انرژی جذب شده در حالت نصب با زاویه ۳۰ درجه دارای مقدار بیشینه است. علاوه بر این، بالاترین مقدار انرژی جذب شده در زاویه نصب ۳۰ درجه که همان عرض جغرافیایی کرمان است بدست می آید.

کلکتور صفحه تخت و لوله خلا در مطالعه حاضر اهر یک دارای مساحت ۲ متر مربع و مخزن ذخیره ۱۵۰ لیتری هستند. میزان انرژی جذب شده و راندمان سالیانه این کلکتورها در زوایای نصب 25° و 30° بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است.

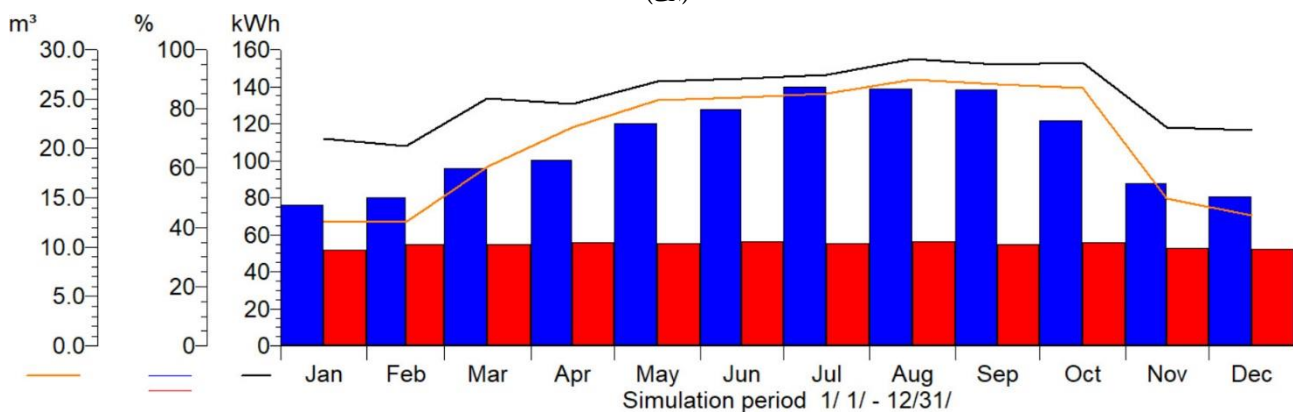
نتایج و بحث

شکل ۲ اثر زاویه نصب بر روی پارامترهای مهم شامل مقدار انرژی جذب شده و راندمان کلی را برای کلکتور صفحه تخت نشان می دهد.



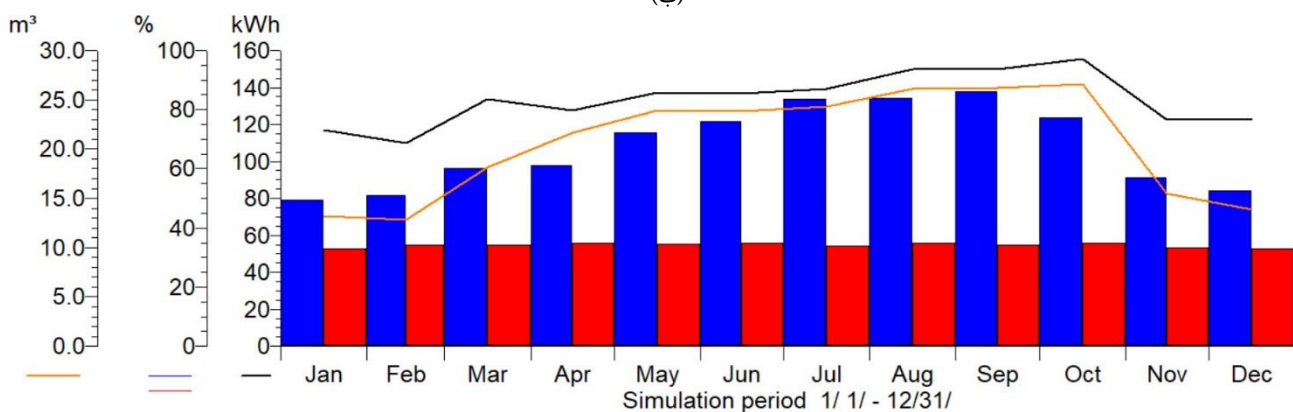
— Savings Natural gas (H) 250 m³ ■ DHW solar fraction 66 %
■ Efficiency 34 % — E Solar - DHW 1,609 kWh

(الف)



— Savings Natural gas (H) 249 m³ ■ DHW solar fraction 66 %
■ Efficiency 34 % — E Solar - DHW 1,611 kWh

(ب)



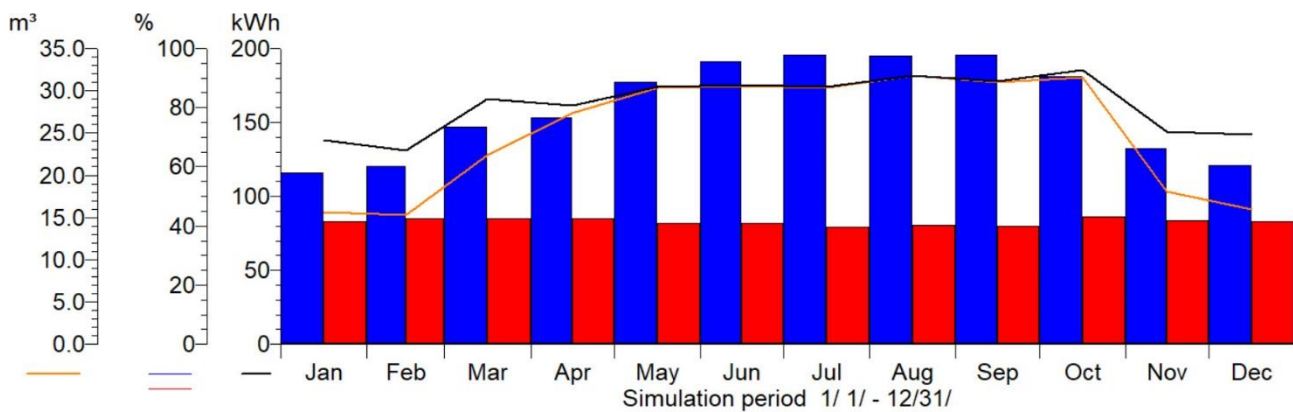
— Savings Natural gas (H) 246 m³ ■ DHW solar fraction 66 %
■ Efficiency 34 % — E Solar - DHW 1,602 kWh

(ج)

شکل ۲. بررسی عملکرد کلکتور صفحه تخت در زوایای نصب (الف) ۲۵°، (ب) ۳۰° و (ج) ۳۵°

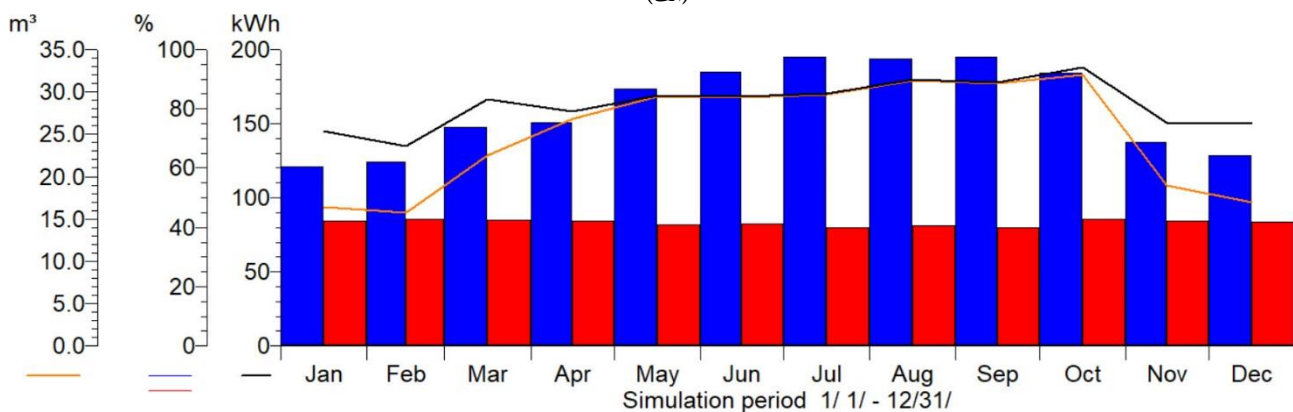
هستند و با افزایش زاویه نصب از ۲۵ درجه به ۳۰ درجه مقدار راندمان و انرژی جذب شده هر دو افزایش می‌یابد. اگرچه بالاترین مقدار انرژی جذب شده در زاویه نصب ۳۰ درجه که همان عرض جغرافیایی کرمان است حاصل می‌شود.

شکل ۳ اثر زاویه نصب بر روی کلکتور لوله خلاء بررسی شده است. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، راندمان کلکتور لوله خلاء نسبت به راندمان کلکتور صفحه تخت بالاتر است. از طرفی، راندمان و مقدار انرژی جذب شده هر دو تحت تاثیر زاویه نصب



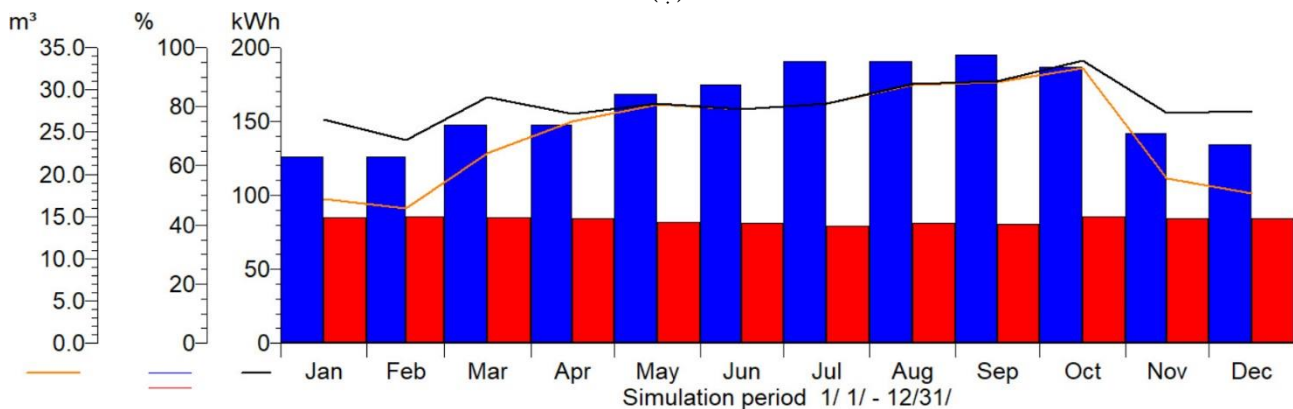
— Savings Natural gas (H) 300 m³ ■ DHW solar fraction 79 %
 ■ Efficiency 41 % — E Solar - DHW 1,950 kWh

(الف)



— Savings Natural gas (H) 300 m³ ■ DHW solar fraction 79 %
 ■ Efficiency 42 % — E Solar - DHW 1,957 kWh

(ب)



— Savings Natural gas (H) 297 m³ ■ DHW solar fraction 79 %
 ■ Efficiency 42 % — E Solar - DHW 1,949 kWh

(ج)

شکل ۳. بررسی عملکرد کلکتور لوله خلاء در زوایای نصب (الف) ۲۵° و (ب) ۳۰° و (ج) ۳۵°

انرژی جذب شده برای ۲ متر مربع کلکتور صفحه تخت و لوله خلاء بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد با تغییر زاویه نصب به مقدار ۵ درجه از زاویه نصب سالیانه راندمان کلکتور صفحه تخت تغییر نمی‌کند اگرچه مقدار انرژی جذب شده به مقدار کمی کاهش می‌یابد. این مهم در کلکتور لوله خلاء از اهمیت بالاتری برخوردار است و با نزدیک شدن زاویه نصب به عرض جغرافیایی هر دو مقدار انرژی جذب شده و راندمان افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

کلکتور صفحه تخت و لوله خلاء از پرکاربردترین انواع کلکتورهای موجود در بازار هستند. زاویه نصب در این نوع از کلکتورها برای بدست آوردن راندمان بهینه از اهمیت بالایی برخوردار است. برای این دسته از کلکتورها معمولاً یک زاویه نصب بهینه سالیانه در نظر گرفته میشود که مقدار آن در بسیاری از موارد برابر عرض جغرافیایی محل نصب است. در این مطالعه اثر زاویه نصب بر روی راندمان و مقدار

مراجع

- [۱۱] ع. ز. مرتضی، ج. سعید، ر. محمد، ع. مهران، تعیین زاویه بهینه پانل های خورشیدی ثابت برای دریافت بیشترین انرژی تشعشعی در شهر کرمان.
- [۱۲] ثقفی، ا. خلجی، پوینده، راضیه، شیب بهینه گردآورهای خورشیدی و مقایسه با حالت نصب شده روی نمای جنوبی در تهران، نشریه هنرهای زیبا-معماری و شهرسازی ۲(۴۴) (۲۰۱۰) ۵۷-۶۴.
- [13] H. Moghadam, F.F. Tabrizi, A.Z. Sharak, Optimization of solar flat collector inclination, *Desalination* 265(1-3) (2011) 107-111.
- [14] M. Abdolzadeh, M. Mehrabian, Obtaining maximum input heat gain on a solar collector under optimum slope angle, *International Journal of Sustainable Energy* 30(6) (2011) 353-366.
- [15] P. Talebizadeh, M. Mehrabian, M. Abdolzadeh, Prediction of the optimum slope and surface azimuth angles using the Genetic Algorithm, *Energy and buildings* 43(11) (2011) 2998-3005.
- [16] P. Talebizadeh, M. Mehrabian, M. Abdolzadeh, A Study on the Different Components of Solar Radiation in Order to Calculate the Optimum Solar Angles and the Gain of Solar Energy Using Genetic Algorithm, *Energy Sustainability*, 2011, pp. 303-309.
- [17] P. Talebizadeh, M. Mehrabian, M. Abdolzadeh, Determination of optimum slope angles of solar collectors based on new correlations, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 33(17) (2011) 1567-1580.
- [18] H. Salvatipour, M. Abdolzadeh, H. Beheshti, M. Rahnama, Solar Energy Enhancement of a Solar Collector by an Optimum Slope Angle in Isfahan, Central Region of Iran, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 33(17) (2011) 1625-1635.
- [1] M. El-Kassaby, Monthly and daily optimum tilt angle for south facing solar collectors; theoretical model, experimental and empirical correlations, *Solar & wind technology* 5(6) (1988) 589-596.
- [2] S.S. Soulayman, On the optimum tilt of solar absorber plates, *Renewable Energy* 1(3-4) (1991) 551-554.
- [3] N. Nijegorodov, K. Devan, P. Jain, S. Carlsson, Atmospheric transmittance models and an analytical method to predict the optimum slope of an absorber plate, variously oriented at any latitude, *Renewable Energy* 4(5) (1994) 529-543.
- [4] V. Morcos, Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Assiut, Egypt, *Renewable energy* 4(3) (1994) 291-298.
- [5] M.A.b.H.M. Yakup, A. Malik, Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam, *Renewable Energy* 24(2) (2001) 223-234.
- [6] S. Bari, Optimum orientation of domestic solar water heaters for the low latitude countries, *Energy conversion and management* 42(10) (2001) 1205-1214.
- [7] H. Gunerhan, A. Hepbasli, Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications, *Building and Environment* 42(2) (2007) 779-783.
- [8] M. Jamil Ahmad, G. N Tiwari, Optimization of tilt angle for solar collector to receive maximum radiation, *The open renewable energy journal* 2(1) (2009).
- [9] K. Skeiker, Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria, *Energy Conversion and Management* 50(9) (2009) 2439-2448.
- [10] M. Benghanem, Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia, *Applied Energy* 88(4) (2011) 1427-1433.

ACEC2021-50612

معرفی ساختار جدید در طراحی مبدل‌های DC-DC چند ورودی مبتنی بر مبدل SEPIC برای کاربرد انرژی‌های خورشیدی

ابراهیم سیفی نجمی^۱، حسین بدرزاده^۲

^۱استادیار، گروه مهندسی برق موسسه آموزش عالی رشدیه تبریز، ایران، ebrahimseifinajmi@gmail.com
^۲کارشناس ارشد، گروه مهندسی برق موسسه آموزش عالی رشدیه تبریز، ایران، h.badrzade@gmail.com

چکیده

امروزه توجه زیادی به انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر بادی و خورشیدی شده است. مهمترین عیب این انرژی‌ها عدم قطعیت آنها می‌باشد. بنابراین، سایر منابع نظیر پیل سوختی و باتری به عنوان پشتیبان نیاز است. برای مدیریت بهینه این منابع مبدل‌های چند ورودی MIC نقش مهمی ایفا می‌کنند. این مبدل‌ها دارای بازده بالا، پیچیدگی کمتر، حجم پایین و تعداد المان کمتر می‌باشد. در این مقاله یک مبدل براساس SEPIC بررسی شد که دارای دو ورودی و یک خروجی می‌باشد. این ساختار تمامی ویژگی‌های مبدل SEPIC مانند کاهندگی-افزاینندگی بدون تغییر پلاریته ولتاژ خروجی را دارد. مبدل دارای یک ورودی دو طرفه است که می‌تواند جریان را در دو جهت هدایت کند و باتری به آن متصل گردد. توان بار می‌تواند بین ورودی‌ها مدیریت و تقسیم شود. بدلیل ویژگی ذاتی کاهندگی-افزاینندگی مبدل شارژ-دشارژ باتری و استحصال بیشینه توان از ماژول‌های فتوولتائیک براحتی قابل انجام است. دو حالت کاری برای مبدل شناسایی شد و توسط نرم افزار MATLAB شبیه سازی گردید. نتایج صحت عملکرد مبدل را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: مبدل dc/dc، کاهندگی-افزاینندگی، انرژی تجدیدپذیر، چند ورودی-خروجی

مقدمه

در دهه اخیر به جهت داشتن سطح ولتاژ خروجی پائین و از نوع DC، سلول‌های خورشیدی برای اتصال به شبکه قدرت نیاز به مبدل‌های مختلفی دارند. از آنجا که سطح ولتاژ خروجی پنل‌های خورشیدی

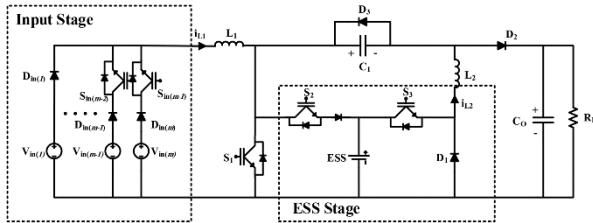
پایین است، یکی از مبدل‌های مورد نیاز، مبدل افزایش ولتاژ DC است [۱-۳].

با استفاده از یک مبدل افزایش مرسوم، یک مبدل DC/AC و یک ترانسفورماتور برای افزایش سطح ولتاژ می‌توان از انرژی خورشیدی بطور مناسب استفاده کرد؛ این نوع ساختار به دلیل وجود ترانسفورماتور بازده پائینی دارد و با توجه به بازدهی پائین سلول‌های خورشیدی، استفاده از این نوع ساختار باعث کاهش بیشتر بازده می‌شود. علاوه بر این، هزینه پیاده سازی نیز بیشتر است. به همین خاطر، پیشرفت‌های اخیر در زمینه منابع انرژی جدید و اتصال آن‌ها به شبکه‌های قدرت، اهمیت مبدل‌های افزایشنده با بهره ولتاژ بالا را دوچندان کرده است. با استفاده از مبدل‌های افزایشنده، دیگر به ترانسفورماتور برای افزایش سطح ولتاژ سلول خورشیدی به منظور اتصال به شبکه قدرت نیازی نخواهد بود [۴-۵].

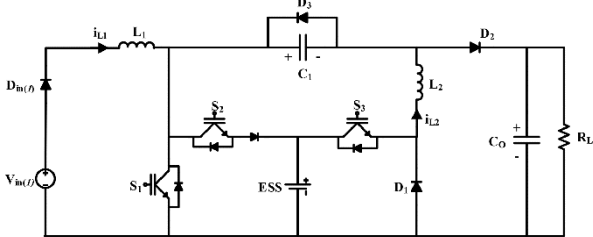
بهترین مبدل، مبدلی است که علاوه بر اینکه بتواند خواسته‌های مورد نیاز کاربردی خود را برآورده سازد، بتواند بقیه مشخصه‌ها را نیز در حد قابل قبولی ارائه دهد. همچنین بتواند به راحتی با سیستم‌های کنترلی مختلف خود را وفق داده و کنترل شود. بهره ولتاژ و بازده بالا همزمان با کاهش استرس ولتاژ روی نیمه هادی‌های قدرت و المان‌های هر چه کمتر و ناحیه وسیع CCM از مهمترین مشخصه‌های یک مبدل افزایشنده است که باید در طراحی آن‌ها مورد توجه قرار گیرد. اما آنچه در طراحی و کنترل مبدل‌ها مسلم است این است که نمی‌توان در یک مبدل تمام مزایا را جای داد بلکه در هر مبدل با توجه به کاربرد آن در صنعت یک یا چند مزیت بهبود داده می‌شود و بقیه خصوصیات آن در حد قابل قبول باقی می‌ماند. در مورد سیستم کنترلی نیز این امر صادق است. معمولاً فقط یک یا دو مشخصه مدار را کنترل کرده و بهبود می‌دهند و بقیه مشخصه‌ها را در حد قابل قبول ولی نه خیلی خوب نگه می‌دارند [۶-۷]. در این مقاله نیز سعی بر آن خواهد بود که

$$C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} = -i_{L_2} \quad (3)$$

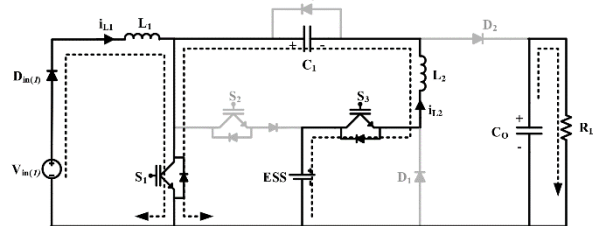
$$C_O \frac{dV_{C_O}}{dt} = -\frac{V_{C_O}}{R_L} \quad (4)$$



شکل ۱. ساختار عمومی مبدل چند ورودی



شکل ۲. ساختار دو ورودی یک خروجی براساس مبدل SEPIC



شکل ۳. مد سوئیچینگ اول مبدل در حالت کاری اول

- بازه کلیدزنی دوم $(d_1 + d_3)Ts < t < d_1 Ts$

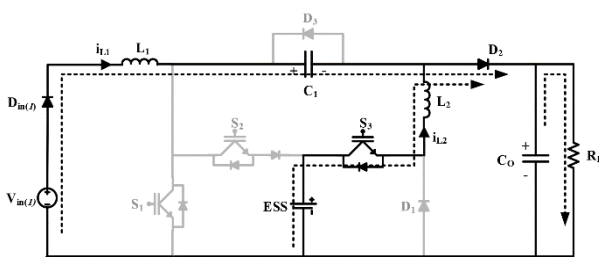
در این حالت کلید S_1 خاموش ولی کلید S_3 روشن می‌باشد. جریان سلف‌های L_1 و L_2 باعث قطع دیود D_2 می‌شوند. مشابه مد کاری ۱ در این بازه ESS توسط جریان سلف L_2 دشارژ می‌شود. در این بازه داریم:

$$L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} = V_{in(1)} - V_{C_1} - V_{C_O} \quad (5)$$

$$L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} = V_{ESS} - V_{C_O} \quad (6)$$

$$C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} = i_{L_1} \quad (7)$$

$$C_O \frac{dV_{C_O}}{dt} = i_{L_1} + i_{L_2} - \frac{V_{C_O}}{R_L} \quad (8)$$



شکل ۴. مد سوئیچینگ دوم مبدل در حالت کاری اول

یک مبدل با ساختار جدید معرفی شود بطوریکه بعضی از مشخصه های مدار را نسبت به ساختارهای ارائه شده قبلی بهبود داده و بقیه مشخصه ها در حد قابل قبولی نگه دارد. همچنین سعی بر آن شده که مبدل DC/DC با بهره ولتاژ، بازده بیشتر و استرس ولتاژ کم روی نیمه هادی‌های قدرت با حداقل المان‌های مدار نسبت به ساختارهای قبلی ارائه شود.

بررسی ساختار پیشنهادی

در این بخش مبدل DC/DC چند ورودی از نوع SEPIC بررسی می‌شود که به صورت عمومی دارای m ورودی است و در شکل ۱ نمایش داده شده است. چنانچه از این شکل مشاهده می‌گردد ساختار دارای چند ورودی است و یک منبع ذخیره ساز (ESS) جهت ذخیره سازی و می‌تواند به صورت شارژ/دشارژ عمل نماید. در این ساختار بایستی $V_{in(1)} < V_{in(2)} < \dots < V_{in(3)}$ باشد. ساختاری که دارای m ورودی باشد، بایستی دارای $m+2$ کلید، $m+3$ دیود، دو سلف و دو خازن باشد. کلیدهای S_{in} وظیفه کنترل شارش توان از منابع را دارند. کلیدهای S_2 و S_3 نیز وظیفه کنترل جریان شارژ/دشارژ باتری را دارد. کلید S_2 زمانیکه روشن است منبع ESS شارژ می‌گردد. کلید S_3 نیز در حالت دشارژ فعال می‌گردد.

براساس وضعیت ESS دو نوع حالت کاری این مبدل می‌توان متصور بود. ذکر این نکته الزامی است که ابرخازن یا باتری می‌تواند به جای ESS در نظر گرفته شود. در ادامه برای سادگی تحلیل، مدار دو ورودی که در شکل ۲ نمایش داده شده است، بررسی خواهد شد. در این حالت، توان بار بالا می‌باشد و توان منبع ورودی ($V_{in(1)}$) نمی‌تواند به تنهایی بار را تغذیه نماید. بنابراین، ESS برای تغذیه بار دشارژ می‌شود. کلیدهای S_1 و S_3 در این حالت کاری کلیدزنی می‌شوند و کلید S_2 غیر فعال است. کلید S_1 وظیفه تثبیت جریان سلف (i_{L1}) را دارد و بنابراین توان منبع ورودی ($V_{in(1)}$) را کنترل می‌کند. ولتاژ خروجی یا توان دشارژ ESS توسط کلید S_3 کنترل می‌شود. دیود D_3 در کل این بازه خاموش است. این حالت کاری دارای سه بازه سوئیچینگ است که در ادامه بررسی می‌گردد.

۱-مد کاری اول(دشارژ ESS)

- بازه کلیدزنی اول $(0 < t < d_1 Ts)$

کلیدهای S_1 و S_3 در این بازه روشن هستند. دیود D_1 به صورت بایاس معکوس بوده زیرا که کلید S_3 هدایت می‌کند. همچنین، دیود D_2 بدلیل هدایت کلید S_2 بایاس معکوس است. در این حالت کاری منبع ورودی سلف L_1 را شارژ می‌کند. همچنین سلف L_2 توسط ESS و خازن C_1 شارژ می‌گردد. خازن C_0 نیز به بار انرژی می‌دهد. مسیر جریان در این مد کاری در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این مد روابط زیر برقرار است:

$$L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} = V_{in(1)} \quad (1)$$

$$L_2 \frac{di_L}{dt} = V_{ESS} + V_{C_1} \quad (2)$$



$$V_{C_0} = \frac{d_1}{1-d_1} [V_{in(m)} S_{in(m-1)} + V_{in(m-1)} S_{in(m-2)} + \dots + V_{in(1)}] \quad (16)$$

$$(1 - S_{in(m-1)} - S_{in(m-2)} - \dots) + (d_1 + d_3) V_{ESS}$$

همچنین میزان توان دشارژ شده باتری در این بازه برابر است با:

$$P_{BAT} = (d_2 + d_3) I_{L_2} V_{BAT} = (d_2 + d_3) \frac{(1-d_1) P_{in}}{d_1 V_{in}} V_{BAT} \quad (17)$$

همچنین در صورتی که قانون آمپر ثانیه روی جریان خازن پیاده شود، داریم:

$$i_{C_1} = \begin{cases} -i_{L_2} & 0 < t < d_1 T_s \\ i_{L_1} & d_1 T_s < t < (d_1 + d_3) T_s \end{cases} \quad (18)$$

$$\langle i_{C_1} \rangle = 0 \rightarrow \frac{I_{L_1}}{I_{L_2}} = \frac{d_1}{1-d_1} \quad (19)$$

اگرچه گیت سیگنال کلید S_3 به نظر می‌رسد محدودیت داشته باشد، اما در عمل این موضوع صادق نیست. هر لحظه که لازم باشد ESS دشارژ شود، S_3 بدون محدودیتی روشن می‌گردد. این موضوع سبب می‌گردد که بخش کنترل ساختار ساده شود. برای نمونه در صورتی که $d_1 > d_3$ باشد، داریم:

$$V_{C_0} = \frac{d_1 V_{in(1)}}{(1-d_1)(1-d_3)} + \frac{d_3}{1-d_3} V_{ESS} \quad (20)$$

۲- مد کاری دوم- شارژ ESS

در این حالت کاری منبع ورودی نه تنها جوابگوی بار است بلکه ESS را نیز شارژ می‌کند. این مد کاری زمانی اتفاق می‌افتد که تقاضای بار کم باشد. در این حالت کلیدهای S_1 و S_2 برای کنترل جریان سلف L_1 و توان ESS یا ولتاژ خروجی استفاده می‌شود.

بازه کلیدزنی اول ($0 < t < d_1 T_s$)

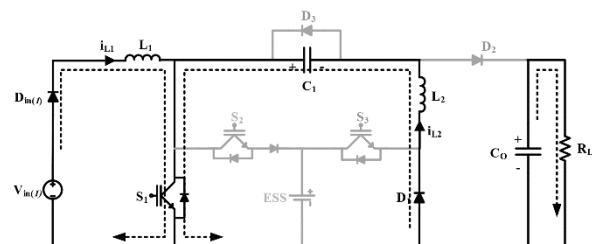
کلیدهای S_1 در این بازه روشن هستند. دیود D_2 به صورت بایاس معکوس بوده زیرا که کلید S_1 هدایت می‌کند. در این حالت کاری منبع ورودی سلف L_1 را شارژ می‌کند. همچنین سلف L_2 توسط خازن C_1 شارژ می‌گردد. خازن C_0 نیز به بار انرژی می‌دهد. مسیر جریان در این مد کاری در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این مد روابط زیر برقرار است:

$$L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} = V_{in(1)} \quad (21)$$

$$L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} = V_{C_1} \quad (22)$$

$$C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} = -i_{L_2} \quad (23)$$

$$C_0 \frac{dV_{C_0}}{dt} = -\frac{V_{C_0}}{R_L} \quad (24)$$



بازه کلیدزنی سوم ($(d_1 + d_3) T_s < t < T_s$)

در این بازه، کلید S_3 نیز قطع می‌گردد. بنابراین، ESS دشارژ نمی‌شود. جریان سلفهای L_1 و L_2 دشارژ می‌شوند و کاهش می‌یابند. مسیر جریان در این مد در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین منحنی‌های خروجی در مد کاری دشارژ ESS در شکل ۶ نمایش داده شده است. در بازه کاری سوم داریم:

$$L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} = V_{in(1)} - V_{C_1} - V_{C_0} \quad (9)$$

$$L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} = -V_{C_0} \quad (10)$$

$$C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} = i_{L_1} \quad (11)$$

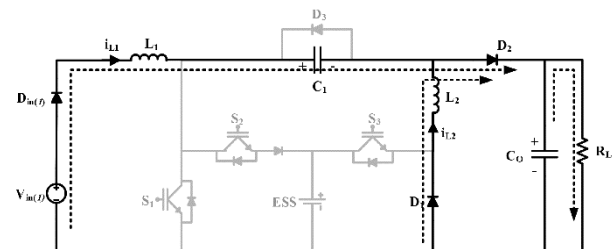
$$C_0 \frac{dV_{C_0}}{dt} = i_{L_1} + i_{L_2} - \frac{V_{C_0}}{R_L} \quad (12)$$

با اعمال قانون تعادل ولت ثانیه بر ولتاژ سلفهای L_1 و L_2 داریم:

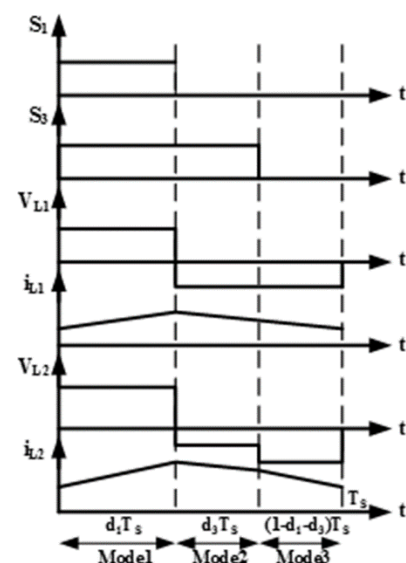
$$V_{C_1} = V_{in(1)} - (d_1 + d_3) V_{ESS} \quad (13)$$

$$V_{C_0} = \frac{d_1 V_{in(1)}}{1-d_1} + (d_1 + d_3) V_{ESS} \quad (14)$$

$$C_0 \frac{dV_{C_0}}{dt} = i_{L_1} + i_{L_2} - \frac{V_{C_0}}{R_L} \quad (15)$$

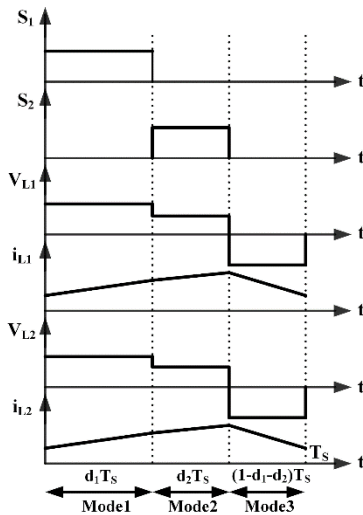


شکل ۵. مد سوئیچینگ سوم مبدل در حالت کاری اول



شکل ۶. منحنی‌های خروجی در حالت کاری اول

در صورتی که مبدل دارای m ورودی باشد، داریم:



شکل ۱۰. مد سوئیچینگ سوم مبدل در حالت کاری دوم

نتایج شبیه سازی

شبیه سازی در نرم افزار MATLAB و محیط سیمولینک صورت گرفته است. این نتایج برای صحت سنجی عملکرد مبدل پیشنهادی ارائه می شود. پارامترهای شبیه سازی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای شبیه سازی

| پارامتر | مقدار |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|
| سلف L_1 | ۵ میلی هانری |
| سلف L_2 | ۲ میلی هانری |
| خازن C_0 | ۲۲۰ میکرو فاراد |
| خازن C_1 | ۴۷ میکرو فاراد |
| بار خروجی | ۱۲۵ اهم |
| فرکانس کلیدزنی | ۴۰ کیلوهرتز |
| ولتاژ باتری | ۲۴ ولت |
| ولتاژ ورودی | ۵۰ ولت |
| کنترلر تناسبی انتگرالی برای تنظیم ولتاژ خروجی | ۰/۰۵/۰/۱ تناسبی و ۰/۱ انتگرالی |
| کنترلر تناسبی انتگرالی برای تنظیم جریان سلف L_1 | ۰/۵/۰/۱ تناسبی و ۰/۱ انتگرالی |

در این مد کاری هدف دشارژ باتری می باشد. منبع ورودی ۱ آمپر جریان می دهد که معادل ۵۰ وات توان می باشد. مصرف کننده نیز در ولتاژ ۸۸ ولت، توان ۶۲ وات را مصرف می نماید. بنابراین اختلاف این دو را بایستی باتری تامین نماید. با توجه به اینکه باتری ۲۵ ولت است، نیاز است تا جریان متوسط ۰/۵ آمپر توسط باتری تامین گردد. ولتاژ مرجع خروجی ۸۸ ولت می باشد. شکل ۱۱ نمایش ولتاژ خروجی می باشد. مشاهده می گردد که در ۸۸ ولت تثبیت شده است. دیوتی سایکل کلید S_1 برابر ۰/۵۵ و کلید S_3 برابر ۰/۹ می باشد. با توجه به رابطه

ارائه شده در فصل قبل داریم:

شکل ۷. مد سوئیچینگ اول مبدل در حالت کاری دوم

بازه کلیدزنی دوم $(d_1 T_s < t < (d_1 + d_2) T_s)$

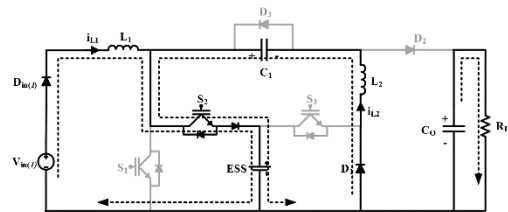
در این حالت کلید S_1 خاموش ولی کلید S_2 روشن می باشد. جریان سلف های L_1 و L_2 از طریق S_2 سبب شارژ ESS می شود. مشابه مد کاری ۱ جریان بار توسط خازن خروجی تامین می شود. در این بازه داریم:

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in(1)} - V_{ESS} \quad (25)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{C1} - V_{ESS} \quad (26)$$

$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = -i_{L2} \quad (27)$$

$$C_0 \frac{dV_{C0}}{dt} = -\frac{V_{C0}}{R_L} \quad (28)$$



شکل ۸. مد سوئیچینگ دوم مبدل در حالت کاری دوم

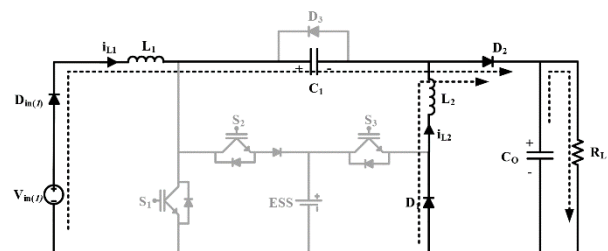
بازه کلیدزنی سوم $(d_1 + d_3) T_s < t < T_s)$

این مد مشابه حالت کلیدزنی سوم در بازه دشارژ می باشد. با اعمال قانون ولت ثانیه داریم:

$$V_{C1} = V_{in(1)} \quad (29)$$

$$V_{C0} = \frac{(d_1 + d_2)V_{in(1)} - d_2 V_{ESS}}{1 - d_1 - d_2} \quad (30)$$

$$P_{BAT} = d_1 (I_{L1} + I_{L2}) V_{BAT} = d_1 \left(\frac{P_{in}}{(d_1 + d_2) V_{in}} \right) V_{BAT} \quad (31)$$



شکل ۹. مد سوئیچینگ سوم مبدل در حالت کاری دوم

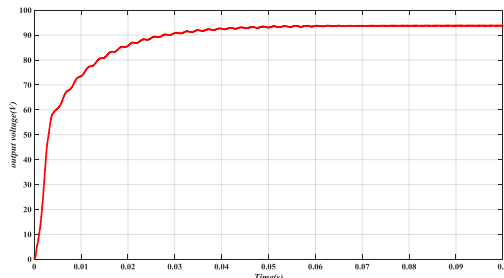
با اعمال قانون آمپر ثانیه بر جریان خازن داریم:

$$\langle i_{C1} \rangle = 0 \rightarrow \frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{d_1 + d_2}{1 - d_1 - d_2} \quad (32)$$



و $d_2=0.184$ توسط سیستم کنترلی تولید می‌گردد. بنابراین از رابطه زیر ولتاژ خروجی محاسبه می‌شود:

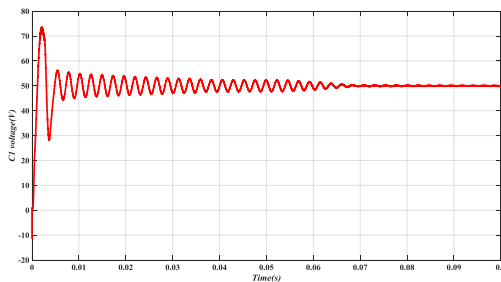
$$V_{Co} = \frac{(d_1 + d_2)V_{in(1)} - d_2V_{ESS}}{1 - d_1 - d_2} = \frac{(0.51 + 0.184) \times 50 - 0.184 \times 24}{1 - 0.51 - 0.184} = 92v \quad (35)$$



شکل ۱۵. ولتاژ خروجی

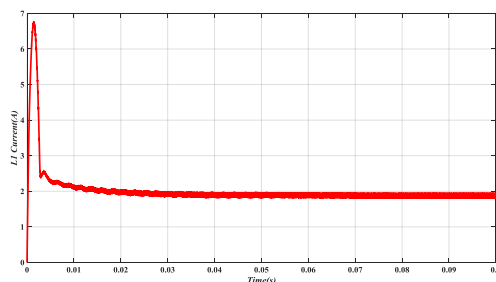
همچنین ولتاژ خازن برابر است با:

$$V_{C1} = V_{in(1)} = 50v \quad (36)$$



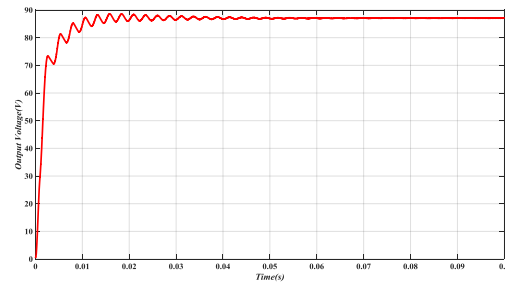
شکل ۱۶. ولتاژ خازن C₁

همچنین جریان سلف L_1 در مقدار $1/9$ آمپر تنظیم می‌گردد. شکل ۱۷ جریان سلف L_1 را نمایش می‌دهد. توان ورودی ۹۵ وات می‌باشد، توان خروجی ۶۷ وات می‌باشد. توان باتری برابر ۲۸ وات است و بایستی شارژ شود. $1/16$ آمپر بایستی باتری شارژ شود. جریان باتری در این حالت پالسی است و تا $2/7$ - بالا می‌رود.



شکل ۱۷. جریان سلف L_1

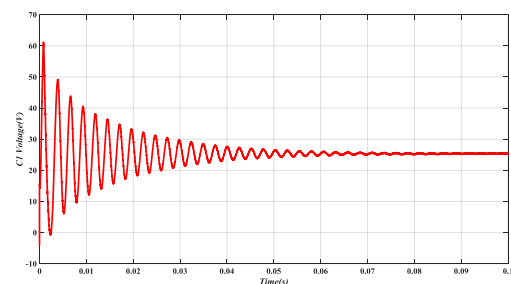
$$V_{Co} = \frac{d_1 V_{in(1)}}{(1-d_1)(1-d_3)} + \frac{d_3}{1-d_3} = 88v \quad (33)$$



شکل ۱۱. ولتاژ خروجی

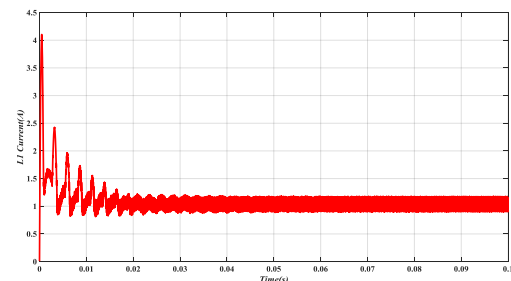
همچنین ولتاژ خازن C1 برابر است با:

$$V_{C1} = V_{in(1)} - (d_1 + d_3) = 25v \quad (34)$$



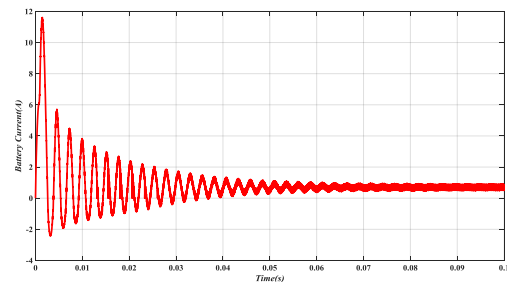
شکل ۱۲. ولتاژ خازن C₁

جریان مرجع برای سلف L_1 برابر ۱ آمپر انتخاب شده است که براساس شکل زیر در این مقدار تثبیت شده است.



شکل ۱۳. جریان سلف L_1

باتری بایستی ۲۵ وات در ۲۴ ولت را تامین کند. بنابراین $1/4$ آمپر بایستی تامین گردد. شکل ۱۴ ولتاژ باتری را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۴. جریان باتری

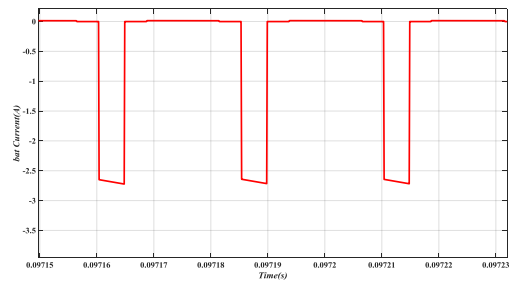
در این حالت باتری شارژ می‌گردد. جریان مرجع سلف L_1 برابر $1/9$ آمپر و ولتاژ خروجی برابر ۹۲ ولت می‌باشد. در این حالت $d_1=0.51$

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله از یک مبدل دو ورودی یک خروجی براساس مبدل SEPIC استفاده شد. یکی از ورودی‌ها باتری بوده و وظیفه مدیریت توان را دارد. یکی از ورودی‌های دیگر می‌توان انرژی خورشیدی یا پیل سوختی باشد. برای اثبات صحت عملکرد سیستم شبیه سازی زمانی در نرم افزار MATLAB/Simulink صورت گرفته که نتایج صحت عملکرد سیستم کنترلی را تایید کرد.

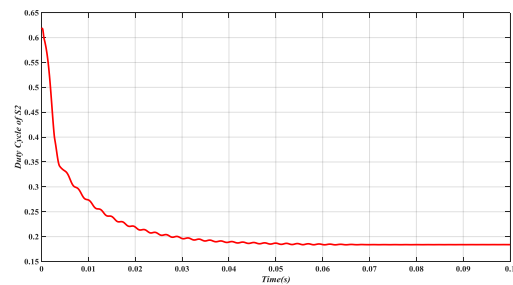
مراجع

- [1] K. Kazimierzczuk M "Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters" A John Wiley and Sons, Ltd, Wright State University Dayton, Ohio, USA, 2008,
- [2] J. H. Lee, J. H. Park, and J. H. Jeon, "Series-Connected Forward-Flyback Converter for High Step-Up Power Conversion," IEEE Trans. power. Electron., vol. 26, no. 12, pp. 3629-3641, Dec. 2011.
- [3] T. J. Liang, J. H. Lee, J. F. Chen, and L. S. Yang, "Novel Isolated High-Step-Up DC-DC Converter With Voltage Lift," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 4, pp. 1483-1491, Apr. 2013.
- [4] J. H. Lee, T. J. Liang, and J. F. Chen, "Isolated Coupled-Inductor-Integrated DC-DC Converter With Nondissipative Snubber for Solar Energy Applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 7, pp. 3591 - 3603, Jul. 2014.
- [5] F. Evran, and M. T. Aydemir, "Z-source-based isolated high step-up converter," IET power. Electron., vol. 6, no. 1, pp. 117-124, Jan. 2013.
- [6] F. Evran, and M. T. Aydemir, "Isolated High Step-up DC-DC Converter with Low Voltage Stress," IEEE Trans. power. Electron., vol. 29, no. 7, pp. 3629-3641, Jul. 2014.
- [7] C. T. Pan, C. F. Chuang, C. C. Chu, "A Novel Transformer-less Adaptable Voltage Quadrupler DC Converter with Low Switch Voltage Stress," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 9, pp. 4787 - 4796, Sept. 2014.

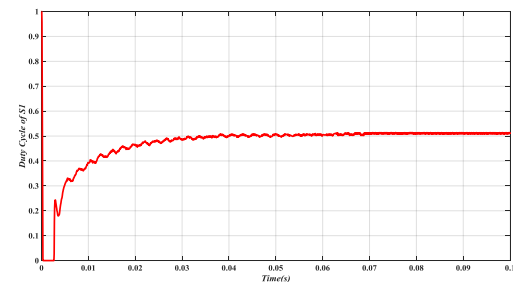


شکل ۱۸. جریان باتری

دیوتی سایکل کلید S_1 و S_2 به ترتیب شکل ۱۹ و شکل ۲۰ نمایش داده شده است که در مقدار 0.184 و 0.51 ثابت شده است.



شکل ۱۹. دیوتی سایکل کلید S_2



شکل ۲۰. دیوتی سایکل S_1

ACEC2021-51173

طراحی بهینه سیستم تولید توان ترکیبی دیزل ژنراتور/باد/خورشید با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

امیر بابک انصاری^۱

^۱استادیار، پژوهشگاه انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران؛
a.b.ansari@kgut.ac.ir

چکیده

در مطالعه حاضر تامین انرژی مورد نیاز در یک مجموعه با استفاده از منابع انرژی مختلف تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و با استفاده از یک سیستم تولید توان ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شرایط مجموعه مورد مطالعه، دو سناریو مختلف مطرح شده که برای هر سناریو بطور جداگانه آنالیز فنی و اقتصادی سیستم ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه دسترسی به سوخت دیزل وجود دارد، از دیزل ژنراتور برای تامین انرژی در طول شب استفاده شده است. سپس بهترین سیستم از لحاظ اقتصادی تعیین شده است. همچنین برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم در شرایط خاص، سیستمی با کمترین نیاز به دیزل ژنراتور مدنظر است. با توجه به تعدد معیارها، سیستم‌های مختلفی با ترکیب‌های مختلف پیشنهاد شده و با استفاده از روش انتروپی به معیارهای مختلف وزن‌دهی انجام شده و با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS بهترین سیستم انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیستم منتخب، بهترین سیستم از لحاظ اقتصادی نیست.

واژه‌های کلیدی: سیستم تولید توان ترکیبی، طراحی بهینه، تصمیم‌گیری چندمعیاره، TOPSIS

مقدمه

کشور ایران با اینکه یکی از کشورهای نفت خیز جهان و دارای منابع عظیم گاز طبیعی است، اما به دلیل شدت تابش خورشید در بیشتر نقاط و همچنین پتانسیل بسیار خوب انرژی باد می‌تواند با بهره‌مندی از انرژی خورشیدی و بادی، صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف سوخت‌های فسیلی داشته باشد. فناوری نه چندان پیچیده، کاهش آلودگی هوا و محیط‌زیست و از همه مهمتر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی برای آینده یا امکان صادرات و فروش و تبدیل آنها به مواد پتروشیمی، از دلایل لزوم استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر و

به‌ویژه انرژی باد و خورشید در کشورمان است. با افزایش قیمت نفت در سال‌های اخیر، کشورهای پیشرفته صنعتی مجبور شدند به استفاده از انرژی‌های جانسین جدی‌تر بیاورند و این نگرش در دهه اخیر در ایران نیز وسعت بیشتری یافته است. یکی از راه‌های بسیار مناسب و کارآمد جهت کاهش هزینه سیستم‌های تولید توان مستقل، با حفظ قابلیت دسترسی بسیار خوب، کاهش هزینه لازم جهت ذخیره‌سازی انرژی است که این امر نیز تنها با استفاده از ترکیبی از سیستم‌های تولید توان تجدیدپذیر امکان‌پذیر خواهد بود. به همین منظور به این سیستم‌ها، سیستم‌های ترکیبی تولید توان گفته می‌شود. بنابراین یکی از دلایل اصلی در استفاده از سیستم‌های تولید توان هیبریدی این است که می‌توان میزان قابلیت اطمینان سیستم را افزایش داد در حالی که هزینه عمرکاری سیستم کاهش یابد. این امر در مورد سیستم‌های تولید توان مرسوم قدیمی و یا سیستم‌های تولید توانی که تنها با یک منبع انرژی تجدیدپذیر کار می‌کنند امکان‌پذیر نیست. در سال‌های اخیر استفاده از سیستم‌های تولید توان هیبریدی جهت تولید انرژی الکتریکی بسیار رواج پیدا کرده است. اما باید همواره این نکته را مدنظر داشت که به دلیل تنوع بسیار زیاد در منابع تولید انرژی و همچنین تنوع در تکنولوژی سیستم‌های توان بایستی همواره یک طراحی مناسب و بهینه جهت راه‌اندازی یک سیستم هیبریدی انجام داد. در بسیاری از موارد به دلیل عدم طراحی بهینه، سیستم انرژی ترکیبی بیش از اندازه بزرگ بوده یا به صورت مناسبی طراحی و طرح‌ریزی نمی‌شود که این موضوع نیز باعث افزایش بیش از حد در هزینه‌های نصب و راه‌اندازی می‌شود. همچنین به دلیل وجود چندین مولد انرژی در سیستم‌های ترکیبی، این سیستم‌ها بسیار پیچیده بوده و نیازمند آنالیز و بررسی بسیار دقیقی هستند. این موضوع مستلزم داشتن یک مدل مناسب و همچنین یک ابزار (نرم‌افزار) جهت طراحی، آنالیز، بهینه‌سازی و مباحث اقتصادی است. تاکنون الگوریتم‌ها، روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی جهت انجام امکان‌سنجی

الکتریکی یک کاربرد مستقل از شبکه توسط نرم‌افزار HOMER را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، بهترین ترکیب سیستم انرژی تجدیدپذیر، سیستم فتوولتائیک/باتری است که NPC آن برابر با ۸۱۷۳ دلار و COE آن برابر با ۰/۵۴۶ دلار بر کیلووات است. همچنین، آنالیز حساسیت نشان داد که تغییرات سرعت باد بین سه تا شش متر بر ثانیه تأثیری بر روی NPC و COE ندارد.

در این مطالعه امکان‌سنجی فنی و اقتصادی یک سیستم تولید توان ترکیبی شامل خورشید/باد/دیزل ژنراتور برای تأمین انرژی مورد نیاز یک مجموعه دورافتاده و دور از شبکه برق‌رسانی عمومی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است بطوریکه در نظر گرفتن معیارهای هزینه و آلودگی محیط زیست، سیستم تولید توان بهینه نهایی انتخاب شده است. برای شبیه‌سازی سیستم مورد نظر از نرم‌افزار هومر استفاده شده است و همچنین از روش انتروپی نیز برای وزن‌دهی به معیارها و از روش TOPSIS به عنوان روش‌های اولویت بندی و تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین سیستم استفاده شده است.

روش وزن‌دهی انتروپی

ایده اصلی این روش آن است که هر چه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است. به عبارتی وقایع با احتمال وقوع زیاد، اطلاعات کمتری در اختیار می‌گذارند و برعکس هرچه قدر احتمال وقوع یک رخداد کمتر باشد، اطلاعات حاصل از آن بیشتر است. با به‌دست آوردن اطلاعات جدید، در واقع عدم قطعیت‌ها کاهش یافته و ارزش اطلاعات جدید برابر با مقداری است که از عدم قطعیت کاسته شده است. در نتیجه عدم قطعیت و اطلاعات، پارامترهایی وابسته به هم هستند.

$$X = [x_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1m-1} & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2m-1} & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{nm-1} & x_{nm} \end{bmatrix}$$

با تقسیم هر درایه به مجموع مقادیر ستون مربوطه، ماتریس فوق نرمال می‌شود. سپس محاسبه انتروپی هر شاخص انجام می‌شود. برای این منظور، انتروپی E_j به صورت زیر محاسبه می‌گردد و k به عنوان مقدار ثابت مقدار E_j را بین صفر و یک نگه می‌دارد.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \times \ln P_{ij}$$

که در آن $P(x)$ توزیع احتمال متغیر تصادفی X است. افزایش در انتروپی باعث افزایش عدم اطمینان و کاهش اطلاعات در مورد دانش متغیر تصادفی می‌شود. جنبه جالب دیگر انتروپی ویژگی حداکثر انتروپی آن برای توزیع یکنواخت است.

در گام بعدی، مقدار d_j (درجه انحراف) مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود که بیان می‌کند شاخص مربوطه (d_j) چه میزان اطلاعات مفید برای تصمیم‌گیری در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌دهد. هر چه مقادیر اندازه‌گیری شده شاخصی به هم نزدیک باشند، نشان‌دهنده

اولیه، بهینه‌سازی و آنالیز حساسیت سیستم‌های مختلف ترکیبی ارائه شده‌اند.

رحمان و همکاران [۱] امکان تولید برق با استفاده از یک سیستم فتوولتائیک/باد/دیزل ژنراتور برای یک روستا در پاکستان را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در مطالعه خود نشان دادند که سیستم مورد مطالعه می‌تواند تا ۶۹ درصد گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. همچنین رحمان و همکاران [۲] نیز یک سیستم ترکیبی باد/فتوولتائیک/باتری را برای پمپاژ آب در برخی از مناطق عربستان سعودی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه هزینه‌های پمپاژ آب زیرزمینی برای مناطق مورد نظر نیز محاسبه شده است. رودریگز و همکارانش [۳] نیز یک روش جدید برای اندازه‌یابی و جایابی بهینه یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل ژنراتور/باتری برای یک کاربرد مستقل از شبکه توسعه دادند. سیلوا و همکارانش [۴] مطالعه ای بر استفاده از پنل‌های خورشیدی و پیل سوختی برای تأمین پیوسته توان الکتریکی مناطقی از برزیل ارائه کرده‌اند. از پیل سوختی برای تبدیل هیدروژن تولید شده از الکترولیز برق اضافی پنل‌های خورشیدی، به انرژی الکتریکی زمانی که خورشید در دسترس نیست استفاده می‌شود. ارگلو و همکارانش [۵] سیستم فتوولتائیک/باد/پیل سوختی را برای تأمین بار مورد نیاز یک خانه متحرک مورد استفاده قرار دادند. این سیستم بار مورد نیاز را حتی در پیک مصرف تأمین می‌کند. پنل‌های خورشیدی و توربین باد بعنوان منابع اصلی انرژی و پیل سوختی بعنوان سیستم ذخیره و پشتیبان عمل می‌کنند. کالدرن و همکارانش [۶] یک سیستم ترکیبی باد/سلول خورشیدی با سیستم ذخیره هیدروژنی را آنالیز انرژی کرده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که الکترولیزر راندمان انرژی قابل قبول ۷۵/۶۸٪ را دارد اما فوتو راندمان انرژی بسیار پایین ۳۹/۷،۸ را دارا می‌باشد. حسینی و همکارانش [۷] سیستم ترکیبی فتوولتائیک/الکترولیز آب را برای یک منطقه دورافتاده به منظور تأمین همزمان برق و حرارت پیشنهاد کرده‌اند. در این مقاله از یک پیل سوختی اکسید جامد برای تبدیل هیدروژن به برق استفاده شده و از حرارت تولیدی در پیل برای گرمایش استفاده شده است.

قاسمی و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۳ یک آنالیز فنی و اقتصادی را برای یک سیستم انرژی هیبریدی مجزا از شبکه جهت تأمین انرژی مورد نیاز روستا خاور بالا واقع در استان خراسان جنوبی انجام دادند. با توجه به منابع انرژی موجود در آن روستا، یک سیستم هیبریدی فتوولتائیک-دیزل-باتری جهت تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز ساکنین انتخاب شد. لایو و همکارانش [۹] پتانسیل استفاده از سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل را برای استفاده در مناطق دورافتاده مالزی آنالیز کردند. در این مطالعه از نرم افزار هومر برای امکان‌سنجی استفاده شده است و برتری سیستم ترکیبی بر سیستم دیزل به تنهایی را برای مقادیر متفاوت تابش و قیمت سوخت دیزل مورد بررسی قرار گرفته است. هراتیان و همکارانش [۱۰] آنالیز امکان‌سنجی فنی اقتصادی برای یافتن بهترین آرایش سیستم ترکیبی تولید توان شامل منابع فتوولتائیک/باد/باتری به منظور تأمین توان



$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix}$$

در گام بعد، برای هر شاخص یک ایده‌آل مثبت (+A) و یک ایده‌آل منفی محاسبه می‌شود.

- برای معیارهایی که بار مثبت دارند ایده‌آل مثبت بزرگترین مقدار آن معیار است.
- برای معیارهایی که بار مثبت دارند ایده‌آل منفی کوچکترین مقدار آن معیار است.
- برای معیارهایی که بار منفی دارند ایده‌آل مثبت کوچکترین مقدار آن معیار است.
- برای معیارهایی که بار منفی دارند ایده‌آل منفی بزرگترین مقدار آن معیار است.

سپس میزان نزدیکی نسبی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل حساب می‌شود. فاصله اقلیدسی هر گزینه از ایده‌آل مثبت و منفی با فرمول زیر محاسبه خواهد شد. گام نهائی محاسبه راه‌حل ایده‌آل است. در این گام میزان نزدیکی نسبی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

$$CL_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}$$

مقدار CL بین صفر و یک است. هرچه این مقدار به یک نزدیکتر باشد راه‌کار به جواب ایده‌آل نزدیکتر است و راه‌کار بهتری می‌باشد.

بار مصرفی

اولین قدم در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک سیستم تولید توان ترکیبی، داشتن تقاضای بار یا انرژی است که بر اساس آن بتوان ساختار سیستم ترکیبی را تعیین کرد. برای این منظور از اطلاعات بار مصرفی یک مجموعه که توسط کنتورهای برق بطور ساعتی ثبت شده‌اند استفاده می‌گردد. برای نمایش بهتر داده‌های مصرف انرژی، نمودار تغییرات میانگین مصرف بار و درصد تغییرات آن در قالب نمودارهای شمعی به ازای هر ماه بطور جداگانه در شکل ۱ نمایش داده شده است.

آنست که گزینه‌های رقیب از نظر آن شاخص تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

$$d_j = 1 - E_j$$

لذا نقش آن شاخص در تصمیم‌گیری باید به همان اندازه کاهش یابد. در گام آخر نیز مقدار وزن W_j محاسبه می‌گردد. در واقع وزن معیار برابر با هر d_j تقسیم بر مجموع d_j ها می‌باشد.

$$w_j = d_j / \sum d_j$$

روش TOPSIS

واژه 'TOPSIS' به معنی روش‌های ترجیح براساس مشابهت به راه حل ایده‌آل است. منطق زیربنایی این روش، راه‌حل ایده‌آل (مثبت) و راه‌حل ایده‌آل منفی را تعریف می‌کند. راه حل ایده‌آل (مثبت) راه حلی است که معیار سود را افزایش و معیار هزینه را کاهش می‌دهد. گزینه بهینه، گزینه‌ای است که کمترین فاصله از راه حل ایده‌آل و در عین حال دورترین فاصله از راه حل ایده‌آل منفی دارد. در رتبه‌بندی گزینه‌ها به روش TOPSIS گزینه‌هایی که بیشترین تشابه را با راه‌حل ایده‌آل داشته باشند، رتبه بالاتری کسب می‌کنند. نخستین گام در این تکنیک تشکیل ماتریس تصمیم است. ماتریس تصمیم‌گیری یک ماتریس برای ارزیابی تعدادی گزینه براساس تعدادی معیار است. یعنی ماتریسی که در آن هر گزینه براساس تعدادی معیار امتیازدهی شده است. ماتریس تصمیم با X و هر درایه آن با x_{ij} نشان داده می‌شود.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

نرمال سازی یا بی مقیاس سازی دومین گام در حل تمامی تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر ماتریس تصمیم است. در تکنیک تاپسیس از نرمال سازی به روش برداری صورت می‌گیرد.

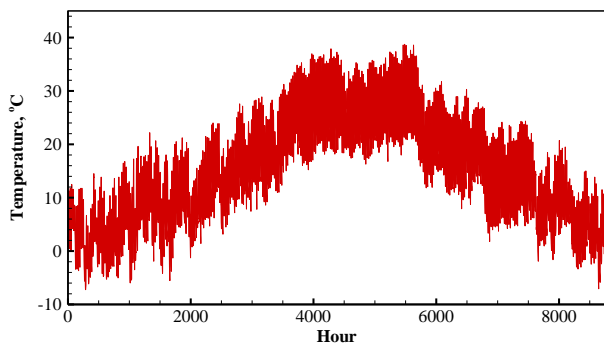
$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

خروجی این مرحله به صورت ماتریس نرمال زیر نمایش داده می‌شود:

$$N = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1n} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{m1} & n_{m2} & \dots & n_{mn} \end{bmatrix}$$

در گام بعد، باید ماتریس تصمیم نرمال ایجاد شده، موزون شود. برای این منظور وزن هر معیار در تمامی درایه‌های زیر همان معیار ضرب می‌شود. وزن معیارها باید از قبل مشخص شود. برای این منظور از تکنیک آنتروپی استفاده می‌شود.

¹ Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution



شکل ۴: نحوه تغییرات دما در منطقه مورد مطالعه بصورت ساعتی و میانگین ماهانه

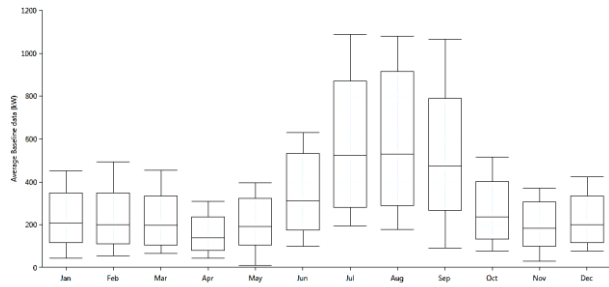
تجهیزات و پارامترهای اقتصادی

برای تامین انرژی از منبع انرژی خورشیدی، از پنل‌های فتوولتائیک استفاده شده است. مشخصات پنل مورد استفاده به همراه پارامترهای فنی و اقتصادی آن در جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر است که در محاسبات انجام شده، فرض بر این است که پنل خورشید بر روی پایه‌های ثابت نصب شده و شیب ثابتی دارند. به عبارتی دیگر از دنبال‌کننده استفاده نشده است. یکی دیگر از مواردی که در محاسبات مربوط به پنل‌های فتوولتائیک باید همواره مدنظر قرار گیرد، اثر دما بر راندمان پنل فتوولتائیک است، بطوری که با فاصله گرفتن از دمای نامی پنل، راندمان آن کاهش می‌یابد. لذا در شبیه‌سازی انجام شده، اثر این کاهش راندمان برحسب دمای هوای محیط که در شکل ۴ ارائه شد، اعمال شده است.

جدول ۱: مشخصات پنل فتوولتائیک

| پارامترهای فنی و عملکردی | |
|-----------------------------|----------------------|
| راندمان | ٪ ۱۶،۴۵ |
| طول عمر | ۲۵ سال |
| دمای عملکرد نامی | ۲۵ درجه سانتی‌گراد |
| ضریب کاهش توان | ٪ ۰،۹۰ |
| ضریب کاهش راندمان برحسب دما | ۰،۳ |
| نوع جریان خروجی | جریان مستقیم |
| پارامترهای اقتصادی | |
| هزینه خرید اولیه | ۴۴۲ دلار بر کیلووات |
| هزینه جایگزینی | ۴۴۲ دلار بر کیلو وات |
| هزینه تعمیرات و نگهداری | ۱۰ دلار در سال |

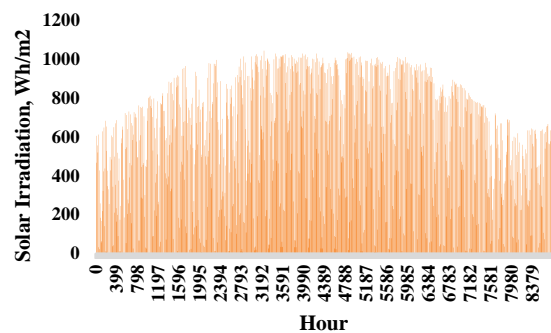
با توجه به پتانسیل بسیار خوب انرژی بادی و همچنین افزایش قابلیت اطمینان سیستم تولید توان، از توربین بادی نیز برای تولید توان استفاده شده است. مشخصات توربین بادی مورد استفاده به همراه پارامترهای فنی و اقتصادی آن در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین بر طبق مشخصات ارائه شده توسط کارخانه تولیدی، نمودار



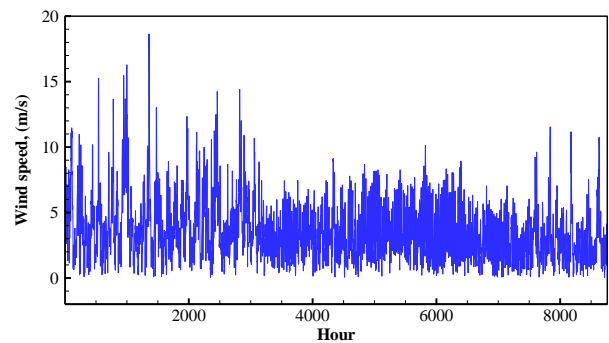
شکل ۱: نمودار بار مورد نیاز بصورت ماهانه

منابع انرژی

با توجه به شرایط حساس مجموعه مورد مطالعه، نیاز است که انرژی آن بصورت مستقل از شبکه تامین گردد. برای این منظور ابتدا باید بررسی کرد که چه منابع انرژی در دسترس هستند. با توجه به شرایط اقلیمی منطقه مورد نظر، انرژی خورشیدی، انرژی باد و همچنین سوخت گازوئیل قابل دسترس هستند. بنابراین بر اساس این منابع، تجهیزات مورد نظر که در حال حاضر امکان دسترسی به آنها وجود دارد مشخص می‌شوند که در بخش بعدی با جزئیات کامل بیان شده اند. با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه داده‌های تابش خورشیدی، سرعت وزش باد در ارتفاع ۸ متر و همچنین دمای محیط در ارتفاع ۲ متر برای ۵ سال اخیر اندازه‌گیری شده و میانگین ساعتی آن برای ۸۷۶۰ ساعت تعیین شده و مورد استفاده قرار گرفته است که در شکل‌های زیر ارائه شده‌اند.



شکل ۲: نحوه تغییرات تابش خورشیدی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۳: نحوه تغییرات سرعت وزش باد در منطقه مورد مطالعه



دیزل ژنراتور از نوع جریان متناوب است. لذا با توجه به اینکه بار مصرفی از نوع جریان متناوب است، باید از یک مبدل جریان استفاده نمود که بتوان جریان مستقیم را به جریان متناوب تبدیل کرد. برای این منظور مشخصات مبدل جریان مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است.

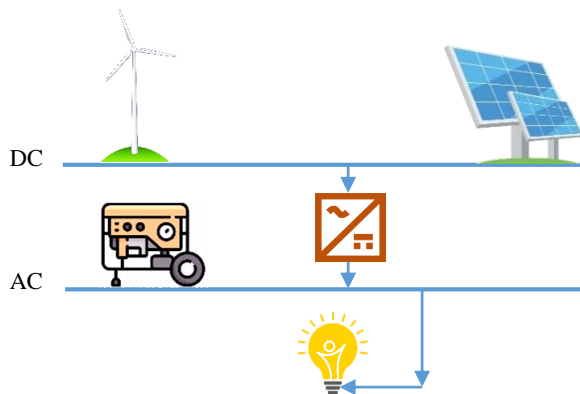
جدول ۴: مشخصات مبدل جریان

| | |
|-------------------------|-----------|
| توان نامی | ۱ کیلووات |
| طول عمر | ۱۵ سال |
| راندمان | ٪۹۵ |
| هزینه خرید اولیه | ۱۰۰ دلار |
| هزینه جایگزینی | ۱۰۰ دلار |
| هزینه تعمیرات و نگهداری | ندارد |

نتایج

همانطور که بیان شد، امکان دسترسی به سوخت دیزل وجود دارد و در نتیجه از ژنراتور دیزل برای تولید انرژی در طول شب استفاده می‌گردد. نحوه کارکرد توربین ژنراتور به این صورت است که در صورت عدم توانایی توربین باد و پنل خورشید در تامین انرژی، ژنراتور روشن شده و انرژی مورد نیاز را تامین می‌کند. همچنین در مواقعی که انرژی از منابع باد و خورشید تامین می‌گردد، ژنراتور خاموش بوده و انرژی تولید نمی‌کند.

شماتیک سیستم ترکیبی مورد نظر در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، توربین باد و پنل خورشیدی انرژی را با جریان مستقیم تولید کرده که برای استفاده از آن از یک مبدل جریان استفاده می‌شود.



شکل ۶: شماتیک سیستم ترکیبی باد/خورشید/دیزل ژنراتور

نتایج شبیه‌سازی برای ترکیب فوق نشان می‌دهد که بهترین سیستم از لحاظ اقتصادی شامل تجهیزاتی بصورت زیر است.

جدول ۵: مشخصات مبدل جریان نتایج بهینه‌سازی اقتصادی برای

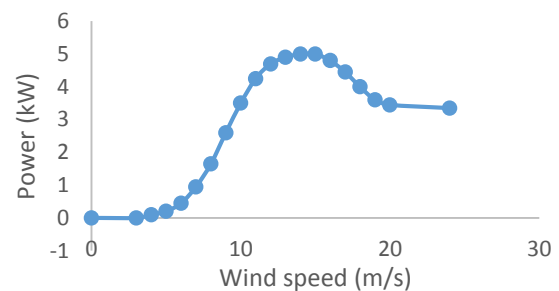
سیستم ترکیبی در سناریو اول

| | | | | |
|-------------|------------|------------|--------------|-----------------|
| پنل خورشیدی | توربین باد | مبدل جریان | دیزل ژنراتور | هزینه خالص جاری |
| ۱۰ کیلووات | ۱ عدد | ۲ کیلووات | ۱ عدد | ۲۹/۳ دلار |

تغییرات توان تولیدی توربین بر حسب سرعت وزش باد مطابق شکل ۳ است.

جدول ۲: مشخصات توربین بادی

| پارامترهای فنی و عملکردی | |
|--------------------------|-----------------|
| ارتفاع پایه توربین | ۱۲ متر |
| طول عمر | ۲۰ سال |
| توان نامی | ۵ کیلووات |
| نوع جریان خروجی | جریان مستقیم |
| پارامترهای اقتصادی | |
| هزینه خرید اولیه | ۳۰۰۰ دلار |
| هزینه جایگزینی | ۳۰۰۰ دلار |
| هزینه تعمیرات و نگهداری | ۱۰۰ دلار در سال |



شکل ۵: نحوه تغییرات توان تولیدی توربین باد بر حسب سرعت وزش باد علاوه بر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و خورشید، از منابع انرژی تجدیدناپذیر مانند سوخت‌های فسیلی نیز می‌توان برای تولید انرژی در مجموعه مورد نظر استفاده نمود. برای این منظور از سوخت دیزل در ژنراتورهای دیزل استفاده شده و بخشی از انرژی مورد نیاز توسط آن تامین شده است. از مزایای دیزل ژنراتورها، تامین انرژی در مواقعی است که دسترسی به منابع تجدیدپذیر کم می‌شود مانند شب‌ها که انرژی خورشیدی در دسترسی نیست و وزش باد نیز وجود ندارد. مشخصات فنی و اقتصادی دیزل ژنراتور مورد استفاده در این مجموعه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات دیزل ژنراتور

| | |
|-------------------------|------------------------------------|
| توان نامی | ۵ کیلووات |
| طول عمر ژنراتور | ۱۵۰۰۰ ساعت |
| هزینه خرید اولیه | ۱۲۰۰ دلار |
| هزینه جایگزینی | ۱۲۰۰ دلار |
| هزینه تعمیرات و نگهداری | ۰/۳ دلار به ازای هر ساعت کارکرد |
| میزان مصرف سوخت | ۰/۲۸۶ لیتر به ازای هر کیلووات ساعت |
| هزینه سوخت مصرفی | ۰/۱ دلار بر لیتر |

یک از مواردی که در سیستم‌های تولید توان ترکیبی باید همواره به آن توجه داشت، نوع جریان خروجی از تجهیزات و همچنین نوع جریان مورد نیاز برای تامین انرژی مجموعه مورد مطالعه است. جریان خروجی از برخی تجهیزات مانند پیل سوختی، توربین بادی و پنل خورشیدی از نوع جریان مستقیم است در حالی که جریان خروجی از

جدول ۶: نتایج بهینه‌سازی اقتصادی برای سیستم ترکیبی

| ردیف | DG (kW) | توربین بادی | پنل kW | سوخت مصرفی (لیتر) | هزینه خالص جاری | ساختار سیستم |
|------|---------|-------------|--------|-------------------|-----------------|--------------|
| ۱ | ۵ | ۰ | ۰ | ۱۱۷۵ | ۳۴۹۸۶ | DG |
| ۲ | ۵ | ۰ | ۱۰ | ۵۱۵ | ۲۷۱۳۵ | PV-DG |
| ۳ | ۵ | ۰ | ۱۲ | ۵۱۰ | ۲۷۳۷۷ | PV-DG |
| ۴ | ۵ | ۰ | ۸ | ۵۱۹ | ۲۷۵۱۰ | PV-DG |
| ۵ | ۵ | ۰ | ۱۴ | ۵۰۸ | ۲۷۹۲۸ | PV-DG |
| ۶ | ۵ | ۰ | ۶ | ۵۵۳ | ۲۸۳۲۱ | PV-DG |
| ۷ | ۵ | ۰ | ۱۶ | ۵۰۶ | ۲۸۶۵۶ | PV-DG |
| ۸ | ۵ | ۰ | ۱۸ | ۵۰۵ | ۲۹۵۰۵ | PV-DG |
| ۹ | ۵ | ۰ | ۴ | ۵۶۲ | ۳۰۰۹۳ | PV-DG |
| ۱۰ | ۵ | ۰ | ۲۰ | ۵۰۴ | ۳۰۳۷۴ | PV-DG |
| ۱۱ | ۵ | ۰ | ۲ | ۵۹۲ | ۳۴۸۸۸ | PV-DG |
| ۱۲ | ۵ | ۱ | ۰ | ۸۵۴ | ۳۵۶۶۸ | Wind-DG |
| ۱۳ | ۵ | ۲ | ۰ | ۷۴۹ | ۳۷۷۴۳ | Wind-DG |
| ۱۴ | ۵ | ۳ | ۰ | ۶۹۲ | ۴۰۱۴۰ | Wind-DG |
| ۱۵ | ۵ | ۴ | ۰ | ۶۵۶ | ۴۲۸۶۶ | Wind-DG |
| ۱۶ | ۵ | ۵ | ۰ | ۶۳۱ | ۴۵۷۷۴ | Wind-DG |
| ۱۷ | ۵ | ۶ | ۰ | ۶۱۳ | ۴۸۸۱۶ | Wind-DG |
| ۱۸ | ۵ | ۸ | ۰ | ۵۸۸ | ۵۵۵۰۸ | Wind-DG |
| ۱۹ | ۵ | ۹ | ۰ | ۵۷۹ | ۵۸۹۳۲ | Wind-DG |
| ۲۰ | ۵ | ۱۰ | ۰ | ۵۷۲ | ۶۲۴۲۴ | Wind-DG |
| ۲۱ | ۵ | ۱۵ | ۰ | ۵۴۹ | ۸۰۸۲۵ | Wind-DG |
| ۲۲ | ۵ | ۲۰ | ۰ | ۵۳۷ | ۹۹۹۰۲ | Wind-DG |
| ۲۳ | ۵ | ۱ | ۱۰ | ۴۴۶ | ۲۹۲۹۵ | PV-Wind-DG |
| ۲۴ | ۵ | ۱ | ۸ | ۴۴۷ | ۲۹۳۴۲ | PV-Wind-DG |
| ۲۵ | ۵ | ۱ | ۱۲ | ۴۴۴ | ۲۹۷۴۱ | PV-Wind-DG |
| ۲۶ | ۵ | ۱ | ۱۴ | ۴۴۳ | ۳۰۴۰۳ | PV-Wind-DG |
| ۲۷ | ۵ | ۱ | ۱۶ | ۴۴۳ | ۳۱۲۶۲ | PV-Wind-DG |
| ۲۸ | ۵ | ۱ | ۱۸ | ۴۴۲ | ۳۲۱۳۳ | PV-Wind-DG |
| ۲۹ | ۵ | ۲ | ۸ | ۴۲۱ | ۳۲۳۱۱ | PV-Wind-DG |
| ۳۰ | ۵ | ۲ | ۱۰ | ۴۲۰ | ۳۲۴۱۱ | PV-Wind-DG |
| ۳۱ | ۵ | ۲ | ۱۲ | ۴۱۹ | ۳۲۹۲۶ | PV-Wind-DG |
| ۳۲ | ۵ | ۱ | ۲۰ | ۴۴۱ | ۳۳۰۵۷ | PV-Wind-DG |
| ۳۳ | ۵ | ۲ | ۱۴ | ۴۱۸ | ۳۳۷۰۸ | PV-Wind-DG |
| ۳۴ | ۵ | ۲ | ۱۶ | ۴۱۷ | ۳۴۵۸۲ | PV-Wind-DG |
| ۳۵ | ۵ | ۳ | ۸ | ۴۰۵ | ۳۵۴۴۹ | PV-Wind-DG |
| ۳۶ | ۵ | ۲ | ۱۸ | ۴۱۷ | ۳۵۴۷۹ | PV-Wind-DG |
| ۳۷ | ۵ | ۳ | ۱۰ | ۴۰۴ | ۳۵۷۱۵ | PV-Wind-DG |
| ۳۸ | ۵ | ۳ | ۱۲ | ۴۰۳ | ۳۶۲۶۰ | PV-Wind-DG |
| ۳۹ | ۵ | ۲ | ۲۰ | ۴۱۶ | ۳۶۴۰۲ | PV-Wind-DG |
| ۴۰ | ۵ | ۳ | ۱۴ | ۴۰۲ | ۳۷۰۶۶ | PV-Wind-DG |
| ۴۱ | ۵ | ۳ | ۱۶ | ۴۰۲ | ۳۸۰۱۷ | PV-Wind-DG |

قابل ذکر است که در محاسبات فوق قیدها و محدودیت‌های مختلفی نیز در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال با توجه به شرایط موجود فقط امکان استفاده از یک ژنراتور دیزل ۵ کیلوواتی وجود دارد. همچنین در محاسبات، فرض شده است که دیزل ژنراتور فقط مواقعی که کمبود بار وجود داشته باشد، شروع بکار کرده و مقدار کمبود بار را جبران کرده و در سایر مواقع خاموش است. همچنین فرض شده است که برای انرژی بادی ۵۰ درصد، انرژی خورشیدی ۸۰ درصد و همچنین برای کل بار مصرفی ۱۰ درصد بار رزور در هر بازه زمانی در نظر گرفته شود. به عبارتی دیگر اگر به علت کاهش میزان تابش خورشید در روزهای ابری میزان توان تولیدی توسط پنل خورشیدی تا ۸۰ درصد نیز کاهش یابد، باز هم سیستم بتواند بار مورد نیاز را تامین کند. همچنین برای توربین باد نیز تا ۵۰ درصد کاهش و بطور کلی برای کل بار مصرفی در هر بازه زمانی تا ۱۰ درصد افزایش بار مصرفی توسط سیستم قابل تولید باشد. به عبارتی دیگر این ضرایب و مقادیر اگر چه هزینه سیستم را افزایش می‌دهند اما قابلیت اطمینان سیستم نیز تا حد بسیار خوبی افزایش می‌یابد. یکی دیگر از نکاتی که باید به آن توجه داشت هزینه برگشتی ناشی از فروش وسایل اسقاط شده است که در انتهای عمر سیستم، این مقدار از هزینه‌های سیستم کسر می‌شود و مانند درآمد برای سیستم محسوب می‌گردد.

یکی از معضلات موجود در مجموعه مورد نظر بحث میزان مصرف سوخت است. با توجه به اینکه ممکن است در شرایط بحرانی امکان دسترسی به سوخت نباشد لذا یکی از اهداف مساله این است که سیستمی انتخاب شود که مصرف سوخت کمتری داشته باشد و در نتیجه قابلیت اطمینان سیستم از دیدگاه مجموعه مورد نظر بالاتر رود. اما مشکلی که وجود دارد این است که نمی‌توان بطور دقیق یک ساختار پیدا کرد که همه این معیارها را داشته باشد. زیرا کاهش مصرف سوخت یعنی کاهش توان دیزل ژنراتور و اضافه کردن تجهیزات دیگر که هزینه سیستم را افزایش می‌دهند. لذا این دو معیار در تناقض با هم دیگر هستند. برای بررسی بهتر این موضوع و همچنین تصمیم‌گیری بهتر در این مورد، ترکیب‌های مختلفی از تجهیزات فوق در نظر گرفته شده و با استفاده از آنها میزان مصرف سوخت و همچنین هزینه خالص جاری سیستم محاسبه شده است. نتایج بدست آمده از ترکیب‌های مختلف در جدول ۶ نشان می‌دهد که کاهش مصرف سوخت با افزایش هزینه‌های سیستم همراه است.

همانطور که از جدول و نمودار فوق مشاهده می‌گردد، در ترکیب‌های مختلف، میزان مصرف سوخت و هزینه خالص جاری سیستم بسیار متفاوت بوده و همچنین بطور کلی می‌توان گفت تقریباً افزایش قیمت با کاهش مصرف سوخت همراه است. با توجه به اینکه گزینه‌های متفاوتی برای ساختار سیستم ترکیبی و همچنین معیارهای تصمیم‌گیری مختلف وجود دارد، لذا انتخاب سیستم مورد نظر مشکل و پیچیده است. برای حل این مشکل، بهترین راه استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. لذا برای انتخاب سیستم مورد نظر، ابتدا با استفاده از روش وزن‌دهی انتروپی، به دو معیار مورد نظر وزن‌های مختلف داده شده و سپس با استفاده از روش TOPSIS



جدول ۸: رتبه‌بندی سیستم‌های ترکیبی بر اساس روش TOPSIS

| رتبه | ساختار سیستم | هزینه خالص جاری | سوخت مصرفی (لیتر) | پنل kW | توربین بادی | DG (kW) |
|------|--------------|-----------------|-------------------|--------|-------------|---------|
| ۲۳ | PV-Wind-DG | ۲۹۲۹۵ | ۴۴۶ | ۱۰ | ۱ | ۵ |
| ۲۴ | PV-Wind-DG | ۲۹۳۴۲ | ۴۴۷ | ۸ | ۱ | ۵ |
| ۲۵ | PV-Wind-DG | ۲۹۷۴۱ | ۴۴۴ | ۱۲ | ۱ | ۵ |
| ۲۶ | PV-Wind-DG | ۳۰۴۰۳ | ۴۴۳ | ۱۴ | ۱ | ۵ |
| ۲۷ | PV-Wind-DG | ۳۱۲۶۲ | ۴۴۳ | ۱۶ | ۱ | ۵ |
| ۳ | PV-DG | ۲۷۳۷۷ | ۵۱۰ | ۱۲ | ۰ | ۵ |
| ۵ | PV-DG | ۲۷۹۲۸ | ۵۰۸ | ۱۴ | ۰ | ۵ |
| ۷ | PV-DG | ۲۸۶۵۶ | ۵۰۶ | ۱۶ | ۰ | ۵ |
| ۲ | PV-DG | ۲۷۱۳۵ | ۵۱۵ | ۱۰ | ۰ | ۵ |
| ۴ | PV-DG | ۲۷۵۱۰ | ۵۱۹ | ۸ | ۰ | ۵ |
| ۸ | PV-DG | ۲۹۵۰۵ | ۵۰۵ | ۱۸ | ۰ | ۵ |
| ۲۹ | PV-Wind-DG | ۳۳۳۱۱ | ۴۲۱ | ۸ | ۲ | ۵ |
| ۲۸ | PV-Wind-DG | ۳۳۱۳۳ | ۴۴۲ | ۱۸ | ۱ | ۵ |
| ۳۰ | PV-Wind-DG | ۳۳۴۱۱ | ۴۲۰ | ۱۰ | ۲ | ۵ |
| ۱۰ | PV-DG | ۳۰۳۷۴ | ۵۰۴ | ۲۰ | ۰ | ۵ |
| ۳۱ | PV-Wind-DG | ۳۲۹۲۶ | ۴۱۹ | ۱۲ | ۲ | ۵ |
| ۳۲ | PV-Wind-DG | ۳۳۰۵۷ | ۴۴۱ | ۲۰ | ۱ | ۵ |
| ۶ | PV-DG | ۲۸۳۲۱ | ۵۵۳ | ۶ | ۰ | ۵ |
| ۳۳ | PV-Wind-DG | ۳۳۷۰۸ | ۴۱۸ | ۱۴ | ۲ | ۵ |
| ۹ | PV-DG | ۳۰۰۹۳ | ۵۶۲ | ۴ | ۰ | ۵ |
| ۳۴ | PV-Wind-DG | ۳۴۵۸۲ | ۴۱۷ | ۱۶ | ۲ | ۵ |
| ۳۵ | PV-Wind-DG | ۳۵۴۴۹ | ۴۰۵ | ۸ | ۳ | ۵ |
| ۳۶ | PV-Wind-DG | ۳۵۴۷۹ | ۴۱۷ | ۱۸ | ۲ | ۵ |
| ۳۷ | PV-Wind-DG | ۳۵۷۱۵ | ۴۰۴ | ۱۰ | ۳ | ۵ |
| ۳۸ | PV-Wind-DG | ۳۶۲۶۰ | ۴۰۳ | ۱۲ | ۳ | ۵ |
| ۳۹ | PV-Wind-DG | ۳۶۴۰۲ | ۴۱۶ | ۲۰ | ۲ | ۵ |
| ۴۰ | PV-Wind-DG | ۳۷۰۶۶ | ۴۰۲ | ۱۴ | ۳ | ۵ |
| ۴۱ | PV-Wind-DG | ۳۸۰۱۷ | ۴۰۲ | ۱۶ | ۳ | ۵ |
| ۱۱ | PV-DG | ۳۴۸۸۸ | ۵۹۲ | ۲ | ۰ | ۵ |
| ۱۳ | Wind-DG | ۳۷۷۴۳ | ۷۴۹ | ۰ | ۲ | ۵ |
| ۱۴ | Wind-DG | ۴۰۱۴۰ | ۶۹۲ | ۰ | ۳ | ۵ |
| ۱۵ | Wind-DG | ۴۲۸۶۶ | ۶۵۶ | ۰ | ۴ | ۵ |
| ۱۲ | Wind-DG | ۳۵۶۶۸ | ۸۵۴ | ۰ | ۱ | ۵ |
| ۱۶ | Wind-DG | ۴۵۷۷۴ | ۶۳۱ | ۰ | ۵ | ۵ |
| ۱۷ | Wind-DG | ۴۸۸۱۶ | ۶۱۳ | ۰ | ۶ | ۵ |
| ۱ | DG | ۳۴۹۸۶ | ۱۰۱۷۵ | ۰ | ۰ | ۵ |
| ۱۸ | Wind-DG | ۵۵۵۰۸ | ۵۸۸ | ۰ | ۸ | ۵ |
| ۱۹ | Wind-DG | ۵۸۹۳۲ | ۵۷۹ | ۰ | ۹ | ۵ |
| ۲۰ | Wind-DG | ۶۲۴۲۴ | ۵۷۲ | ۰ | ۱۰ | ۵ |
| ۲۱ | Wind-DG | ۸۰۸۲۵ | ۵۴۹ | ۰ | ۱۵ | ۵ |
| ۲۲ | Wind-DG | ۹۹۹۰۲ | ۵۳۷ | ۰ | ۲۰ | ۵ |

سیستم مورد نظر انتخاب می‌شود. ضرایب وزنی با استفاده از روش انتروپی برای این دو معیار بصورت زیر محاسبه می‌شود.

جدول ۷: ضرایب وزنی انتروپی برای سیستم‌های ترکیبی

| معیار | ضریب وزنی |
|------------|-----------|
| هزینه | ۰/۶۳۶۱۶ |
| سوخت مصرفی | ۰/۳۶۳۸۴ |

همانطور که از جدول ۷ مشاهده می‌گردد، ضریب وزنی مربوط به معیار هزینه عدد بالاتری دارد که این موضوع به دلیل نوسان یا پراکندگی بیشتر داده‌های هزینه نسبت به سوخت مصرفی است. پس از محاسبه ضرایب وزنی، می‌توان با روش‌های مختلف، ساختارهای موردنظر را رتبه‌بندی کرده و در نتیجه بهترین سیستم را انتخاب کرد. برای این منظور نتایج بدست آمده از روش TOPSIS در جدول ۸ ارائه شده است.

همانطور که از نتایج فوق مشاهده می‌گردد، طبق روش تصمیم‌گیری، سیستم ترکیبی شماره ۲۳ شامل ۱۰ کیلووات پنل خورشیدی، یک توربین بادی، یک ژنراتور دیزل و یک کیلووات مبدل جریان به عنوان بهترین سیستم انتخاب شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، ترکیب‌هایی وجود دارند که هزینه کمتری نسبت به ترکیب منتخب دارند. از طرفی دیگر ترکیب‌های دیگری هم هستند که میزان سوخت کمتری نسبت به ترکیب منتخب دارند. اما با توجه به معیارهای موردنظر و پراکندگی داده‌ها، سیستم شماره ۲۳ بهترین گزینه برای مجموعه مورد نظر بر حسب معیارهای هزینه و سوخت مصرفی است. برای تحلیل بهتر سیستم منتخب، در ادامه مصرف سوخت، هزینه‌ها و سایر جزئیات سیستم ارائه شده است. در جدول ۹ هزینه‌های سیستم منتخب به تفکیک اجرا و به تفکیک نوع هزینه‌ها ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، بخشی از هزینه‌های سیستم به دلیل فروش تجهیزات اسقاط شده به عنوان درآمد برای سیستم در نظر گرفته شده است. اما با توجه به اینکه طول عمر توربین باد با طول عمر سیستم ترکیبی برابر بوده، هزینه اسقاطی برای توربین باد صفر محاسبه شده است. همچنین در شکل ۷ میزان توان تولیدی توسط دیزل ژنراتور و پنل‌های خورشیدی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، نحوه تولید توان در این دو تجهیز برخلاف همدیگر است، بطوری که در طول روز و در ساعات پیک تابش خورشیدی، انرژی مورد نیاز توسط پنل‌ها تولید شده و ژنراتور خاموش بوده است. اما در طول شب که تابش خورشید صفر بوده، ژنراتور دیزل روشن بوده و بخش زیادی از انرژی مورد نیاز را تامین کرده است. همچنین در شکل ۸ میزان الکتریسیته تولید توسط تجهیزات مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، بخش زیادی از انرژی مورد نیاز توسط پنل‌های خورشیدی تولید شده است. دلیل اصلی این اتفاق، در نظر گرفتن ضریب ۸۰ درصد برای رزرو در سیستم خورشیدی است. به عبارتی دیگر با توجه به این محدودیت، سیستم بگونه‌ای طراحی شده است که اگر در هر لحظه ۸۰ درصد از تابش خورشید کاهش یابد، مشکلی در تامین انرژی رخ ندهد. بنابراین در

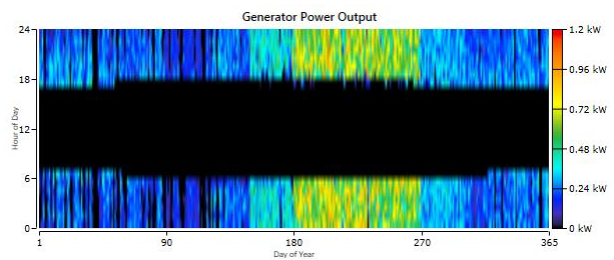
مراجع

- [1] Rehman, S.U., Rehman, S., Qazi, M.U., Shoaib, M. & Lashin, A. 2016. Feasibility study of hybrid energy system for off-grid rural electrification in southern Pakistan. *Energy Exploration & Exploitation*, 34, 468-482.
- [2] [16] Rehman, S., Sahin, A.Z., 2016. A wind-solar PV hybrid power system with battery backup for water pumping in remote localities. *International Journal of Green Energy*, 13, 1075-1083.
- [3] Rodriguez-Gallegos, C.D., Gandhi, O., Yang, D., Alvarez-Alvarado, M.S., Zhang, W., Reindl, T., 2018. A Siting and Sizing Optimization Approach for PV-Battery-Diesel Hybrid Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54, 2637-2645.
- [4] Silva S.B., de Oliveira, M.A.G. & Severino M.M., 2010. Economic evaluation and optimization of a photovoltaic-fuel cell-batteries hybrid system for use in the Brazilian Amazon. *Energy Policy* 38, 6713-6723.
- [5] Eroglu, M., Dursun, E., Sevencan, S., Song, J., Yazici, S. & Kilic, O., 2011. A mobile renewable house using PV/wind/fuel cell hybrid power system. *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 7985-7992.
- [6] Calderon, M., Calderon, A.J., Ramiro, A., Gonzalez, J.F. & Gonzalez, I., 2011. Evaluation of a hybrid photovoltaic-wind system with hydrogen storage performance using exergy analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 5751-5762.
- [7] Hosseini, M., Dincer, I. & Rosen, M.A., 2013. Hybrid solar-fuel cell combined heat and power systems for residential applications: Energy and exergy analyses. *Journal of Power Sources*, 221, 372-380.
- [8] Ghasemi, A., Asrari, A., Zarif, M. & Abdelwahed, S., 2013. Techno-economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic-diesel-battery systems for rural electrification in eastern part of Iran - A step toward sustainable rural development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 456-462.
- [9] Lau, K.Y., Yousof, M.F.M., Arshad, S.N.M., Anwari, M. & Yatim, A.H.M., 2010. Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under Malaysian conditions. *Energy*, 35, 3245-3255.
- [10] Haratian, M., Tabibi, P., Sadeghi, M., Vaseghi, B. & Poustdouz, A., 2018. A renewable energy solution for stand-alone power generation: A case study of KhshU Site-Iran. *Renewable Energy*, 125, 926-935.

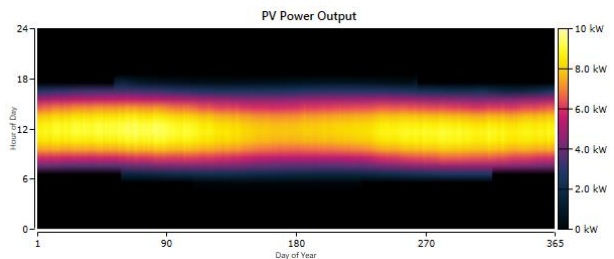
طول روز که تابش خورشید وجود دارد، میزان انرژی بیشتری توسط پنل‌های خورشیدی تولید شده است که در صورت عدم نیاز سیستم، این مقدار انرژی تلف می‌گردد. اگرچه با این کار هزینه بیشتری به سیستم تحمیل می‌گردد، اما قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد.

جدول ۹: هزینه سیستم منتخب باد/خورشید/دیزل ژنراتور

| اجزا سیستم | هزینه اولیه | هزینه جایگزینی | هزینه عملکرد | هزینه سوخت | هزینه اسقاط | هزینه کل |
|--------------|-------------|----------------|--------------|------------|-------------|-----------|
| دیزل ژنراتور | ۱,۲۰۰,۰۰ | ۳,۴۹۳,۹ | ۱۴,۸۱۱,۳ | ۴۴۲,۵ | ۹۸,۹۵ | ۱۹,۸۴۸,۸۶ |
| مبدل جریان | ۲۰۰,۰۰ | ۶۴,۴۴ | ۰,۰۰ | ۰,۰۰ | ۲۹,۴۵ | ۲۳۴,۹۹ |
| پنل خورشیدی | ۴,۴۲۰,۰۰ | ۰,۰۰ | ۹۹۳,۳۸ | ۰,۰۰ | ۱۹۵,۲ | ۵,۲۱۸,۱۳ |
| توربین بادی | ۳,۰۰۰,۰۰ | ۰,۰۰ | ۹۹۳,۳۸ | ۰,۰۰ | ۰,۰۰ | ۳,۹۹۳,۳۸ |
| کل سیستم | ۸,۸۲۰,۰۰ | ۳,۵۵۸,۳۶ | ۱۶,۷۹۸,۱ | ۴۴۲,۵ | ۳۲۳,۶۶ | ۲۹,۲۹۵,۳۶ |

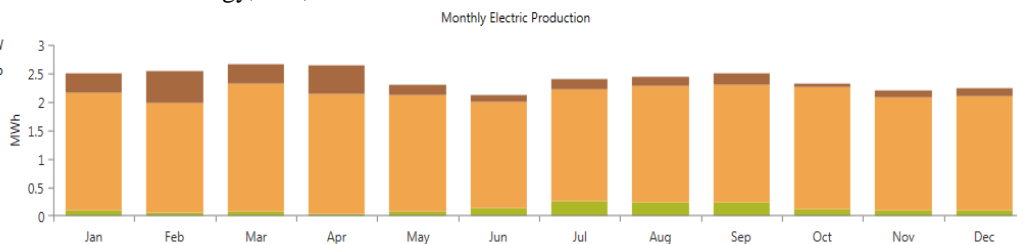


الف) ژنراتور دیزل



ب) پنل خورشیدی

شکل ۷: مقایسه میان‌گین توان خروجی ژنراتور و پنل خورشیدی در طول یک سال و در طی ۲۴ ساعت



شکل ۸: مقایسه الکتریسیته تولیدی توسط تجهیزات مختلف در سیستم منتخب

ACEC2021-53337

اندازه‌یابی چند هدفه یک سیستم ترکیبی منفصل از شبکه فتوولتائیک/دیزل ژنراتور /تلمبه ذخیره‌ای

سینا مخدومی کوبی^۱، علیرضا عسکرزاده^۲

^۱کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته- کرمان- ایران sina.makhdoomi@gmail.com

^۲دانشیار- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته- کرمان- ایران a.askarzadeh@kgut.ac.ir

چکیده

در این مقاله، اندازه‌یابی یک سیستم ترکیبی منفصل از شبکه شامل سلول‌های فتوولتائیک، سیستم تلمبه ذخیره‌ای و دیزل ژنراتور به منظور کاهش هزینه انرژی تراز شده و میزان آلاینده‌ی سوخت‌های فسیلی به وسیله بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، از سیستم ردیابی دو محوره استفاده و نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از پانل‌های فتوولتائیک نصب شده در زاویه استاندارد مقایسه شده است. عملکرد سیستم بدین صورت است که هنگامی که انرژی تولید شده توسط سلول‌های فتوولتائیک بیشتر از تقاضای بار الکتریکی باشد، انرژی اضافی تولیدی صرف پمپ کردن آب از چاه به تانک می‌شود و هنگامی که انرژی تولیدی توسط سلول‌های فتوولتائیک کوچکتر از تقاضای بار الکتریکی باشد، تامین کمبود توان توسط دیزل ژنراتور و یا از طریق رهاسازی آب از تانک به سمت توربین آبی صورت می‌گیرد. تعداد اجزای سیستم شامل پانل‌های فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و سیستم تلمبه ذخیره‌ای به‌عنوان متغیرهای تصمیم مساله در نظر گرفته شده است در حالی که هدف حداقل سازی هزینه تراز شده انرژی و آلاینده‌ی ناشی از سیستم است. جهت انجام بهینه‌سازی از نسخه چند هدفه الگوریتم جستجوی کلاغ استفاده شده است. نتایج حاصل نشان دهنده اهمیت توجه به مساله اندازه‌یابی بهینه در سیستم‌های ترکیبی است. **واژه‌های کلیدی:** اندازه‌یابی، بهینه‌سازی، سیستم تلمبه ذخیره‌ای، سیستم ترکیبی

محدود بودن ذخایر سوخت‌های فسیلی، وجود دارد. یک راه حل مناسب برای حل این معضل ترکیب سوخت‌های فسیلی با سایر منابع است. انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل مزایای اقتصادی و زیست محیطی آن‌ها، یکی از برجسته‌ترین این منابع به حساب می‌آیند. برای داشتن یک سیستم مقرون به صرفه با قابلیت اطمینان مطلوب اجزای مختلف نظیر سلول‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، دیزل ژنراتور و سیستم تلمبه ذخیره‌ای به فرم یک سیستم ترکیبی با هم ترکیب می‌شوند. سیستم فتوولتائیک و دیزل ژنراتور یکی از معروف‌ترین سیستم‌های ترکیبی مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر است. در این سیستم زمانی که شدت تابش خورشید کم باشد، دیزل ژنراتور برای تامین بار روشن می‌شود. در سیستم ترکیبی معرفی شده، زمانی که توان تولیدی سیستم فتوولتائیک بیش از بار مورد نیاز باشد، انرژی مازاد جهت انتقال آب از چاه به تانک توسط پمپ مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، اگر میزان توان تولیدی سیستم فتوولتائیک از بار مورد نیاز کمتر باشد، کمبود توان از طریق رهاسازی آب به سمت توربین آبی و یا دیزل ژنراتور انجام می‌شود. سیستم ترکیبی شامل فتوولتائیک، تلمبه ذخیره‌ای و دیزل ژنراتور اگر به طور بهینه طراحی شود، می‌تواند یک سیستم مقرون به صرفه با قابلیت اطمینان مطلوب را ارائه دهد. امروزه استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری به دلیل کارایی بالای آن‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. از مزایای این الگوریتم‌ها می‌توان به عدم نیاز داشتن به اطلاعات مشتق مسئله و جستجوی بهتر فضای جستجو به دلیل ماهیت تصادفی آن‌ها اشاره کرد.

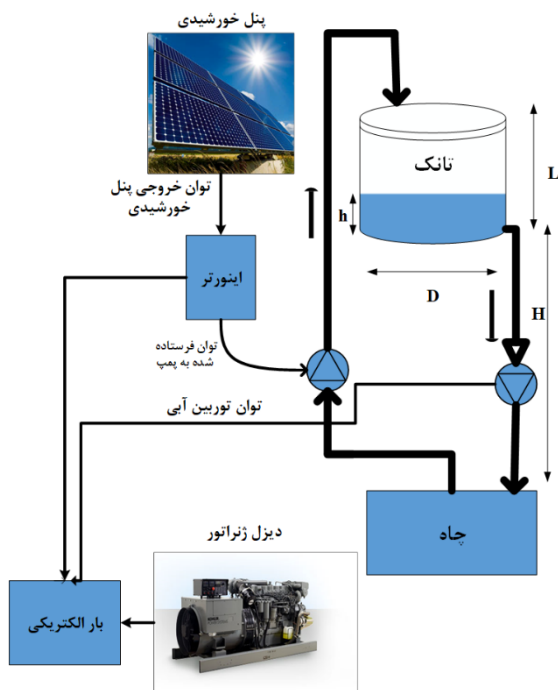
۱. مقدمه

در مرجع [۱]، طراحی بهینه یک سیستم ترکیبی جدا از شبکه فتوولتائیک، تلمبه ذخیره‌ای برای مناطق ساحلی در شمال و جنوب ایران صورت گرفته است. در این سیستم هزینه سرمایه‌گذاری و احتمال از دست رفتن منبع تغذیه به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است که با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه بهینه‌سازی انجام گرفته است. در مرجع [۲]، اندازه بهینه یک سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی متشکل از توربین بادی، نیروگاه خورشیدی و

۲. مدل سازی و فرمولاسیون

۲-۱. مدل سازی سیستم

شکل ۱ شماتیک کلی سیستم ترکیبی منفصل از شبکه شامل سلول های فتوولتائیک، سیستم تلمبه ذخیره‌ای و دیزل ژنراتور را نشان می‌دهد. این سیستم شامل پانل‌های خورشیدی، اینورتر، سیستم تلمبه ذخیره‌ای (واحد موتور پمپ، لوله‌های شارژ و دشارژ، چاه آب، تانک و واحد توربین آبی) و دیزل ژنراتور است. به‌طور خلاصه در ساعاتی که تولید سلول‌های خورشیدی از بار الکتریکی بیشتر باشد انرژی مازاد صرف پمپ آب از چاه به سمت تانک می‌شود و هنگامی که تولید سلول‌های خورشیدی از بار الکتریکی کمتر باشد کمبود توان توسط آزادسازی آب ذخیره شده از تانک به سمت توربین آبی تامین می‌شود. شایان به ذکر است، دیزل ژنراتور در این سیستم به عنوان پشتیبان برای سیستم در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. شماتیک کلی سیستم خورشیدی، تلمبه ذخیره‌ای، دیزل ژنراتور

۲-۲. سلول‌های فتوولتائیک

انرژی خورشیدی یکی از مفیدترین منابع تجدیدپذیر است. سلول‌های خورشیدی به صورت سری و موازی در کنار هم قرار می‌گیرند و تشکیل مازول می‌دهند. در این سیستم مازول‌های SunPower SPR-305-WHT مورد استفاده قرار گرفته است. توان تولیدی پانل‌های فتوولتائیک در هر ساعت به صورت رابطه (۱) قابل محاسبه است [۵]:

بخاری الکتریکی برای به حداقل رساندن هزینه انرژی تراز شده (LCOE) و بهینه‌سازی راهبرد مدیریت انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، یک برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای با ترکیب الگوریتم تکامل دیفرانسیل بهبودیافته (JADE) و (Cplex) توسعه یافته است. نتایج نشان می‌دهد که بخاری الکتریکی برای کاهش LCOE زمانی مفید است که احتمال از دست دادن منبع تغذیه (LPS^۲) افزایش یابد. در مرجع [۳]، یک سیستم انرژی ترکیبی شامل سلول‌های فتوولتائیک، توربین بادی، ژنراتور بیوگاز و باتری برای تامین یک جزیره دورافتاده در بنگلادش پیشنهاد شده است. الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط (NSGA-II) و الگوریتم تکاملی مبتنی بر غیرممکن برای اندازه‌گیری اجزای سیستم ترکیبی بر اساس هزینه انرژی و انتشار چرخه زندگی تحت یک قابلیت اطمینان خاص اعمال شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی از CO₂ را می‌توان از طریق سیستم ترکیبی ذکر شده کاهش داد. در مرجع [۴]، بهینه‌سازی یک سیستم مستقل از شبکه مبتنی بر سلول‌های فتوولتائیک با ردیاب‌های خورشیدی تک محوری (افقی و عمودی) و دو محوره برای شهر شارجه توسط نرم افزار هومر انجام شده است. تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی با ردیاب‌های خورشیدی دو محوره هزینه برق کمتر و بالاترین کاهش انتشار را فراهم می‌کند.

در این مقاله، اندازه‌یابی یک سیستم ترکیبی منفصل از شبکه شامل سلول‌های فتوولتائیک، سیستم تلمبه ذخیره‌ای و دیزل ژنراتور به منظور کاهش هزینه انرژی تراز شده و میزان آلاینده‌های سوخت‌های فسیلی با در نظر گرفتن قیود قابلیت اطمینان احتمال از دست رفتن منبع تغذیه (LPS^۲) و تعادل میان توان تولیدی و توان بار با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری صورت گرفته است. امروزه استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری به دلیل کارایی بالای آن‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

انرژی خورشیدی یکی از بزرگترین منابع تجدیدپذیر است که میزان وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد. منابع تجدیدپذیر در طبیعت به صورت دوره‌ای (متناوب) می‌باشند و همچنین تحت تاثیر شرایط آب و هوایی هستند که با توجه به ضرورت تامین بار استفاده از یک سیستم ذخیره‌ساز توصیه می‌شود. سیستم تلمبه ذخیره‌ای از آن جهت مورد اهمیت است که تاکنون تحقیقات محدودی در این خصوص انجام گرفته است. به علاوه، از یک سیستم ردیابی دو محوره برای ردیابی خورشید استفاده شده است که براساس روابط دقیق زوایای خورشیدی و بدون استفاده از هیچ سنسور نوری، موقعیت خورشید را شناسایی می‌کند و در نهایت نتایج حاصل با سیستم ثابت مقایسه می‌شود.

^۲ Loss of power supply probability

^۱ levelized cost of energy



که ρ ضریب انعکاس، β زاویه نصب، θ_z زاویه ارتفاع است که برای سیستم دو محوره برابر با صفر درجه است. زاویه برخورد θ از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega \quad (7)$$

که δ زاویه میل خورشیدی، φ عرض جغرافیایی و ω زاویه ساعت خورشیدی است که مفصلاً در خصوص این زوایا در مرجع [۶] بحث شده است.

زاویه ارتفاع در سیستم خورشیدی ثابت از طریق رابطه (۸) محاسبه می‌گردد.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (8)$$

با توجه به سیستم ردیابی، pr_{pv} قیمت هر پانل فتوولتائیک به صورت رابطه (۹) محاسبه است [۷].

$$pr_{pv} = \xi \times P_{pv, rated} \quad (9)$$

$$\xi = \begin{cases} 2.13 & \text{تاب ت} \\ 2.61 & \text{نومحور ه} \end{cases}$$

۲-۴. اینورتر

از آنجا که توان تولیدی سیستم فتوولتائیک از نوع توان مستقیم است و توان مورد نیاز بار از نوع متناوب می‌باشد نیاز است که توان مستقیم با استفاده از اینورتر به توان متناوب تبدیل شود. ماکزیمم توانی که هر اینورتر می‌تواند به توان متناوب تبدیل کند به توان نامی اینورتر و بستگی دارد. فرکانس و ولتاژ اینورتر می‌تواند با توجه به نیاز در مقدار مشخص تنظیم شود.

هزینه‌های اینورتر شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری (I_{inv}) و تعویض و جایگزینی (R_{inv}) است. بنابراین مجموع هزینه‌های خالص فعلی اینورتر ($TNPC_{inv}$) به صورت رابطه (۱۰) قابل محاسبه است:

$$TNPC_{inv} = I_{inv} + R_{inv}(npv) \quad (10)$$

$$I_{inv} = pr_{inv} \times P_{inv} \quad (11)$$

$$R_{inv}(npv) = pr_{inv} \times P_{inv} \times \left(\frac{1+e_r}{1+i_r}\right)^{10} \quad (12)$$

که pr_{inv} قیمت هر اینورتر را نشان می‌دهد که واحد آن دلار بر کیلووات است، P_{inv} توان نامی اینورتر را نشان می‌دهد، $R_{inv}(npv)$ ارزش فعلی هزینه تعویض و جایگزینی را نشان می‌دهد و از آنجا که طول عمر اینورتر ۱۰ سال در نظر گرفته شده و طول عمر پروژه ۲۰ سال است، تنها یک بار نیاز به تعویض اینورتر وجود دارد.

۲-۵. دیزل ژنراتور

با توجه به ماهیت متناوب منابع تجدیدپذیر و به دنبال آن عدم قطعیت موجود در توان تولیدی آن‌ها، نیاز به سیستم پشتیبان در سیستم ترکیبی برای تامین بار به طور کامل در طول کل ساعات

$$P_{pv}(t) = \eta_{inv} \times (I_T(t)) / (1kWh/m^2) \times [1 + k(T_c(t) - 25)] \times N_{pv} \quad (1)$$

$$T_c(t) = T_a(t) + ((NOCT - 20) / 0.8) \times (I_T(t)) / (1kWh/m^2) \quad (2)$$

که η_{inv} بازده اینورتر، $G(t)$ میزان تابش خورشید، N_{pv} تعداد سلول فتوولتائیک و $NOCT$ دمای اسمی سلول در عملکرد نامی است.

مجموع هزینه‌های خالص فعلی پانل‌های فتوولتائیک^۲ (TNPC) شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری (I_{pv}) و تعمیر و نگهداری ($OM_{pv}(npv)$) می‌شود. از آنجا که طول عمر پانل‌های فتوولتائیک با طول عمر پروژه یکی است لذا تعویض و جایگزینی پانل‌های فتوولتائیک در طول عمر پروژه نیاز نیست و هزینه‌های مربوط به آن برابر صفر است. بنابراین مجموع هزینه‌های خالص فعلی پانل‌های فتوولتائیک ($TNPC_{pv}$) به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$TNPC_{pv} = I_{pv} + OM_{pv}(npv) \quad (3)$$

$$I_{pv} = pr_{pv} \times N_{pv} \quad (4)$$

$$OM_{pv}(npv) = OM_{pv} \times N_{pv} \times \sum_{n=1}^N \left(\frac{1+e_r}{1+i_r}\right)^n \quad (5)$$

که pr_{pv} قیمت هر پانل فتوولتائیک را نشان می‌دهد، $OM_{pv}(npv)$ ارزش فعلی هزینه‌های تعمیر و نگهداری را نشان می‌دهد و N نشان دهنده طول عمر پروژه است.

۲-۳. سیستم ردیابی دو محوره

یکی از اصول مهم در افزایش راندمان سلول‌های خورشیدی، زاویه تابش خورشید می‌باشد. این زاویه همواره باید عمود بر سلول‌های خورشیدی باشد، تا بیشترین انرژی توسط پانل‌های خورشیدی جذب شود. در صورتی که زاویه تابش پانل‌های یک نیروگاه خورشیدی با خورشید مناسب نباشد، راندمان پانل‌ها و در کل بازده نیروگاه خورشیدی کاهش خواهد یافت. از طرفی دیگر خورشید در طول روز همواره در حال حرکت بوده و در موقعیت‌های مختلفی قرار می‌گیرد. سیستم ردیاب دو محوره دارای دو درجه آزادی و دو موتور مستقل می‌باشد و هر دو زاویه سمت (azimuth) و ارتفاع (altitude) توسط آن تنظیم می‌گردد. این نوع ردیاب به دلیل حرکت دوگانه موتورهای در راستای زوایای سمت و ارتفاع پانل‌ها به فضای باز بیشتری در اطراف خود نیاز دارند.

میزان تابش برای سیستم دو محوره از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود که شامل تابش مستقیم ($I_{b,h}$)، تابش نفوذی ($I_{d,h}$) و تابش انعکاسی ($I_{r,h}$) است.

$$I_T = I_{b,h} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + I_{d,h} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \quad (6)$$

$$\rho(I_{b,h} + I_{d,h}) \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

^۲ Total net present cost

معادلات (۲۲) تا (۲۹) عملکرد پمپ را نشان می‌دهند. معادلات (۲۲) و (۲۳) به ترتیب ارتفاع کل سیستم نصب شده و بازده عملکرد پمپ را در سرعت نامی نشان می‌دهند [۹]. معادلات (۲۴) تا (۲۶)، قوانین افینیتی را نشان می‌دهند [۱۰]. توان خروجی توسط پمپ در معادله ۲۷ شبیه سازی شده است که در آن ارتفاع کل سیستم برابر با ارتفاع استاتیک سیستم به اضافه ارتفاع از دست رفته در اثر اصطکاک (ویسکوزیته) است. معادلات (۲۷) و (۲۸) به ترتیب ارتفاع از دست رفته و ضریب اصطکاک را نشان می‌دهند [۱۱].

$$H_{tot@Nn} = -2.3915 \times 10^{-5} \times Q_p^2 - 1.227 \times 10^{-3} \times Q_p + 61.76 \quad (22)$$

$$\eta_{p@Nn} = -1.473 \times 10^{-4} \times Q_p^2 + 2.275 \times 10^{-1} \times Q_p \quad (23)$$

$$\frac{Q_{p,2}}{Q_{p,1}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (24)$$

$$\frac{H_{tot,2}}{H_{tot,1}} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (25)$$

$$\frac{P_{p,2}}{P_{p,1}} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (26)$$

$$P_p = (\rho \times g \times H_{tot} \times Q_p) / \eta_p ; \quad (27)$$

$$H_{tot} = L + H + H_f \quad (28)$$

$$H_f = (8 \times f \times (L + H) \times Q_p^2) / (\pi \times g \times d_{charge}^5) \quad (29)$$

$H_{tot@Nn}$ ارتفاع کلی نصب شده در سرعت نامی پمپ، Q_p دبی خروجی پمپ، $\eta_{p@Nn}$ راندمان پمپ در سرعت نامی پمپ، N سرعت چرخش پمپ، P_p توان خروجی پمپ، d_{charge} قطر لوله شارژ و f ضریب اصطکاک است.

معادلات (۳۰) تا (۳۳)، عملکرد توربین را شبیه سازی کرده‌اند که به ترتیب توان تولیدی توسط توربین، بازده توربین، ارتفاع از دست رفته و فاکتور اصطکاک را نشان می‌دهند. ارتفاع آب در تانک در انتهای هر ساعت توسط معادله ۳۴ به روز رسانی می‌شود.

$$P_{turbine} = \eta_t \times \rho \times Q_t \times (H_{stat} - H_f) ; \quad (30)$$

$$H_{stat} = H + h \quad (31)$$

$$\eta_t = \eta_{max} \times \left(1 - \left(\frac{\rho \times g \times H_{stat} \times Q_t}{P_{turbine}^{max}} - 1\right)^2\right) \quad (32)$$

$$H_f = (8 \times f \times H \times Q_t^2) / (\pi \times g \times d_{discharge}^5) \quad (33)$$

$$1/\sqrt{f} = -2 \log[\epsilon / (3.7 d_{discharge}) + 2.51 / (\text{Re} \sqrt{f})] \quad (34)$$

$$h_{i+1} = h_i + \frac{Q_p - Q_t}{A} \times 3600$$

که $P_{turbine}$ توان خروجی توربین آبی، η_t بازده توربین آبی، Q_t دبی خروجی توربین، H_{stat} ارتفاع استاتیک تانک، h ارتفاع آب ذخیره شده در تانک، η_{max} حداکثر بازده توربین، $P_{turbine}^{max}$ توان نامی توربین، $d_{discharge}$ قطر لوله دشارژ آب، ϵ زبری لوله، i گام زمانی و A مساحت تانک را نشان می‌دهند.

محاسبات اقتصادی سیستم تلمبه ذخیره‌ای توسط معادلات (۳۵) تا (۴۱) تعریف شده است. هزینه بهره برداری و نگهداری سیستم تلمبه ذخیره‌ای شامل هزینه ثابت (در اینجا ۰.۱٪ هزینه سرمایه گذاری) و

وجود دارد. دیزل ژنراتور به عنوان سیستم پشتیبان در سیستم ترکیبی در نظر گرفته شده است. میزان مصرف سوخت توسط دیزل ژنراتور به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$FC = a \times (P_{dg})^2 + b \times P_{dg} + c \quad (13)$$

که در آن a و b و c ضرایب هزینه سوخت و P_{dg} میزان توان خروجی دیزل ژنراتور و FC میزان مصرف سوخت فسیلی است. هر ساعت با ضرب این مقدار در قیمت سوخت (FP_{dg}), هزینه سوخت مصرفی ($FC_{dg}(t)$) در آن ساعت بدست می‌آید. با جمع کردن هزینه‌های سوخت در هر ساعت، هزینه سوخت در طول یکسال توسط معادله (۱۵) بدست می‌آید.

$$FC_{dg}(t) = FP_{dg} \times F_{dg}(t) \quad (14)$$

$$FC_{dg-year} = \sum_{t=1}^{8760} FC_{dg}(t) \quad (15)$$

علاوه بر هزینه سوخت، دیزل ژنراتور شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری (I_{dg}), تعویض و نگهداری (OM_{dg}) و جایگزینی (R_{dg}) نیز می‌باشد. طول عمر دیزل ژنراتور (L_{dg}) بر اساس تعداد ساعات کارکرد دیزل محاسبه شده است. اگر دیزل ژنراتور ۱۵۰۰۰ ساعت کار کند، نیاز به تعویض آن وجود دارد. بنابراین مجموع هزینه‌های خالص فعلی دیزل ژنراتور ($TNPC_{dg}$) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TNPC_{dg} = I_{dg} + OM_{dg}(npv) + R_{dg}(npv) + FC_{dg-year}(npv) \quad (16)$$

$$I_{dg} = pr_{dg} \times N_{dg} \quad (17)$$

$$OM_{dg}(npv) = OM_{dg} \times \sum_{n=1}^N \left(\frac{1+e_r}{1+i_r}\right)^n \quad (18)$$

$$OM_{dg} = \rho \times \sum_{t=1}^{8760} P_{dg}(t) \quad (19)$$

$$R_{dg}(npv) = pr_{dg} \times N_{dg} \times \sum_{L_{dg}} \left(\frac{1+f_r}{1+i_r}\right)^{L_{dg}} \quad (20)$$

$$FC_{dg-year}(npv) = FC_{dg-year} \times \sum_{n=1}^N \left(\frac{1+f_r}{1+i_r}\right)^n \quad (21)$$

که pr_{dg} قیمت هر دیزل ژنراتور را نشان می‌دهد، N_{dg} تعداد دیزل ژنراتورها را نشان می‌دهد، ρ هزینه تعمیر و نگهداری دیزل ژنراتور را نشان می‌دهد و واحد آن دلار بر کیلووات است که با ضرب این مقدار در توان تولیدی دیزل ژنراتور ($\sum_{t=1}^{8760} P_{dg}(t)$), هزینه تعمیر و نگهداری دیزل ژنراتور در طول یکسال (OM_{dg}) بدست می‌آید.

۶-۲. سیستم تلمبه ذخیره‌ای

سیستم تلمبه ذخیره‌ای روشی برای ذخیره کردن و تولید بار به خصوص در ساعات پیک مصرف است که راندمان این سیستم تقریباً بین ۷۰ الی ۸۵ درصد است. این سیستم مزایایی همچون افزایش قابلیت اطمینان سیستم، کاهش نیاز به مصرف سوخت‌های فسیلی و کنترل فرکانس مطابق با تغییرات بار دارد. [۸]



است که این توان بایستی در محدوده مجاز عملکرد توربین (۶۰ درصد توان نامی توربین => ۱۲۰ درصد محدود مجاز راهاندازی توربین => ۱۲۰ درصد توان نامی توربین) باشد. در هر ساعت بایستی ارتفاع آب موجود در تانک به روز رسانی شود و نبایستی از حداقل ارتفاع (۱۰ درصد ارتفاع تانک) کمتر باشد. اگر توان تولیدی توسط توربین ژنراتور توانایی تامین توان کمبود را نداشته باشد توان کمبود بایستی توسط دیزل ژنراتور تامین شود.

۸-۲. تابع هدف

در این مقاله، هزینه انرژی تراز شده (LCOE) و آلاینده‌گی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. برای به دست آوردن هزینه انرژی از رابطه ۴۲ استفاده شده است که از ضرب هزینه‌های خالص فعلی و ضریب بازگشت سرمایه حاصل شده است.

$$\text{Min. LCOE} = \frac{\text{TNPC} \times \text{CRF}}{\sum_{t=1}^{8760} P_{\text{demand}}(t)} \quad (42)$$

$$\text{CRF} = \frac{i_r \times (1+i_r)^n}{(1+i_r)^n - 1} \quad (43)$$

که در آن i_r نرخ بهره و n طول عمر پروژه است. میزان هزینه خالص سیستم ترکیبی معرفی شده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\text{TNPC} = \text{TNPC}_{pv} + \text{TNPC}_{dg} + \text{TNPC}_{inv} + \text{TNPC}_{PHS} \quad (44)$$

از سوی دیگر، گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی به نگرانی سازمان محیط زیست جهانی تبدیل شده است. در این راستا، به عنوان یک موضوع زیست محیطی، تابع هدف دوم به عنوان انتشار آلاینده از سیستم های انرژی ترکیبی تعریف می شود. معادله (۴۵) انتشار کل آلاینده (TPE) سیستم های ترکیبی تولید شده توسط اجزای مختلف را تعریف می کند.

$$\text{Min. TPE} = \sum_{i \in \{PV, PHS, DG\}} \sum_{t=1}^{8760} P_i(t) \times EF_i \quad (45)$$

که در آن P_i میزان توان تولیدی پانل های فتوولتائیک، سیستم تلمبه ذخیره‌ای و دیزل ژنراتور است. EF_i ضریب آلاینده‌گی هر یک از اجزا را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است احتمال از دست رفتن منبع تغذیه (LPSP) به عنوان شاخص قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است که در ساعت بایستی این شاخص برابر با صفر باشد یعنی تمام توان مورد نیاز بار تامین گردد.

$$\text{LPSP} = \frac{\sum_{t=1}^{8760} \text{LPS}(t)}{\sum_{t=1}^{8760} P_{\text{demand}}(t)} \quad (46)$$

هزینه متغیر است که بر اساس انرژی تولید شده محاسبه می‌گردد [۱۲].

هزینه سرمایه گذاری سیستم تلمبه ذخیره‌ای شامل هزینه مخزن (C_{res})، هزینه لوله (C_{pipe})، هزینه پمپ (C_{pump}) و هزینه توربین ژنراتور ($C_{turbine}$) است که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{TNPC}_{PHS} = I_{PHS} + \text{OM}_{PHS}(npv) \quad (35)$$

$$I_{PHS} = C_{res} + C_{pipe} + C_{pump} + C_{turbine} \quad (36)$$

$$\text{OM}_{PHS}(npv) = \left[(\beta_1 \times I_{PHS}) + \left(\beta_2 \times \left(\sum_{t=1}^{8760} P_{pump}(t) \sum_{t=1}^{8760} P_{turbine}(t) \right) \right) \right] \times \sum_{n=1}^N \left(\frac{1+e_r}{1+i_r} \right)^n \quad (37)$$

$$C_{res} = 170 \times \text{reservoir volume} (m^3) \quad (38)$$

$$C_{pipe} = 1457.14 \times \text{pipe diameter} (m) \times \text{pipe length} (m) \quad (39)$$

$$C_{pump} = (380.22 \times \text{pump nominal power} (kW)) - 6360.9 \quad (40)$$

$$C_{turbine} = (725.42 \times \text{turbine nominal power} (kW)) + 7688.2 \quad (41)$$

که ضرایب β_1 و β_2 برابر با ۰/۱۵ است.

۷-۲. راهبرد بهره‌برداری

میزان تابش خورشید و بار الکتریکی ساعتی به عنوان داده‌های ورودی در نظر گرفته شده است. در این مقاله، تعداد سلول های خورشیدی (N_{PV})، ارتفاع تانک آب (H)، حجم تانک ($V=A \times L$)، نسبت عمق تانک به قطر تانک (l)، قطر لوله شارژ (d_{charge})، قطر لوله دشارژ ($d_{discharge}$)، توان نامی توربین آبی ($P_{turbine}^n$)، توان پمپ (P_{pump}^n) و توان نامی دیزل ژنراتور (P_{diesel}^n) به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده است. در هر ساعت توان مازاد تولیدی توسط سلول خورشیدی صرف پمپ کردن آب از چاه به سمت تانک می‌شود، توان کمبود برای تامین بار توسط توربین آبی و دیزل ژنراتور تامین می‌گردد.

در هر ساعت میزان توان تولیدی توسط سلول های فتوولتائیک محاسبه می‌شود. اگر توان تولیدی توسط سلول های فتوولتائیک بیشتر از توان بار باشد توان مازاد محاسبه می‌شود. توان مازاد به سمت پمپ فرستاده می‌شود. توان پمپ بایستی در محدوده مجاز عملکرد پمپ (۶۰ درصد توان نامی پمپ => محدوده مجاز راهاندازی پمپ => ۱۲۰ درصد توان نامی پمپ) باشد. در هر ساعت بایستی ارتفاع آب موجود در تانک به روز رسانی شود و نبایستی از ارتفاع تانک بیشتر باشد.

اگر توان تولیدی توسط سلول های فتوولتائیک کمتر از توان مورد نیاز بار باشد توان کمبود توسط توربین ژنراتور و یا دیزل ژنراتور بایستی تامین گردد. توان فرستاده شده سمت توربین درصدی از توان کمبود



۳. نتایج شبیه‌سازی

اندازه بهینه سیستم ترکیبی معرفی شده برای تامین بار الکتریکی منطقه‌ای در استان کرمان به دست آمده است. تعداد بهینه اجزای سیستم (پانل‌های فتوولتائیک، اجزا سیستم تلمبه ذخیره‌ای و دیزل ژنراتورها) به عنوان متغیرهای تصمیم به منظور کاهش هزینه انرژی تراز شده و میزان آلاینده‌گی تولید شده در نظر گرفته شده است. بار الکتریکی و میزان تابش برای دوره مشخص شده ۸۷۶۰ ساعت به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. جداول ۱ تا ۴ به ترتیب مشخصات و اندازه اجزاء مختلف سیستم سلول‌های فتوولتائیک، دیزل ژنراتور، اینورتر و تلمبه ذخیره‌ای را نشان می‌دهند. در این مقاله، سیستم ترکیبی معرفی شده در دو سناریو پانل‌های فتوولتائیک ثابت و با سیستم ردیاب دو محوره توسط نسخه چند هدفه الگوریتم جستجوی کلاخ (*MOCSA*) حل شده است. الگوریتم جستجوی کلاخ یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر رفتار هوشمندانه کلاغ‌ها است. این روش از این نظریه که کلاغ‌ها مواد غذایی اضافی خود را در مخفی‌گاه‌هایی پنهان کرده و هنگامی که به آن مواد غذایی نیاز دارند، آن‌ها را مجدداً یافته و مصرف می‌کنند، الهام گرفته شده است [۱۳]. به منظور پیاده‌سازی این الگوریتم، اندازه جمعیت و حداکثر تعداد تکرار الگوریتم، به ترتیب بر روی ۳۰ و ۵۰۰۰ تنظیم شده‌اند.

جدول ۲. پارامترهای دیزل ژنراتور

| | |
|-----------|-------------------------|
| a | 0.7998×10^{-5} |
| b | 0.1798 |
| c | 0.0809 |
| ρ | 0.008 (\$/kWh) |
| pr_{dg} | 550 (\$) |
| FP_{dg} | 0.45 (\$/L) |
| EF_{dg} | 2/4 (kg/L) |
| توان نامی | 1/8 (kW) |
| طول عمر | 15000 ساعت |

جدول ۳. پارامترهای اینورتر

| | |
|--------------|-------------|
| pr_{inv} | 100 (\$/kW) |
| η_{inv} | 90 درصد |
| طول عمر | 15000 ساعت |

جدول ۴. پارامترهای سیستم تلمبه ذخیره‌ای

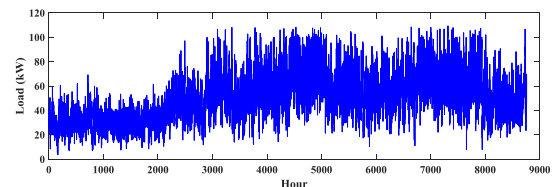
| | |
|--------------|---------------|
| بازده پمپ | 0/8 |
| بازده توربین | 0/8 |
| EF_{PHS} | 0.0078 (kg/L) |

هنگامی که بار الکتریکی تنها توسط دیزل ژنراتور تغذیه می‌شود، میزان هزینه انرژی تراز شده، آلاینده‌گی و توان نامی دیزل ژنراتور در جدول ۵ نشان داده شده است.

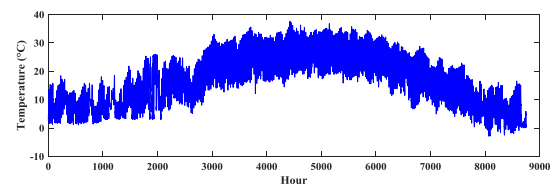
جدول ۵. مقادیر توابع هدف حالت پایه

| توان نامی دیزل ژنراتور (kW) | LPSP (%) | TPE (kg/L) | LCOE (\$/kWh) |
|-----------------------------|----------|--------------------|---------------|
| 109/35 | 0 | $2/12 \times 10^5$ | 0/44 |

اندازه‌یابی سیستم ترکیبی منفصل از شبکه فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و سیستم تلمبه ذخیره‌ای با در نظر گرفتن تعداد پانل‌های خورشیدی (N_{PV})، ارتفاع تانک آب (H)، حجم تانک ($V=A \times L$)، نسبت عمق تانک به قطر تانک (l)، قطر لوله شارژ (d_{charge})، قطر لوله دشارژ ($d_{discharge}$)، توان نامی توربین آبی ($P_{turbine}^n$)، توان پمپ (P_{pump}^n) و توان نامی دیزل ژنراتور (P_{diesel}^n) به عنوان متغیرهای تصمیم با هدف کاهش توابع هدف هزینه انرژی تراز شده و میزان آلاینده‌گی مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب، جبهه پارتو به دست آمده توسط الگوریتم چند هدفه کلاخ با توجه به توابع هدف برای پانل‌های فتوولتائیک ثابت و سیستم ردیاب دومحوره را نشان می‌دهند.



شکل ۲. بار الکتریکی طی یک سال (kW)

شکل ۳. میزان تابش خورشید طی یک سال (W/m^2)

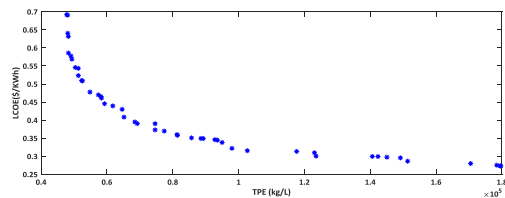
جدول ۱. پارامترهای پانل فتوولتائیک

| | |
|-----------|-----------------------|
| pr_{pv} | 468 (\$) |
| OM_{pv} | $0.02 \times pr_{pv}$ |
| P_{STC} | 0.26 (kW) |
| EF_{pv} | 0.032 (kg/L) |
| طول عمر | 20 سال |



جدول ۸. اندازه بهینه اجزای سیستم تلمبه ذخیره‌ای

| سناریو | H (m) | V (m ³) | l | d_{charge} (mm) | $d_{discharge}$ (mm) |
|----------------|------------|--------------------------|------|----------------------|-------------------------|
| ردیاب دو محوره | ۳۱ | ۲۷۳۰ | ۱/۴ | ۰/۴۴ | ۰/۲۵ |
| پانل ثابت | ۵۰ | ۳۶۰۰ | ۱/۳۷ | ۰/۵۶ | ۰/۴۷ |

شکل ۴. جبهه پارتو بدست آمده توسط الگوریتم MOCSA با توجه به توابع $LCOE$ و TPE (پانل‌های ثابت)

۴. نتیجه گیری

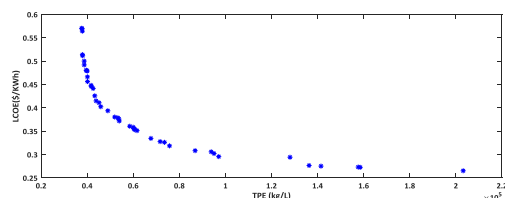
در این مقاله، اندازه بهینه یک سیستم ترکیبی منفصل از شبکه فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و تلمبه ذخیره‌ای به کمک الگوریتم MOCSA مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر تابع هزینه تراز شده انرژی، میزان آلاینده‌گی تولید شده توسط اجزای سیستم ترکیبی معرفی شده نیز به عنوان یک تابع هدف مهم با اعمال قید احتمال از دست رفتن منبع تغذیه، در نظر گرفته شده است. به علاوه، دو سیستم ردیاب دو محوره خورشیدی و پانل‌های فتوولتائیک ثابت نصب شده، مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج شبیه سازی، نتایج زیر قابل استخراج است:

۱. میزان هزینه انرژی تراز شده و آلاینده‌گی تولید شده توسط سیستم‌های ترکیبی معرفی شده نسبت به حالتی که بار الکتریکی تنها توسط دیزل ژنراتور تغذیه می‌شود، به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

۲. بر اساس توابع هدف لحاظ شده، عملکرد سیستم ترکیبی هنگامی که از سیستم ردیاب دو محوره خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته است نسبت به زمانی که پانل‌ها در زاویه استاندارد به صورت ثابت نصب شده است، بهبود یافته است.

مراجع

- [1] Javad Mahmoudimehr, Masoume Shabani, Optimal Design of Hybrid Photovoltaic-Hydroelectric Standalone Energy System for North and South of Iran, Renewable Energy. 115(2018) 238-251.
- [2] Rong Li, Su Guo, Yong Yang, Deyou Liu, Optimal sizing of wind/ concentrated solar plant/ electric heater hybrid renewable energy system based on two-stage stochastic programming, Energy 209 (2020) 118472.
- [3] Barun K. Das, Rakibul Hassan, Mohammad Shahed H.K. Tushar, Forhad Zaman, Mahmudul Hasan, Pronob Das, Techno-economic and environmental assessment of a hybrid renewable energy system using multi-objective genetic algorithm: A case study for remote Island in Bangladesh, Energy Conversion and Management 230 (2021) 113823.
- [4] Tareq Salameh, Chaouki Ghenai, Adel Merabet, Malek Alkasrawi, Techno-economical optimization of an integrated stand-alone hybrid solar PV tracking and diesel generator power system in Khorfakkan, United Arab Emirates, Energy 190 (2020) 116475.
- [5] F. Fodhil, A. Hamidat, O. Nadjemi, Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-

شکل ۵. جبهه پارتو بدست آمده توسط الگوریتم MOCSA با توجه به توابع $LCOE$ و TPE (ردیاب دو محوره)

مقادیر توابع هدف بدست آمده با الگوریتم‌های MOCSA در جدول ۶ نشان داده شده است. جهت مقایسه منصفانه، میزان آلاینده‌گی تولیدی طی یک سال در هر دو سناریو نزدیک به ۱۰۰ تن بر لیتر در نظر گرفته شده است و در این حالت، میزان هزینه انرژی تراز شده، گزارش شده است. تعداد پانل‌های فتوولتائیک، توان نامی دیزل ژنراتور، پمپ و توربین آبی به دست آمده متناظر با نتایج جدول ۶، در جدول ۷ نمایش داده شده است. جدول ۸، اندازه اجزای سیستم تلمبه ذخیره‌ای متناظر را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، هنگامی که خاموشی برابر صفر است، در یک میزان آلاینده‌گی ثابت، هزینه انرژی تراز شده سیستم ترکیبی معرفی شده هنگامی که سیستم ردیاب دو محوره خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته است، نسبت به پانل‌های فتوولتائیک نصب شده ثابت، کمتر است. از سوی دیگر، تعداد پانل‌های فتوولتائیک و توان نامی دیزل ژنراتور هنگامی که از سیستم ردیاب دو محوره استفاده شده است نسبت به حالتی که پانل‌های ثابت مورد استفاده قرار گرفته است، کمتر است.

جدول ۶. مقادیر توابع هدف در هر سناریو

| سناریو | $LPSP$ (%) | TPE (kg/L) | $LCOE$ (\$/kWh) |
|----------------|---------------|----------------------|--------------------|
| ردیاب دو محوره | ۰ | ۰/۹۷×۱۰ ^۵ | ۰/۲۹۵۸ |
| پانل‌های ثابت | ۰ | ۰/۹۷×۱۰ ^۵ | ۰/۳۲۲۰ |

جدول ۷. اندازه بهینه اجزای سیستم ترکیبی

| سناریو | NPV | $P_{turbine}^n$ (kW) | P_{diesel}^n (kW) | P_{pump}^n (kW) |
|----------------|-------|-------------------------|------------------------|----------------------|
| ردیاب دو محوره | ۳۷۰ | ۴۰ | ۹۴ | ۴۰ |
| پانل ثابت | ۴۱۲ | ۴۰ | ۸۷ | ۴۵ |



- [10] Giampaolo Manfrida, Riccardo Secchi, Seawater pumping as an electricity storage solution for photovoltaic energy systems, *Energy*. 69 (2014) 470-484.
- [11] Bachus L, Custodio A, Know and understand centrifugal pumps. 1st ed. Oxford: Elsevier; 2003.
- [12] R. Segurado, J.F.A. Madeira, M. Costa, N. Duic, M.G. Carvalho, Optimization of a wind powered desalination and pumped hydro storage system, *Applied Energy* 177 (2016) 487–499.
- [13] Movahediyani Z, Askarzadeh A, A multi-objective approach for design of an off-grid PV/Diesel system considering reliability and cost, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38 (2019) 13101.
- diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria, *Energy* 169 (2019) 613-624.
- [6] Benjamin Y.H.Liu, Richard C.Jordan, The interrelationship and of direct, diffuse and characteristic distribution total solar radiation, *Solar Energy* 4 (1960) 1-19.
- [7] Masoume Shabani, Javad Mahmoudimehr, Techno-economic role of PV tracking technology in a hybrid PVhydroelectric standalone power system, *Applied Energy* 212 (2018) 84–108.
- [8] Shafiqur Rehman, Luai M. Al-Hadhrami, Md. Mahbub Alam, Pumped hydro energy storage system: A technological review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44 (2015) 586–598.
- [9] U.S. Department of energy (DOE). https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/variable_speed_pumping.pdf [accessed 2016.11.05].

ACEC2021-54892

شبیه سازی عملکرد سیستم گردآورنده فتوولتائیک-حرارتی و پمپ حرارتی انبساط مستقیم جهت گرمایش در شرایط اقلیمی شهر کرمان

هادی فرزنان^۱

^۱استادیار، مجتمع آموزش عالی بم، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، آدرس پست الکترونیکی: hadi.farzan@bam.ac.ir

چکیده

در پژوهش حاضر به تحلیل عملکرد سیستم گرمایش ساختمان مجهز به پمپ حرارتی انبساط مستقیم و گردآورنده فتوولتائیک-حرارتی برای یک ساختمان مسکونی در شرایط اقلیمی شهر کرمان پرداخته شده است. اجزاء سیستم مورد مطالعه شامل گردآورنده فتوولتائیک حرارتی و پمپ حرارتی می باشد و برای مدل سازی سیستم گرمایشی از نرم افزار ترنسسیس استفاده شده است. ساختمان مورد نظر جهت مطالعه موردی یک ساختمان مسکونی با مساحت زیر بنا ۲۳۰ متر مربع در یک طبقه است که طولانی ترین وجه ساختمان در راستای جنوب قرار گرفته است. بار حرارتی ساختمان با استفاده از نرم افزار ترنسسیس، به مقدار 8000 Btu/hr بدست می آید. جهت مصرف بهینه انرژی در ساختمان، از یک ترموستات برای راه اندازی و کنترل سیستم گرمایشی استفاده می شود. نتایج مطالعه حاضر نشان می دهد، سامانه گرمایش مجهز به پمپ حرارتی انبساط مستقیم و گردآورنده فتوولتائیک-حرارتی به خوبی از عهده تامین بار حرارتی ساختمان برمی آید، در حالی که توان الکتریکی تولید شده بخشی از بار الکتریکی ساختمان را نیز تامین می کند.

واژه های کلیدی: پمپ حرارتی انبساط مستقیم، گردآورنده فتوولتائیک-حرارتی، نرم افزار ترنسسیس، سیستم گرمایشی خورشیدی

مقدمه

استفاده از سیستم هایی که از سوخت های فسیلی جهت تامین گرمایش محیط استفاده می کنند، یکی از عوامل اصلی تولید آلاینده های زیست محیطی می باشد. در نتیجه جایگزین نمودن انواع انرژی های نو به جای استفاده از سیستم های با مصرف سوخت فسیلی، می تواند به میزان قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه ای و آلاینده های زیست محیطی جلوگیری نماید. سیستم های خورشیدی ابزارهایی هستند که تقاضا برای مصرف انرژی های تجدید پذیر، نظیر نفت و گاز را کاهش می دهند، در نتیجه آلودگی ناشی از مصرف این

سوخت ها در محل مصرف کاهش یافته و همچنین هزینه های مصرف و حمل و نقل این سوختها به ویژه برای مناطق دور از منابع نفت و گاز کاهش می یابد.

در این پژوهش از پمپ های حرارتی هوایی و گردآورنده های فتوولتائیک حرارتی برای تامین بار گرمایی یک ساختمان در فصل سرد استفاده شده است. تحقیقات متعددی در خصوص بررسی عملکرد سیستم گرمایش مجهز به پمپ حرارتی و گردآورنده خورشیدی انجام شده است. یامروس و آنسال [۱] در سال ۲۰۰۰ یک مدل محاسباتی برای سیستم گرمایش با استفاده از پمپ گرمایی به همراه یک مخزن نیم کروی زمین گرمایی ارائه دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از مواد با ضریب هدایتی بالا تبادل انرژی بین زمین و مخزن را افزایش می دهد که تبادل انرژی بالا، سبب افزایش دمای آب مخزن و عملکرد سیستم می شود و ضخامت بالای عایق و شعاع مخزن بزرگتر از ۳۵ متر دارای مزیت قابل توجهی نیستند. یامروتاس و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۳ یک مدل تحلیلی و محاسباتی برای سیستم گرمایش خورشیدی با کمک پمپ حرارتی و یک مخزن ذخیره سازی استوانه ای زیر زمینی را ارائه دادند. نتایج به دست آمده تاثیر نوع زمین و اندازه سیستم را بر عملکرد سیستم نشان دادند. دمای بالای آب مخزن در زمینی از جنس سنگ ریزه و دمای پایین آب مخزن در زمینی از جنس گرانیت اتفاق می افتد. یامروتاس و کاسکا [۳] در سال ۲۰۰۴ طراحی و ساخت یک سیستم پمپ حرارتی خورشیدی با یک مخزن ذخیره سازی انرژی استوانه ای روزانه جهت گرمایش فضا را انجام دادند و عملکرد حرارتی آن را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که ضریب عملکرد پمپ حرارتی برای کمترین دمای منبع ذخیره سازی در یک روز ابری حدود ۲،۵ و در ۳،۵ برای بالاترین دمای منبع در پایان یک روز آفتابی است و نوسان آن بین این مقادیر در زمان های دیگر است. همچنین، ضریب عملکرد سیستم در حدود ۱۵-۲۰ درصد پایین تر از ضریب عملکرد پمپ حرارتی است. هنگامی که دمای آب مخزن ذخیره سازی از ۳۸

هدر می‌رود و افزایش دبی جرمی سیال انتقال حرارت در کلکتور و مبدل حرارتی زمینی منجر به افزایش ۲۱ درصدی تزریق گرما به داخل زمین می‌شود. ورما و موروگسان [۱۰] در سال ۲۰۱۸ به تحقیق تجربی یک سیستم خورشیدی به کمک پمپ حرارتی منبع زیرزمینی برای تشخیص تغییرات عملکرد آن در مدت زمان گرمایش برای ۸ ساعت پیوسته از ۹ صبح تا ۵ عصر در شرایط آب و هوایی هند پرداختند. نتایج ای تحقیق افزایش ۳ درصدی دمای خانه را نشان می‌دهد و همچنین آنها نشان دادند که این سیستم توانایی نگهداری دمای خانه را بین ۲۱-۲۰ درجه سانتیگراد هنگامی که دمای بیرون حدود ۱۲ درجه سانتیگراد است را دارد. سایدام و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۹ به ساخت یک مبدل حرارتی مجهز به به واد تغییر فاز دهنده و لوله‌های مارپیچ جهت استفاده در مخازن ذخیره انرژی پرداختند. ماده تغییر فاز دهنده و سیال عامل در این تحقیق به ترتیب واکس پارافین و مخلوط آب-اتیلن گلیکول بود. آنها اثر تغییرات دبی جرمی جریان و دمای سیال ورودی به ترتیب باعث کاهش ۲۱ درصدی و ۳۵ درصدی زمان شارژ می‌گردد. مندز و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۹ به بررسی عددی امکان استفاده از تونل‌های زیر زمینی موجود در معادن متروک به عنوان ذخیره انرژی حرارتی جهت استفاده در پمپ گرمایی پرداختند. آنها توسط روش دینامیک سیال محاسباتی یک مدل سه بعدی جریان دو فاز برای تحلیل رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی جریان آب و هوا را در تونلهای زیرزمینی یک معدن متروک توسعه دادند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که استفاده از معادن زیرزمینی متروک به عنوان منبع ذخیره انرژی دما پایین از نظر تکنیکی امکان پذیر است.

در این مطالعه هدف عملکرد سامانه هیبریدی گردآورنده فتوولتائیک-حرارتی و پمپ حرارتی هوایی برای تامین برق و گرمایش یک ساختمان مسکونی در شهر کرمان است. برای این منظور یک ساختمان مسکونی در شهر کرمان با استفاده از نرم افزار ترنسیس مدل‌سازی شده است و رفتار دینامیکی سیستم برای یک روز سرد سال بررسی شده است.

مشخصات ساختمان

ساختمان مورد بررسی یک ساختمان مسکونی با مساحت زیر بنا ۲۳۰ متر مربع است که در یک طبقه ساخته شده است. ساختمان دارای ۳ اتاق است. مصالح به‌کاررفته در ساختمان بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان مبحث انتخاب شده است. نقشه دوبعدی ساختمان شبیه‌سازی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

درجه سانتیگراد بیشتر باشد، آن را از میان سیستم گرمایش کف برای گرم کردن اتاق به گردش در می‌آید که این باعث می‌شود ضریب عملکرد پمپ حرارتی به مقادیر بالاتری برسد. اسن و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۷ به بررسی بازده انرژی و انرژی و انرژی سیستم پمپ حرارتی منبع زمینی گرمایی به عنوان تابعی از عمق گودال برای فصل گرم پرداختند. مبدل‌های حرارتی زمینی افقی مورد استفاده قرار گرفته در عمق ۱ متری و ۲ متری دفن شدند. نتایج نشان می‌دهد که بازده انرژی و انرژی سیستم با افزایش دمای منبع گرم برای فصل گرم افزایش می‌یابد و با افزایش درجه حرارت محیط مرجع راندمان انرژی در هر دو مبدل حرارتی زمینی کاهش می‌یابد. وانگ و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۹ به مقایسه تحلیل انرژی یک سیستم پمپ حرارتی برای هر دو حالت سرمایش و گرمایش ساختمان پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که از بین رفتن انرژی سیستم پمپ گرمایی در حالت سرمایشی بیشتر از حالت سرمایشی است و راندمان انرژی گل سیستم پمپ گرمایی به طور آشکار پایین‌تر از اجزا آن در هر دو حالت سرمایشی و گرمایشی است، به همین دلیل باید به تحلیل انرژی کل سیستم توجه بیشتری شود. لوهانی و اسمیت [۶] در سال ۲۰۱۰ به مقایسه انرژی و انرژی سیستم گرمایش فضای یک ساختمان با نیروگاه‌های تولید حرارت پرداختند. سه سیستم متعارف با سوخت فسیلی، سیستم پمپ گرمایی زمینی گرمایی و سیستم پمپ گرمایی منبع هوایی مقایسه شدند. مقایسه این تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد سیستم پمپ گرمایی منبع زمینی واقع بینانه‌ترین سیستم است که ضریب عملکرد اولیه کلی بالای حدود ۵۰ درصد و راندمان انرژی کلی اولیه در حدود ۲۵ درصد کمتر از تقاضای اولیه انرژی و انرژی در حالت پایه که سیستم متعارف است دارد. یامروتاس و آنسال [۷] در سال ۲۰۱۲ تحلیل انرژی و مدل‌سازی سیستم گرمایشی خورشیدی یک ساختمان با کمک پمپ حرارتی و مخزن ذخیره سازی انرژی زیرزمینی پرداختند. مدل ارائه شده برای پیش بینی عملکرد بلند مدت سیستم مورد نظر است. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که حداقل مقدار دمای سالانه مخزن ذخیره‌سازی با کاهش حجم مخزن و یا مساحت گردآورنده خورشیدی ارتباط مستقیم دارد. ازترک [۸] در سال ۲۰۱۴ به تحلیل بازده انرژی و انرژی یک سیستم پمپ حرارتی پرداخت که در آن اواپراتور به عنوان گردآورنده فتوولتائیک حرارتی کار می‌کند. از نتایج راندمان انرژی، ضریب عملکرد سیستم و ضریب عملکرد انرژی سیستم به ترتیب ۷۲،۷۴، ۲،۸۹ و ۰،۳۹ درصد به دست آمدند. سیستم ترکیبی پمپ حرارتی و توسط یک گردآورنده فتوولتائیک حرارتی نصب شده بر روی اواپراتور نسبت به سیستم پمپ حرارتی منبع زمینی ساده سودمندر است و دلیل آن را میتوان کاهش و یا از بین رفتن برق مصرفی از اجزای کمپرسور و پمپ باشد. ورما و موروگسان [۹] در سال ۲۰۱۷ به بررسی عملکرد یک سیستم پمپ حرارتی با کمک خورشید برای ذخیره انرژی در روز و گرمایش فضا در شب پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در حین تزریق گرما از گردآورنده خورشیدی به داخل زمین، در حدود ۱۸-۵ درصد از انرژی



| | | | | |
|--------|------|------|------|-------|
| عیق | ۰/۰۱ | ۱۰۵۰ | ۱۰/۵ | ۰/۰۴۳ |
| رطوبتی | | | | |
| (برای | | | | |
| سقف) | | | | |

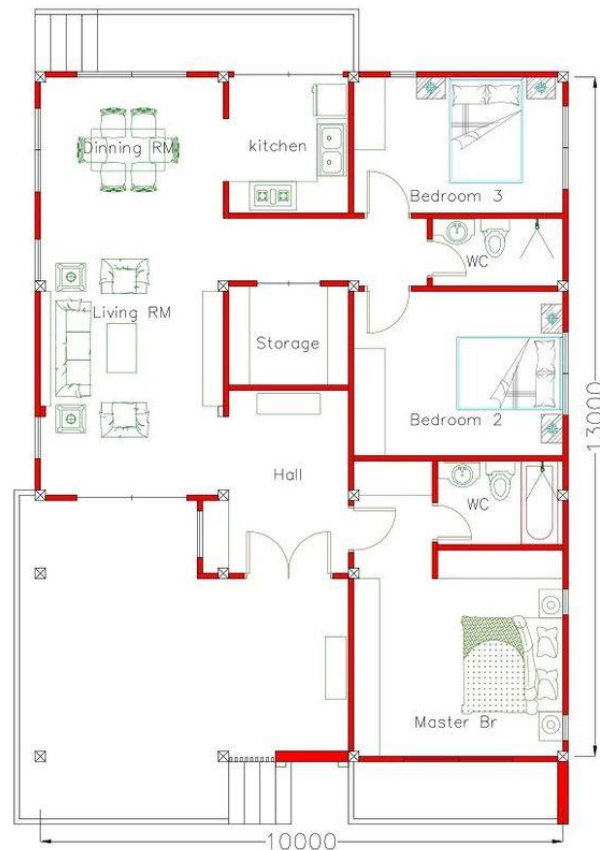
با استفاده از مصالح جدول بالا مقدار ضریب انتقال حرارت برای جداره‌های بیرونی ساختمان با استفاده از عایق حرارتی پلی استایرن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: ضریب انتقال حرارت جداره‌های بیرونی ساختمان

| ضریب انتقال حرارت (U) | نوع دیوار | رویکرد |
|-----------------------|-------------|--------------------|
| ۰/۵۰۱ | دیوار خارجی | با استفاده از عایق |
| ۱/۳۸۶ | دیوار داخلی | حرارتی |
| ۰/۴۹۷ | کف | |
| ۰/۴۵۲ | سقف | |

روش حل عددی

روش حل مورد استفاده در این مطالعه یک روش عددی بر پایه استفاده از نرم افزار ترنسیس است. این برنامه توسط اعضای آزمایشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه ویسکنسین آمریکا طرح و توسعه یافته است. این نرم افزار شامل تعداد زیادی زیر برنامه به زبان برنامه نویسی فرترن^۱ و C می باشد که امکان مدل کردن تمامی اجزای زیرسیستم‌ها را با استفاده از معادلات دیفرانسیلی و معادلات جبری را مدل می کند. در این نرم افزار پس از اینکه همه اجزای سیستم مشخص شد، با رسم نمودارهای ارتباطی بین اجزا در محیط نرم افزار ارتباطات منطقی و اصولی آن‌ها بر پایه اصول و قواعد ریاضی بیان گردید بایستی اطلاعات ورودی که وابسته به زمان نیز می باشند وارد گردد تا پس از حل نیز خروجی‌های مبتنی بر زمان حاصل گردد. خروجی‌های به دست آمده ممکن است هر کدام به عنوان ورودی برای سایر اجزا مورد استفاده قرار گیرند. اجزای زیر برنامه‌های ترنسیس شامل گردآورنده‌های خورشیدی، کنترلرهای دیفرانسیلی، پمپ‌ها، گرم کننده کمکی، بارگذاری‌های گرمایشی، ترموستات‌ها و موارد دیگر می باشد. همچنین زیر برنامه‌هایی برای پردازش اطلاعات تشعشعی، انتگرال گیری و اطلاعات دستی ورودی و خروجی وجود دارد. روش استفاده شده برای شبیه سازی به این صورت است که ابتدا بارهای گرمایشی ساختمان را محاسبه می شود و سپس انرژی ورودی مورد نیاز برای گرمایش ساختمان را به دست می آوریم. بنابراین شبیه سازی سیستم شامل دو قسمت اصلی است: محاسبه بار گرمایشی ساختمان و شبیه سازی سیستم تأمین انرژی.



شکل ۱: نقشه دوبعدی ساختمان اداری

محاسبه بار گرمایی ساختمان بر اساس اطلاعات آب و هوایی شهر کرمان و در مدت یک سال با استفاده از نرم افزار ترنسیس انجام شده است.

مواد و مصالح ساختمانی

مشخصات مصالح مورد استفاده ساختمان برای دیوار خارجی در شبیه سازی به صورت زیر می باشد.

جدول ۱: مصالح ساختمانی مورد استفاده

| جنس مصالح | ضخامت (m) | جرم واحد حجم (kg/m ³) | جرم واحد سطح (kg/m ²) | مقاومت حرارتی لایه (m ² .K/W) |
|-------------------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| گچ سفید | ۰/۰۱ | ۱۳۰۰ | ۱۳ | ۰/۰۴ |
| انود | ۰/۰۲ | ۱۶۰۰ | ۳۲ | ۰/۰۱۷ |
| گچ و خاک | | | | |
| ملات ماسه و سیمان | ۰/۲ | ۲۱۰۰ | ۶۳ | ۰/۰۱۷ |
| آجر | ۰/۰۳ | ۸۵۰ | ۱۷۰ | ۰/۴۲ |
| سنگ | ۰/۰۲ | ۲۴۰۰ | ۴۸ | ۰/۰۰۷ |
| پلی استایرن | ۰/۰۲۱ | ۱۲ | ۱/۲ | ۰/۴۱۲ |

محاسبه بار گرمایشی ساختمان

در محاسبات مصرف انرژی گرمایی سالیانه، پارامترهای اصلی ضریب انتقال حرارت و اینرسی ساختمان هستند، اگر بخواهیم میزان انتقال حرارت را با دقت بالایی تعیین نماییم لازم است عملکرد ساختمان را در حالت ناپایدار و با در نظر گرفتن تغییر پارامترهای آب و هوایی دما، رطوبت و تابش در اوقات مختلف شبانه روز محاسبه کنیم. برای شبیه سازی ساختمان مسکونی در شرایط آب و هوایی شهر کرمان در نرم افزار ترنسسیس شرایط محیطی را شبیه سازی می کنیم. سپس در قسمت ترنیلد^۲ نرم افزار با انتخاب مصالح دیوارهای ساختمان و نوع پنجره ها، بار گرمایشی ساختمان تعیین می شود. برای محاسبه بار حرارتی ساختمان در فصل سرد سال انرژی آزاد شده از هر فرد برابر 0.9 Watt/ft^2 ، 400 Btu/hr انرژی حرارتی ناشی از روشنایی برابر 0.9 Watt/ft^2 است. از آنجا که ساختمان مسکونی است، برای هر فرد یک دستگاه رایانه با توان 100 W در نظر گرفته شده است. شکل ۲ الف محاسبه بار حرارتی در نرم افزار ترنسسیس را نشان می دهد. مقدار بار حرارتی گرمایشی ساختمان اداری مورد بررسی برابر 80000 Btu/hr است و مقدار مصرف الکتریکی ساختمان برابر 28 کیلووات است.

مشخصات سیستم گرمایش خورشیدی

برای راه اندازی سیستم گرمایش خورشیدی از 10 متر مربع پنل فتوولتائیک-حرارتی و یک پمپ حرارتی هوایی با توان 25 کیلووات تشکیل شده است. کل ساختمان یک منطقه حرارتی در نظر گرفته

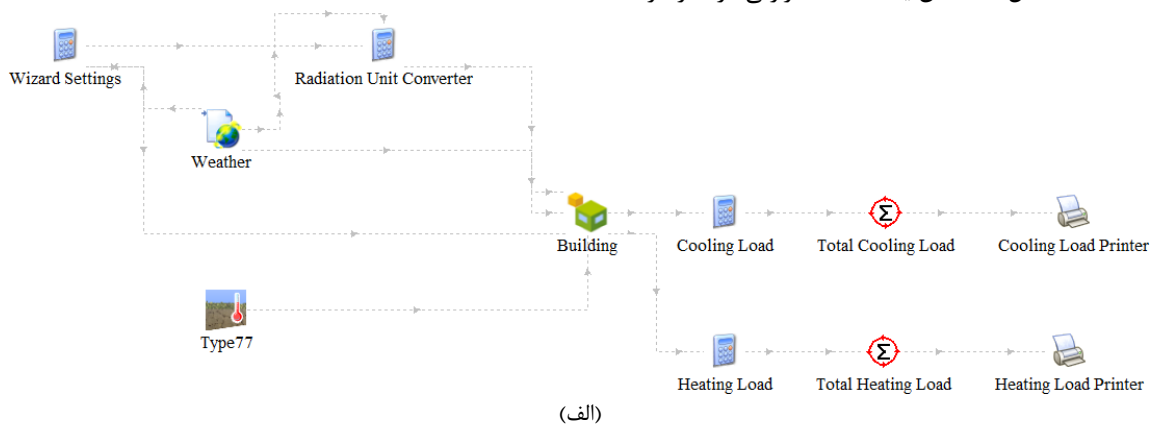
شده است. طرحواره سیستم گرمایش خورشیدی در شکل ۲ ب آورده شده است.

سیستم کنترلی تهویه خورشیدی از یک ترموستات تشکیل شده است. دمای ترموستات برای کاهش مصرف انرژی با توجه به استاندارد اشری^۳ بر روی دمای 21 درجه سانتیگراد تنظیم شده است و دارای باند مرگ^۴ 4 درجه سانتیگراد می باشد. با استفاده از این رویکرد در مصرف انرژی ساختمان صرفه جویی قابل ملاحظه ای صورت می گیرد.

بحث و نتایج

شکل ۳ دمای ساختمان را در صورت استفاده از سیستم گرمایش ترکیبی را نشان می دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، سیستم مورد بررسی به خوبی از عهده تامین بار حرارتی بر آمده است. دمای اتاق در بازه وسیعی از زمان در محدوده مطلوب و آسایش حرارتی قرار دارد. این مسئله نشان دهنده عملکرد مناسب سیستم تهویه طراحی شده است.

شکل ۴ نشان دهنده دمای خروجی از گردآورنده فتوولتائیک-حرارتی است. این نمودار نشان می دهد علیرغم دمای پایین محیط، سیستم حرارتی مورد بررسی توانسته است دمای هوای بیرون را به مقدار مناسبی گرم کند و این هوای گرم شده میتواند بار روی سیستم گرمایشی را به مقدار زیادی کم کند.

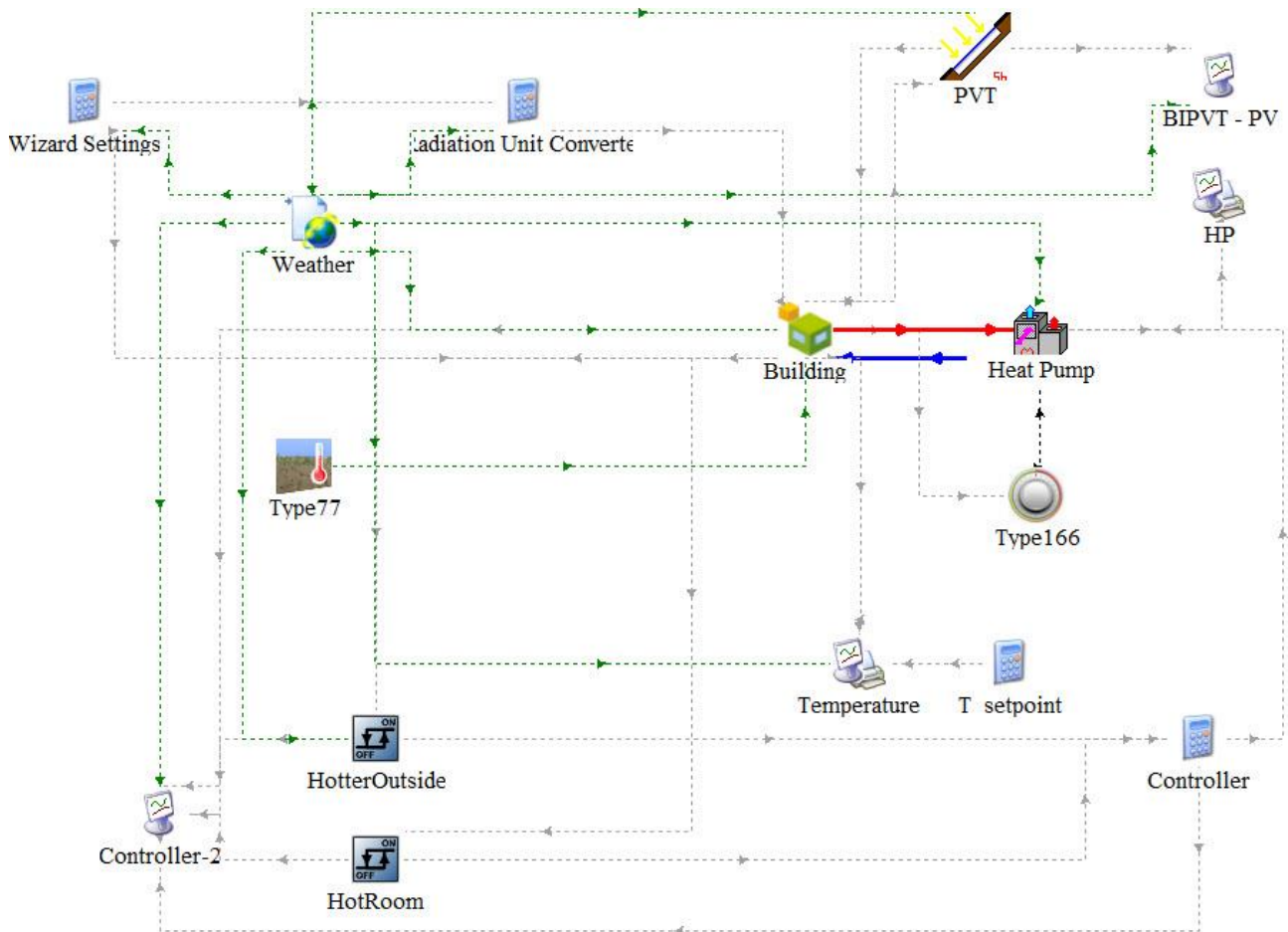


^۳ ASHREA

^۴ Dead band

^۱ FORTRAN

^۲ TRNBUILD

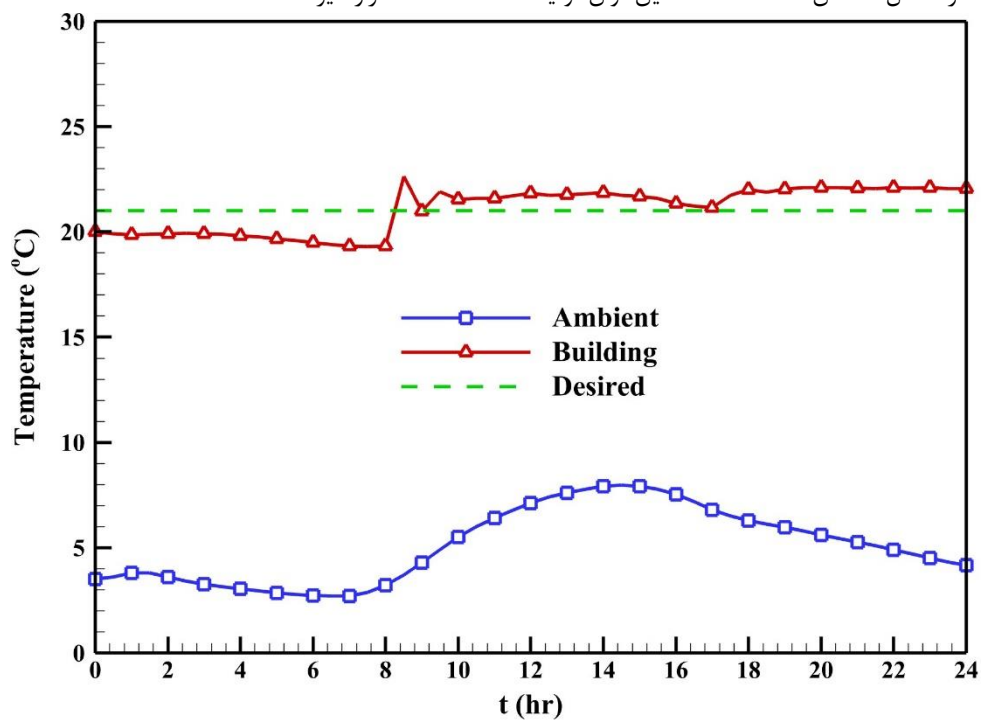


(ب)

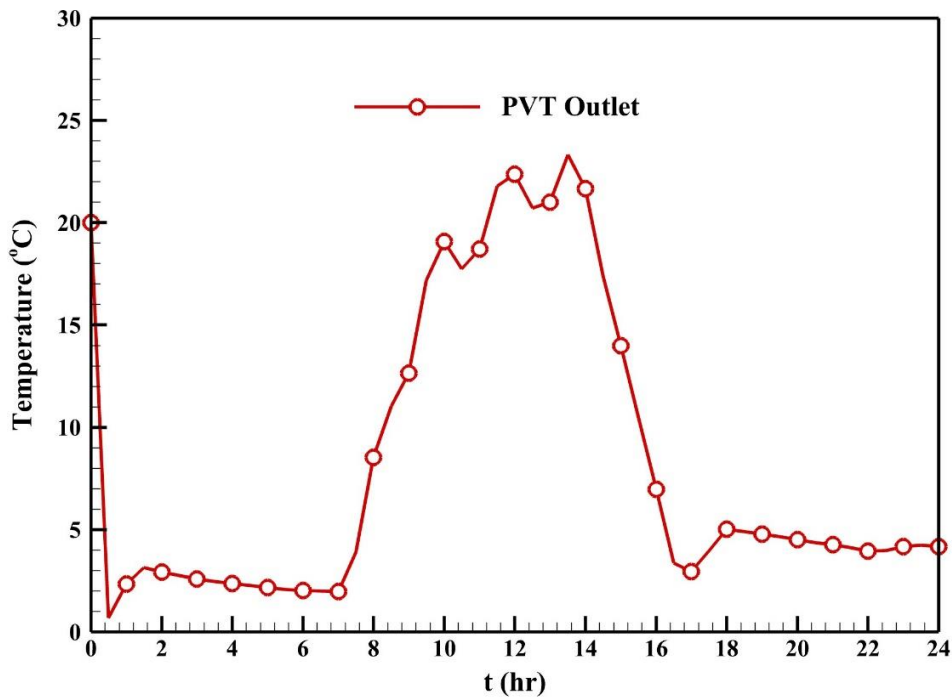
شکل ۲. (الف) محاسبه بار حرارتی گرمایشی و (ب) طرحواره سیستم گرمایش خورشیدی

شده می‌تواند برای تامین بار الکتریکی ساختمان به راحتی مورد استفاده قرار گیرد.

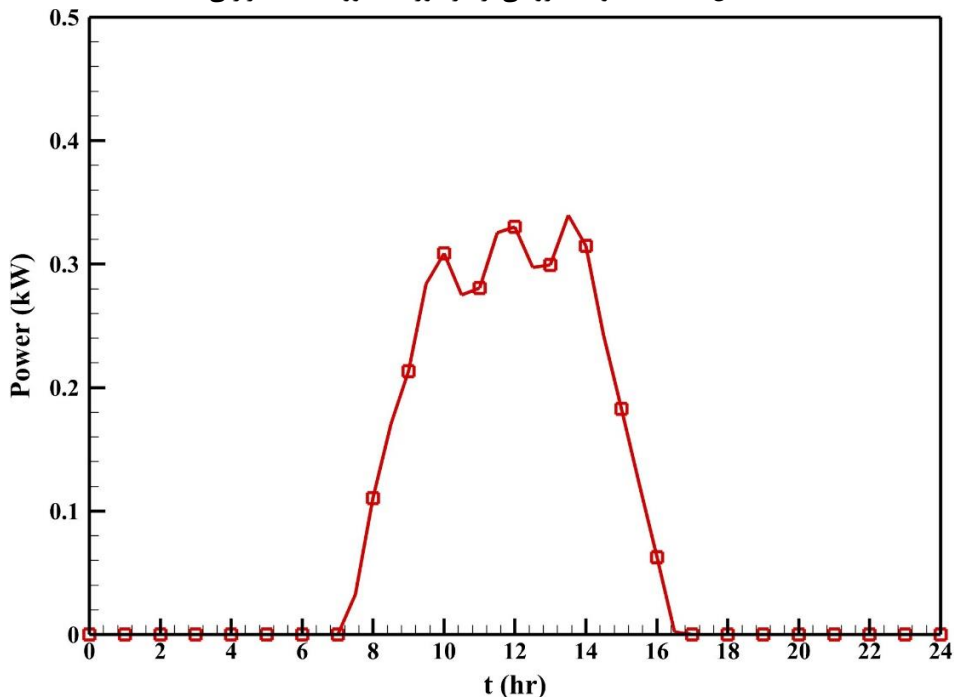
شکل ۵ نشان دهنده توان تولید شده به وسیله صفحات فتوولتائیک است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است این توان تولید



شکل ۳: دمای ناحیه حرارتی، دمای تنظیم شده ترموستات و دمای محیط



شکل ۴. دمیای هوای خروجی از گردآورنده فتوولتائیک-حرارتی



شکل ۵. توان تولید شده توسط صفحات فتوولتائیک

مراجع

- [1] R. Yumrutaş, M. Ünsal, A computational model of a heat pump system with a hemispherical surface tank as the ground heat source, *Energy* 25(4) (2000) 371-388.
- [2] R. Yumrutaş, M. Kunduz, T. Ayhan, Investigation of thermal performance of a ground coupled heat pump system with a cylindrical energy storage tank, *International journal of energy research* 27(11) (2003) 1051-1066.
- [3] R. Yumrutas, Ö. Kaska, Experimental investigation of thermal performance of a solar assisted heat pump system with an energy storage, *International journal of energy research* 28(2) (2004) 163-175.

نتیجه گیری و جمع بندی

این مطالعه به بررسی استفاده از سامانه گردآورنده فتوولتائیک-حرارتی و پمپ حرارتی برای گرمایش یک ساختمان مسکونی در شهر کرمان پرداخته است. نتایج این مطالعه نشان می دهد، این سامانه توانایی تامین بار حرارتی برای گرمایش ساختمان را در شرایط اقلیمی شهر کرمان را دارد. علاوه بر این سامانه توانایی تامین بخشی از نیاز الکتریکی ساختمان را نیز دارا می باشد. این مهم از آنجا دارای ارزش است که سامانه های گردآورنده فتوولتائیک-حرارتی به راحتی بر روی جداره های بیرونی و سقف ساختمان قابل نصب هستند.



- [9] V. Verma, K. Murugesan, Experimental study of solar energy storage and space heating using solar assisted ground source heat pump system for Indian climatic conditions, *Energy and Buildings* 139 (2017) 569-577.
- [10] V. Verma, K. Murugesan, Experimental study of solar assisted ground source heat pump system during space heating operation from morning to evening, *Journal of Mechanical Science & Technology* 32(1) (2018).
- [11] V. Saydam, M. Parsazadeh, M. Radeef, X. Duan, Design and experimental analysis of a helical coil phase change heat exchanger for thermal energy storage, *Journal of Energy Storage* 21 (2019) 9-17.
- [12] J. Menéndez, J. Loredó, M. Galdo, J.M. Fernández-Oro, Energy storage in underground coal mines in NW Spain: Assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance, *Renewable Energy* 134 (2019) 1381-1391.
- [4] H. Esen, M. Inalli, M. Esen, K. Pihtili, Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers, *Building and environment* 42(10) (2007) 3606-3615.
- [5] Y. Bi, X. Wang, Y. Liu, H. Zhang, L. Chen, Comprehensive exergy analysis of a ground-source heat pump system for both building heating and cooling modes, *Applied Energy* 86(12) (2009) 2560-2565.
- [6] S. Lohani, D. Schmidt, Comparison of energy and exergy analysis of fossil plant, ground and air source heat pump building heating system, *Renewable Energy* 35(6) (2010) 1275-1282.
- [7] R. Yumrutaş, M. Ünsal, Energy analysis and modeling of a solar assisted house heating system with a heat pump and an underground energy storage tank, *Solar Energy* 86(3) (2012) 983-993.
- [8] M. Ozturk, Energy and exergy analysis of a combined ground source heat pump system, *Applied thermal engineering* 73(1) (2014) 362-370.

ACEC2021-55442

بهره‌برداری فنی، اقتصادی و زیست محیطی سیستم هاب انرژی با در نظرگیری منابع تبدیل کننده برق به گاز، ذخیره‌ساز هوای فشرده و منابع پاسخگویی بار با روش لکسیکوگراف

سیده سودابه زادسر^۱، سحر مبشری^۲، سبحان دراهکی^۳، مسعود رشیدی نژاد^۴، محمدرضا صالحی زاده^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، zadsars@yahoo.com
^۲ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، s.mobasheri@eng.uk.ac.ir
^۳ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، sobhandorahaki@gmail.com
^۴ استاد، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، mrashidi@uk.ac.ir
^۵ استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، salehizadeh@miau.ac.ir

جدول علائم و نشانه‌ها

| اندیس‌ها | پارامترها |
|---------------------------------------------------------|------------------------------|
| شاخص زمان | t |
| قیمت برق | π_{net}^E |
| قیمت بهره‌برداری از توربین بادی | π_{wind}^E |
| قیمت گاز | π_{net}^G |
| قیمت حرارت | π_{net}^T |
| قیمت آب آشامیدنی ورودی | π_{Drink_water} |
| ضریب بهره‌برداری از آب شیرین کن | $\pi_{Sea\ to\ drink}^{Des}$ |
| هزینه بهره‌برداری از واحد ذخیره‌ساز حرارتی | π_{op}^T |
| هزینه بهره‌برداری از واحد ذخیره‌ساز الکتریکی | π_{op}^E |
| ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی | $W_{storage-max}$ |
| بیشترین مقدار آب ورودی در یک ساعت | W_{max-ch} |
| بیشترین مقدار آب خروجی در یک ساعت | $W_{max-dis}$ |
| ضریب مشارکت در برنامه پاسخگویی بار الکتریکی بالارونده | LPF_{up}^E |
| ضریب مشارکت در برنامه پاسخگویی بار الکتریکی پایین رونده | LPF_{down}^E |
| کمینه ظرفیت ذخیره‌ساز الکتریکی | β_{min}^E |
| کمینه ظرفیت ذخیره‌ساز الکتریکی | β_{max}^E |
| کمینه ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی | β_{min}^H |
| کمینه ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی | β_{max}^H |
| ضریب بهره‌وری تبدیل آب شیرین کن | $\eta_{sea\ to\ drink}$ |
| ضریب راندمان ترانسفورماتور | η_{Trans}^{EE} |
| ضریب راندمان تولیدکننده واحد تولیدی هم‌زمان برق و حرارت | η_{CHP}^{GE} |
| ضریب راندمان کانورتور | η_{Conv}^{EE} |
| بار الکتریکی | P_{demand}^E |

چکیده

هاب انرژی بستری مناسب برای یکپارچه‌سازی منابع و حامل‌های مختلف انرژی به منظور ارتقای انعطاف‌پذیری، قابلیت اطمینان و زیست‌محیطی محور سیستم‌های انرژی را فراهم می‌سازد. با توجه به نرخ نفوذ بالای منابع تولید پاک در درون هاب انرژی، توسعه این گونه سیستم‌ها می‌تواند افزون بر ارتقای بهره‌وری اقتصادی، از جنبه زیست‌محیطی نیز تأثیرگذار باشد. این مقاله، یک روش نوین برای بهره‌برداری از هاب انرژی با در نظرگیری تکنولوژی‌های برق به گاز و ذخیره‌سازی هوای فشرده شده در بستر هاب انرژی ارائه می‌دهد. با توجه به آنکه توابع هدف پیشنهادی مربوط به آلاینده‌گی و هزینه بهره‌برداری از جنس همدیگر نیستند از روش لکسیکوگراف به منظور بهینه‌سازی توأمان هزینه‌های بهره‌برداری و مقدار آلاینده‌گی استفاده می‌شود. به منظور در نظرگیری پارامترهای فنی در درون مدل، قیود بهره‌برداری هر کدام از اجزای هاب مورد مدل‌سازی قرار می‌گیرد. تابع هدف پیشنهادی این مسئله یک تابع هدف از نوع برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح است که در نرم‌افزار گمز با استفاده از حلگر سیمپلکس حل شده است. کارایی چارچوب پیشنهادی از طریق مطالعات موردی بررسی و نتایج بهینه‌سازی با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌های ذکر شده منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و آلاینده‌گی به صورت توأمان می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: هاب انرژی، تکنولوژی برق به گاز، برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، آلاینده‌گی.



| | | | |
|----------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|
| آب خروجی از واحد آب شیرین کن | $W_{Sea\ to\ drink}^{Des}$ | بار گاز | P_{demand}^G |
| شارژ ذخیره ساز حرارتی | P_{ch}^T | بار حرارتی | P_{demand}^T |
| دشارژ ذخیره سازی حرارتی | P_{dis}^T | بار آب | P_{demand}^{water} |
| شارژ ذخیره ساز الکتریکی | P_{ch}^E | ضریب کارایی واحد تولیدی هم زمان برق و حرارت | η_{CHP}^{GT} |
| دشارژ ذخیره ساز الکتریکی | P_{dis}^E | ضریب کارایی واحد بویلر | η_{Boil}^{GT} |
| بار بالارونده شرکت کننده در پاسخگویی بار | P_{up}^E | بیشینه توان حرارتی ورودی از شبکه بالادست | $P_{net-max}^T$ |
| بار پایین رونده شرکت کننده در پاسخگویی بار | P_{down}^E | بیشینه توان گاز ورودی از شبکه بالادست | $P_{net-max}^G$ |
| وضعیت سطح آب ذخیره ساز آب | $W_{storage}$ | بیشینه توان الکتریکی ورودی از شبکه بالادست | $P_{net-max}^E$ |
| آب دریا | W_{sea} | بیشینه آب ورودی از شبکه بالادست | $W_{net-max}^E$ |
| گاز ورودی به واحد تولیدی هم زمان برق و حرارت | P_{netCHP}^G | بیشینه آب خروجی آب شیرین کن | W_{DW-max} |
| گاز ورودی به واحد بویلر | $P_{netboil}^G$ | ظرفیت ذخیره کننده الکتریکی | P_{CAPA}^E |
| بار بالارونده شرکت کننده در پاسخگویی بار | P_{down}^T | ظرفیت ذخیره کننده حرارتی | P_{CAPA}^H |
| بار پایین رونده شرکت کننده در پاسخگویی بار | P_{up}^T | ضریب تلفات الکتریکی ذخیره کننده الکتریکی | g_{loss}^E |
| آب خروجی از ذخیره کننده آب | W_{dis} | ضریب تلفات الکتریکی ذخیره کننده حرارتی | g_{loss}^H |
| آب ورودی از ذخیره کننده آب | W_{ch} | ضریب کمینه استفاده از ظرفیت ذخیره کننده الکتریکی | α_{min}^E |
| توان ورودی به ترانسفورماتور قدرت | $P_{input\ trans}$ | ضریب بیشینه استفاده از ظرفیت ذخیره کننده الکتریکی | α_{max}^E |
| توان ورودی به مبدل CHP | $P_{input\ CHP}$ | ضریب کمینه استفاده از ظرفیت ذخیره کننده حرارتی | α_{min}^H |
| توان ورودی به مبدل بویلر | $P_{input\ Boiler}$ | ضریب بیشینه استفاده از ظرفیت ذخیره کننده حرارتی | α_{max}^H |
| وضعیت شارژ ذخیره ساز الکتریکی | P_s^E | ضریب راندمان شارژ ذخیره کننده الکتریکی. | η_{ES}^{ch} |
| تلفات توان الکتریکی | P_{loss}^E | ضریب راندمان دشارژ ذخیره کننده الکتریکی. | η_{ES}^{dis} |
| توان الکتریکی خروجی واحد CHP | P_{CHP}^E | ضریب راندمان شارژ ذخیره کننده حرارتی. | η_{HS}^{ch} |
| انتشار واحد CHP | Em^{CHP} | ضریب راندمان دشارژ ذخیره کننده حرارتی. | η_{HS}^{dis} |
| انتشار واحد بویلر | $Em^{Boiller}$ | گازهای گلخانه ای CO_2 واحد CHP | $EF_{CO_2}^{CHP}$ |
| انتشار شبکه بالادست | Em^{Net} | گازهای گلخانه ای SO_2 واحد CHP | $EF_{SO_2}^{CHP}$ |
| انتشار تقاضای گاز | Em^G | گازهای گلخانه ای NO_2 واحد CHP | $EF_{NO_2}^{CHP}$ |
| متغیرهای باینری | | | |
| متغیر باینری دشارژ ذخیره سازی حرارتی | I_{dis}^H | گازهای گلخانه ای CO_2 تقاضای گاز | $EF_{CO_2}^G$ |
| متغیر باینری شارژ ذخیره سازی حرارتی | I_{CH}^H | گازهای گلخانه ای SO_2 تقاضای گاز | $EF_{SO_2}^G$ |
| متغیر باینری آب ورودی به ذخیره ساز آب | I_{ch}^W | گازهای گلخانه ای NO_2 تقاضای گاز | $EF_{NO_2}^G$ |
| متغیر باینری آب خروجی به ذخیره ساز آب | I_{dis}^W | گازهای گلخانه ای CO_2 شبکه بالادست | $EF_{CO_2}^{Net}$ |
| متغیر باینری برق ورودی به ذخیره ساز الکتریکی | I_{up}^E | گازهای گلخانه ای SO_2 شبکه بالادست | $EF_{SO_2}^{Net}$ |
| متغیر باینری برق خروجی به ذخیره ساز الکتریکی | I_{down}^E | گازهای گلخانه ای NO_2 شبکه بالادست | $EF_{NO_2}^{Net}$ |
| متغیر باینری شارژ ذخیره کننده الکتریکی | I_{ch}^E | گازهای گلخانه ای CO_2 واحد بویلر | $EF_{CO_2}^{Boiller}$ |
| متغیر باینری دشارژ ذخیره کننده الکتریکی | I_{dis}^E | گازهای گلخانه ای SO_2 واحد بویلر | $EF_{SO_2}^{Boiller}$ |
| | | گازهای گلخانه ای NO_2 واحد بویلر | $EF_{NO_2}^{Boiller}$ |

مقدمه

انرژی همواره یکی از نیازهای اساسی بشر بوده و اکنون نیز با پیدایش فناوریهای مختلف و افزایش وابستگی سبک زندگی انسانها به آن، این نیاز آشکارتر می شود. بنابراین تأمین انرژی پایدار، پاک، ایمن و مقرون به صرفه، با کمترین آلاینده های زیست محیطی یکی از چالش های اصلی قرن حاضر است. گاز و برق به عنوان دو حامل انرژی اولیه بسیار مهم و کاربردی شناخته می شوند. بنابراین نیاز هست که مسائل مربوط به بهره برداری، برنامه ریزی و توسعه در شبکه های برق و گاز به صورت یکپارچه و هم زمان مورد حل قرار گیرند [۱]. بهره برداری هم زمان از زیر ساخت های مختلف انتقال و تولید انرژی گاز و برق موضوعی است که تحت مفهوم هاب انرژی مطرح شده

متغیرها

| | |
|-------------------------------------|---------------------|
| مجموع هزینه های برق | $Cost_{Electrical}$ |
| مجموع هزینه های گاز | $Cost_{Gas}$ |
| مجموع هزینه های حرارت | $Cost_{Thermal}$ |
| مجموع هزینه های آب | $Cost_{water}$ |
| مجموع هزینه های ذخیره ساز الکتریکی | $Cost_{ES}$ |
| مجموع هزینه های حرارتی | $Cost_{TS}$ |
| توان الکتریکی ورودی از شبکه بالادست | P_{net}^E |
| توان واحد بادی | P_{wind}^E |
| گاز ورودی از شبکه بالادست | P_{net}^G |
| حرارت ورودی از شبکه بالادست | P_{net}^T |
| آب آشامیدنی ورودی | W_{Drink_water} |

سیستم هاب انرژی پیشنهاد شده توسط حامل‌های انرژی شبکه (برق، گاز، حرارت و آب) و هزینه‌های برنامه پاسخگویی بار که در ورودی آن عرضه شده و همچنین هزینه‌های انتشار CO_2 , SO_2 , NO_2 مفصل توضیح داده شده است. در بخش چهارم برای ارزیابی اثر بخشی، مدل پیشنهادی در قالب سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه موردی در بخش پنجم ارائه شده است. در بخش پایانی نتیجه‌گیری این مقاله مطرح شده است.

ساختار پیشنهادی

در ساختار ارائه شده، هدف به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری، هزینه برنامه پاسخگویی بار و همچنین هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای سیستم هاب انرژی است. هزینه بهره‌برداری و هزینه‌های انتشار اهداف متفاوتی هستند، بنابراین روش پیشنهادی یک مسئله چندهدفه است. معمولاً از روش مجموع وزنی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود. مسأله چندهدفه به این صورت به یک مسئله تک هدفه تبدیل می‌شود. با این حال، ممکن است از روش‌های خاصی برای حل مسئله تصمیم‌گیری چندمنظوره مانند روش وزنی min-max، لکسیکوگراف، برنامه نویسی فیزیکی و غیره استفاده شود. این مقاله روش لکسیکوگراف چند منظوره را برای حل مسئله تصمیم‌گیری چند هدفه پیشنهاد می‌کند [۹].

در این روش، تصمیم‌گیرنده اولویت اهداف خود را تعیین می‌کند و سپس مطابق اولویت تعیین شده یک سری مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه را حل می‌کند. شکل ۱ روش حل مسئله را نشان می‌دهد. در شکل ۱، اپراتور سیستم هاب انرژی (EHSO) داده‌های ورودی سیستم هاب انرژی و داده‌های تقاضا را دریافت می‌کند. در ادامه، تصمیم‌گیرنده ترتیب اهداف را با توجه به اهمیت آنها، به جای وزن تعیین می‌کند. در این مقاله، هدف اقتصادی به عنوان یک هدف با اولویت بالاتر از هدف زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است. بنابراین، اولاً اپراتور سیستم هدف اقتصادی را با توجه به محدودیت‌های سیستم هاب انرژی حل می‌کند. علاوه بر این، در مرحله دوم، تابع هدف زیست‌محیطی به عنوان یک مسئله تک‌هدفی با محدودیت اضافه شده حل می‌شود، که به صورت $f_1(x) \leq f_1(x_1^*)$ تعیین می‌شود، که در آن x_1^* مقدار بهینه تابع هدف اقتصادی است. از لحاظ ریاضی، روش لکسیکوگراف به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } F_j(x) \\ F_j(x) \leq (1 + \delta_j) F_j(x_j^*) \quad j=1,2,3,\dots,i-1; \quad i=1,2,3,\dots,n \end{aligned} \quad (1)$$

در نهایت با مراجعه به شکل ۱ خروجی‌ها به شرح زیر است:

- هزینه بهره‌برداری از سیستم هاب انرژی
- اثرات پاسخ تقاضا
- ارزش انتشار سیستم هاب انرژی

است. با توجه به قابلیت تبدیل، انتقال و ذخیره‌سازی انرژی در سیستم های هاب انرژی، حامل های ورودی هاب می توانند انواع حامل های انرژی از جمله منابع تولید پاک، برق، آب، خورشید، تکنولوژی تولید همزمان گرما و برق^۱ و ... باشند. همچنین یکسری برنامه‌ها نیز مانند برنامه‌های پاسخگویی بار سمت مصرف کننده در هاب انرژی مطرح شده است [۲]. علاوه بر آن می‌توان حرارت را نیز به عنوان بار، در هاب انرژی در نظر گرفت [۳]. یکی دیگر از فناوری‌هایی که اخیراً مورد توجه قرار گرفته، بکارگیری ذخیره‌سازهایی مانند باتری‌هاست، که هم در بحث هزینه و هم آلاینده‌گی تاثیر به سزایی دارند [۴]. از انواع دیگر ذخیره‌سازها می‌توان به واحدهای تبدیل برق به گاز^۲ و ذخیره‌ساز هوای فشرده شده^۳ اشاره کرد. در [۵] به این موضوع می‌پردازد که چگونه می‌توان مخازن منابع تبدیل کننده برق به گاز را بصورت بهینه برنامه‌ریزی نمود به گونه‌ای که انرژی الکتریکی ارزان و اضافی را به گاز برای بهره‌برداری مفید در بازه زمانی مناسب تبدیل نماید. بدین منظور مدلی جدید برای برنامه‌ریزی رزرو مخازن منابع تبدیل کننده برق به گاز و مدیریت بار شبکه گاز در بازارهای برق و گاز با هدف کمینه سازی هزینه مصرف گاز و با در نظر گرفتن رزرو لازم جهت پوشش وقفه‌های احتمالی در شبکه گاز ارائه شده است. ذخیره‌ساز هوای فشرده شده یک روش کم هزینه است، که نقش مهمی در مدیریت انرژی و بهبود کیفیت توان و ... دارد [۶]. در این راستا، اثرات توأمان ذخیره‌ساز هوای فشرده و باتری با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری مبتنی بر برنامه‌های پاسخگویی بار مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. سیاست‌های آزادسازی انرژی در توسعه دموکراسی انرژی در جامعه بسیار مؤثر است. برنامه‌های پاسخگویی بار و ذخیره‌سازی انرژی، هسته اصلی برنامه‌های دموکراسی انرژی می‌باشند. در [۸] با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخگویی سیاست‌های دموکراسی انرژی، نارضایتی اجتماعی مشترکین مورد بررسی قرار گرفته است.

مطابق مرور انجام شده بر مطالعات پیشین، تأثیر ذخیره‌سازهای نوینی چون منابع تبدیل کننده برق به گاز و ذخیره‌ساز هوای فشرده بر روی هزینه‌های بهره‌برداری سنجیده شده است و کمتر مطالعه‌ای اثرات این منابع را بر روی مطالعات آلاینده‌گی در بستر هاب انرژی مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله اثرات این منابع بر روی بهره‌برداری توأمان اقتصادی و زیست‌محیطی هاب انرژی سنجیده می‌شود. مدل مذکور به روش لکسیکوگراف با استفاده از حل کننده CPLEX در محیط نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شده است.

مقاله پیش‌رو به صورت زیر ساختاریافته است: در بخش دوم مقاله، یک مدل جدید با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و همچنین هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای سیستم هاب انرژی با روش لکسیکوگراف بیان شده است. در بخش سوم، فرمول‌بندی مسئله

^۲ Compressed Air Energy Storage (CAES)

^۳ Energy Hub System Operator (EHSO)

^۱ Combined Heat and Power (CHP)

^۲ Power To Gas (P2G)

بخش دوم تابع هدف شامل هزینه‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای سیستم هاب موردنظر است که در (۴) فرموله می‌شود:

$$\text{Min } f_2 = \sum_{t=1}^N \sum_{s=1}^N \left(Em^{CHP}(t,s) + Em^{boiler}(t,s) + Em^G(t,s) + Em^{NET}(t,s) \right) \quad (4)$$

هزینه‌های انتشار CO_2, SO_2, NO_2 بویلر، منبع تولید همزمان برق و حرارت، مصرف تقاضای گاز و انتشار شبکه اصلی به صورت (۵) تا (۸) در تابع اعمال می‌شوند:

$$Em^{CHP}(t,s) = \left(EF_{CO_2}^{CHP} P_{CHP}^E(t,s) \right) + \left(EF_{SO_2}^{CHP} P_{CHP}^E(t,s) \right) + \left(EF_{NO_2}^{CHP} P_{CHP}^E(t,s) \right) \quad (5)$$

$$Em^{Boiler}(t,s) = \left(EF_{CO_2}^{Boiler} \sum_{m=1}^N P_{Boiler}^g(m,t,s) \right) + \left(EF_{SO_2}^{Boiler} \sum_{m=1}^N P_{Boiler}^g(m,t,s) \right) + \left(EF_{NO_2}^{Boiler} \sum_{m=1}^N P_{Boiler}^g(m,t,s) \right) \quad (6)$$

$$Em^G(t,s) = \left(EF_{CO_2}^G \sum_{m=1}^N P_{demand}^g(m,t) \right) + \left(EF_{SO_2}^G \sum_{m=1}^N P_{demand}^g(m,t) \right) + \left(EF_{NO_2}^G \sum_{m=1}^N P_{demand}^g(m,t) \right) \quad (7)$$

$$Em^{NET}(t,s) = \left(EF_{CO_2}^{NET} P_{net}^E(t,s) \right) + \left(EF_{SO_2}^{NET} P_{net}^E(t,s) \right) + \left(EF_{NO_2}^{NET} P_{net}^E(t,s) \right) \quad (8)$$

قید

محدودیت‌های انرژی الکتریکی، حرارتی، گاز و آب به ترتیب در (۹)–(۱۲) فرموله شده است:

$$\left[\eta_{Trans}^{EE} P_{net}^E(t) \right] + \left[\eta_{CHP}^{GE} P_{netCHP}^G(t) \right] + \left[\eta_{Conv}^{EE} P_{wind}^E(t) \right] + \left[P_{down}^E(t) - P_{up}^E(t) \right] + \quad (9)$$

$$W_{Sea\ to\ drink}^{Des}(t) \sigma_{P2W} + P_{C,S}(t) - P_{CAES}(t) + P_{P2G}(t) - P_{G2P}(t) = P_{demand}^E(t) \quad (10)$$

$$P_{net}^G(t) - P_{netCHP}^G(t) - P_{netBoil}^G(t) = P_{demand}^G(t) \quad (11)$$

$$\left[\eta_{CHP}^{GT} P_{netCHP}^G(t) \right] + \left[\eta_{Boil}^{GT} P_{netBoil}^G(t) \right] + P_{net}^T(t) + \left[P_{dis}^T(t) - P_{ch}^T(t) \right] + \left[P_{down}^T(t) - P_{up}^T(t) \right] = P_{demand}^T(t) \quad (12)$$

$$W_{Sea\ to\ drink}^{Des}(t) + W_{Drink_water}(t) + W_{dis}(t) - W_{Ch}(t) = p_{demand}^{water}(t) \quad (12)$$

توان‌های ورودی الکتریکی، حرارتی، گاز و آب آشامیدنی از شبکه بالادست به ترتیب با (۱۳)–(۱۶) محدود می‌شود [9]:

$$0 \leq P_{net}^E(t) \leq P_{net-max}^E \quad (13)$$

$$0 \leq P_{net}^T(t) \leq P_{net-max}^T \quad (14)$$

$$0 \leq P_{net}^G(t) \leq P_{net-max}^G \quad (15)$$

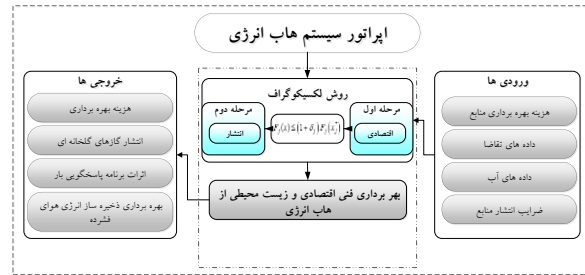
$$0 \leq W_{Drink_water}(t) \leq W_{DW-max} \quad (16)$$

علاوه بر این، توان ورودی ترانسفورماتور توزیع با (۱۷) محدود می‌شود:

$$0 \leq P_{net}^E(t) \leq P_{trans}^{input} \quad (17)$$

همچنین، گاز ورودی منبع تولید همزمان برق و حرارت و بویلر به صورت (۱۸) و (۱۹) بیان شده است:

- بهره‌برداری ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده
- برنامه ریزی واحد انرژی



شکل ۱. روش حل سیستم پیشنهادی

فرمولاسیون مسئله

تابع هدف

تابع هدف سیستم هاب انرژی پیشنهادی شامل دو بخش است که بخش اول شامل کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و بخش دوم شامل کاهش هزینه‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. مسئله موردنظر به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\text{Min } f = \text{Min}(f_1 + f_2) \quad (2)$$

بخش اول تابع هدف موردنظر شامل هزینه‌های بهره‌برداری سیستم هاب انرژی می‌باشد که در (۳) بیان می‌شود:

$$\text{Min } f_1 = \sum_{t=1}^N \left\{ \underbrace{\left(\pi_{net}^E(t) P_{net}^E(t) + \pi_{wind}^E P_{wind}^E(t) \right)}_{\text{Electrical Cost}} + \underbrace{\left(\pi_{net}^G(t) P_{net}^G(t) \right) + \left(\pi_{net}^T(t) P_{net}^T(t) \right)}_{\text{Gas Cost Thermal Cost}} + \underbrace{\left(\pi_{Drink_water}(t) W_{Drink_water}(t) + \pi_{Sea\ to\ drink}^{Des} W_{Sea\ to\ drink}^{Des}(t) \right)}_{\text{Water Cost}} + \underbrace{\left(\pi_{DRP}^E \left(P_{down}^E(t,s) + P_{up}^E(t,s) \right) + \pi_{DRP}^T \left(P_{down}^T(t,s) + P_{up}^T(t,s) \right) \right)}_{\text{DRP Cost}} \right\} \quad (3)$$

سیستم هاب انرژی پیشنهاد شده توسط حامل‌های انرژی شبکه (برق، گاز، حرارت و آب) و هزینه‌های برنامه پاسخگویی بار که در ورودی آن عرضه شده بیان می‌شود. برای تبدیل حامل‌های انرژی شبکه به تقاضاهای مورد نیاز هاب (گرما، برق، گاز و آب) در ساختار داخلی هاب از ترانسفورماتور، منبع تولید همزمان برق و حرارت، بویلر، واحدهای تبدیل برق به گاز و سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده استفاده شده است، هاب مورد نظر پتانسیل بالقوه‌ای برای فروش برق دارد. انرژی تجدیدپذیر باد در مقابله با انتشار گازهای گلخانه‌ای و نیازهای رو به رشد انرژی ضروری می‌باشد. هزینه آب در تابع هدف شامل هزینه آب آشامیدنی ورودی از شبکه آب بالادست و هزینه بهره‌برداری آب شیرین کن می‌باشد. علاوه بر این، بخش‌هایی تابع هدف هزینه برنامه‌های پاسخگویی به تقاضای الکتریکی و حرارتی است.



در (۳۹)-(۴۲) و (۴۳)-(۴۶) محدودیت های ریاضی ذخیره انرژی الکتریکی و حرارتی بیان شده است.

$$\sum_{t=1}^{24} P_{down}^E(t) = \sum_{t=1}^{24} P_{up}^E(t) \quad (۳۹)$$

$$0 \leq P_{up}^E(t) \leq LPF_{up}^E P_{demand}^E(t) I_{up}^E(t) \quad (۴۰)$$

$$0 \leq P_{down}^E(t) \leq LPF_{down}^E P_{demand}^E(t) I_{down}^E(t) \quad (۴۱)$$

$$0 \leq I_{down}^E(t) + I_{up}^E(t) \leq 1 \quad (۴۲)$$

$$\sum_{t=1}^{24} P_{down}^T(t) = \sum_{t=1}^{24} P_{up}^T(t) \quad (۴۳)$$

$$0 \leq P_{up}^T(t) \leq LPF_{up}^T P_{demand}^T(t) I_{up}^T(t) \quad (۴۴)$$

$$0 \leq P_{down}^T(t) \leq LPF_{down}^T P_{demand}^T(t) I_{down}^T(t) \quad (۴۵)$$

$$0 \leq I_{down}^T(t) + I_{up}^T(t) \leq 1 \quad (۴۶)$$

معادلات (۳۹) و (۴۳) نشان می دهد که مجموع تقاضای رو به پایین و رو به بالا در یک روز باید برابر باشد (تغییر بار). معادلات (۴۲) و (۴۶) نشان می دهد که در هر ساعت تنها یک استراتژی DRP قابل اجراست (به سمت بالا یا پایین). مدل منابع تبدیل کننده برق به گاز به شرح زیر است:

$$GS(t) = GS(t-1) + G_{P2G}^{ch}(t) - G_{P2G}^{dis}(t) \quad (۴۷)$$

$$GS^{\min} \leq GS(t) \leq GS^{\max} \quad (۴۸)$$

$$G_{P2G}^{ch, \min} \leq G_{P2G}^{ch}(t) \leq G_{P2G}^{ch, \max} \quad (۴۹)$$

$$G_{P2G}^{dis, \min} \leq G_{P2G}^{dis}(t) \leq G_{P2G}^{dis, \max} \quad (۵۰)$$

$$G_{P2G}^{ch}(t) = \eta_{P2G} P_{P2G}(t) \quad (۵۱)$$

$$G_{P2G}^{dis}(t) = \eta_{G2P} P_{G2P}(t) \quad (۵۲)$$

$$0 \leq P_{G2P}(t) \leq P_{G2P}^{\max} \quad (۵۳)$$

$$0 \leq P_{P2G}(t) \leq P_{P2G}^{\max} \quad (۵۴)$$

محدودیت (۴۷) میزان شارژ سیستم منابع تبدیل کننده برق به گاز را نشان می دهد. سطح شارژ سیستم منابع تبدیل کننده برق به گاز با (۴۸) محدود شده است. شارژ و دشارژ سیستم منابع تبدیل کننده برق به گاز به ترتیب (۴۹) و (۵۰) محدود شده است. علاوه بر این، تبدیل انرژی در سیستم منابع تبدیل کننده برق به گاز با (۵۱)-(۵۴) مدل سازی شده است.

مطالعه موردی

در این مقاله، یک چارچوب جدید بهینه سازی برق و آب در ساختار سیستم هاب انرژی، پیشنهاد شده است. ساختار یکپارچه سیستم هاب انرژی پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است. در اینجا، افق زمانی به صورت ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. همچنین، نیازهای الکتریکی، حرارتی، گاز و آب سیستم هاب انرژی در شکل ۳ نشان داده شده است. حداکثر و حداقل قیمت برق در شکل ۴ ترسیم شده است. همچنین قیمت حرارتی سیستم هاب انرژی پیشنهادی در شکل ۵ نشان داده شده است. علاوه بر این، برای پارامترهای ورودی سیستم هاب انرژی از [10] استفاده شده است.

$$0 \leq P_{netCHP}^G(t) \leq P_{CHP}^{\text{input}} \quad (۱۸)$$

$$0 \leq P_{netB}^G(t) \leq P_{boiler}^{\text{input}} \quad (۱۹)$$

در ادامه، در معادلات (۲۰)-(۲۶) بهره برداری سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده (CAES) را مدل می کنیم.

$$V^{inj}(t) = \alpha^{inj} P_{CAES}(t) \quad (۲۰)$$

$$P_{C,S}(t) = \alpha^P V^P(t) \quad (۲۱)$$

$$V_{min}^{inj} u^{inj}(t) \leq V^{inj}(t) \leq V_{max}^{inj} u^{inj}(t) \quad (۲۲)$$

$$V_{min}^P u^P(t) \leq V^P(t) \leq V_{max}^P u^P(t) \quad (۲۳)$$

$$u^{inj}(t) + u^P(t) \leq 1 \quad (۲۴)$$

$$A(t+1) = A(t) + V^{inj}(t) - V^P(t) \quad (۲۵)$$

$$A^{\min} \leq A(t) \leq A^{\max} \quad (۲۶)$$

معادلات (۲۰) و (۲۱) انرژی ورودی و خروجی در واحد ذخیره سازی هوای فشرده را نشان می دهد. میزان ورودی و خروجی انرژی در واحد ذخیره سازی هوای فشرده به ترتیب با (۲۲) و (۲۳) محدود می شود. سطح انرژی واحد ذخیره سازی هوای فشرده توسط (۲۵) بدست می آید. علاوه بر این، ظرفیت واحد ذخیره سازی هوای فشرده در (۲۶) محدود شده است. محدودیت های بهره برداری ذخیره سازی حرارتی در (۳۲)-(۳۷) ارائه شده است.

$$P_s^T(t) = P_s^T(t-1) + P_{ch}^T(t) - P_{dis}^T(t) - P_{loss}^T(t) \quad (۲۷)$$

$$P_{loss}^T(t) = g_{loss}^T P_s^T(t) \quad (۲۸)$$

$$\alpha_{min}^T P_{CAPA}^T \leq P_s^T(t) \leq \alpha_{max}^T P_{CAPA}^T \quad (۲۹)$$

$$\beta_{min}^T P_{CAPA}^T I_{ch}^T(t) \leq P_{ch}^T(t) \leq \beta_{max}^T P_{CAPA}^T I_{ch}^T(t) \quad (۳۰)$$

$$\beta_{min}^T P_{CAPA}^T I_{dis}^T(t) \leq P_{dis}^T(t) \leq \beta_{max}^T P_{CAPA}^T I_{dis}^T(t) \quad (۳۱)$$

$$0 \leq I_{dis}^T(t) + I_{ch}^T(t) \leq 1 \quad (۳۲)$$

معادله (۲۷) وضعیت ذخیره سازی حرارتی را نشان می دهد. علاوه بر این ، تلفات واحد ذخیره سازی انرژی توسط (۲۸) مدل شده است. ظرفیت ذخیره سازی حرارتی با (۲۹) نشان داده شده است. شارژ و دشارژ ذخیره سازی حرارتی با (۳۰) و (۳۱) محدود شده است. وضعیت واحد ذخیره انرژی حرارتی در هر ساعت با (۳۲) تعیین می شود.

فرمولاسیون ریاضی ذخیره آب به شرح زیر است:

$$W_{storage}(t) = W_{storage}(t-1) + W_{ch}(t) - W_{dis}(t) \quad (۳۳)$$

$$0 \leq W_{storage}(t) \leq W_{storage-max} \quad (۳۴)$$

$$0 \leq W_{ch}(t) \leq W_{max-ch} I_{ch}^W(t) \quad (۳۵)$$

$$0 \leq W_{dis}(t) \leq W_{max-dis} I_{dis}^W(t) \quad (۳۶)$$

$$0 \leq I_{ch}^W(t) + I_{dis}^W(t) \leq 1 \quad (۳۷)$$

واحد نمک زدایی دارای ضریب کارایی است که در (۳۸) در نظر گرفته شده است:

$$W_{Sea to drink}^{Des}(t) = \eta_{sea to drink} W_{sea}(t) \quad (۳۸)$$

جدول ۱: سناریوهای تحت بررسی

| ذخیره ساز هوای فشرده | منابع تبدیل کننده برق به گاز | سناریوها |
|----------------------|------------------------------|----------|
| • | • | سناریو ۱ |
| • | ✓ | سناریو ۲ |
| ✓ | • | سناریو ۳ |
| ✓ | ✓ | سناریو ۴ |

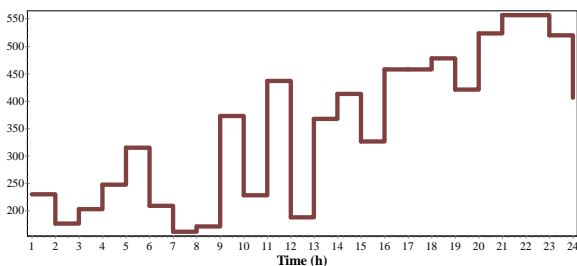
نتایج بهینه سازی

در این مقاله شبیه سازی در بستر نرم افزار گمز با استفاده از حلگر سیمپلکس صورت پذیرفته است. نتایج شبیه سازی در خصوص مقدار هزینه های بهره برداری و مقدار آلاینده گی در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین سناریو در کنار هم قرارگیری ذخیره ساز هوای فشرده و منابع تبدیل کننده برق به گاز است. با در نظرگیری این دو در کنار هم دیگر هزینه های بهره برداری به طور چشمگیری کاهش یافته و آلاینده ها نیز کاهش می یابند. ذکر این نکته ضروری است که وجود ذخیره ساز هوای فشرده و منابع تبدیل کننده برق به گاز هر دو باعث کاهش آلاینده ها می گردند اما تأثیر مقدار منابع تبدیل کننده برق به گاز بر مقدار آلاینده ها بیشتر است که دلیل آن را می توان در حجم منابع تبدیل کننده برق به گاز جست. (حجم لحاظ شده برای آن بیشتر ذخیره ساز هوای فشرده است). این مسئله باعث شده است که مقدار آلاینده گی قابل کاهش در قالب یک ذخیره ساز توسط واحد منابع تبدیل کننده برق به گاز پوشش داده شود و دیگر اگر چه اضافه شدن ذخیره ساز هوای فشرده به سناریو ۴ باعث شده هزینه بهره برداری نسبت به سناریو ۲ کاهش یابد اما مقدار کاهش آلاینده گی به حد اشباع رسیده است.

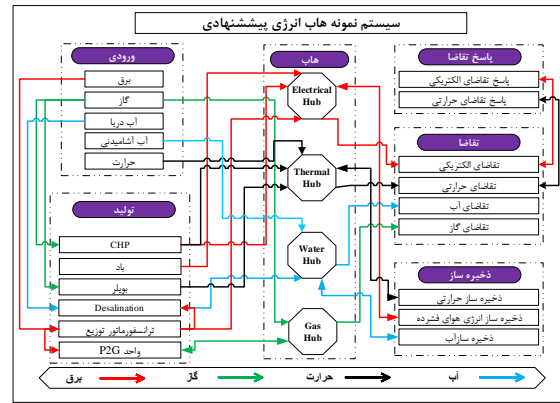
جدول ۲: هزینه و مقدار آلاینده گی سناریوهای مختلف

| سناریوها | هزینه (\$) | آلاینده گی (kg) |
|----------|------------|-----------------|
| سناریو ۱ | ۶۱۴۹۸۲ | ۸۶۸۸ |
| سناریو ۲ | ۶۰۷۸۶۱ | ۸۴۲۴ |
| سناریو ۳ | ۶۱۳۰۲۳ | ۸۶۴۱ |
| سناریو ۴ | ۶۰۷۰۱۳ | ۸۴۲۴ |

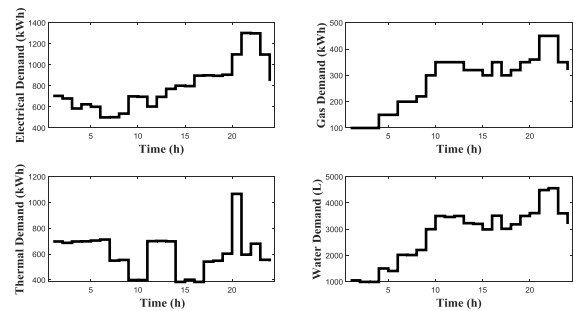
مقدار آلاینده گی ساعتی سیستم های انرژی تحت بررسی در شکل ۶ نشان داده شده است. نتیجه این شکل نشان میدهد که مقدار آلاینده گی در ساعت ۲۰-۲۳ به بیشترین حد خود رسیده است که دلیل آن را می توان در پیک بار الکتریکی، حرارتی و... دانست.



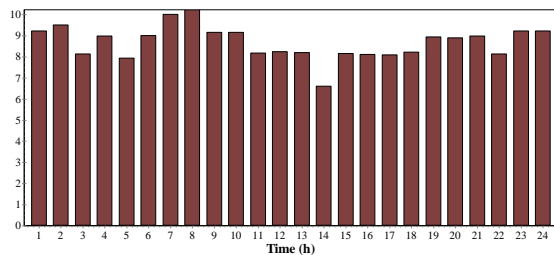
شکل ۶: مقدار آلاینده گی ساعتی تولیدی هاب انرژی



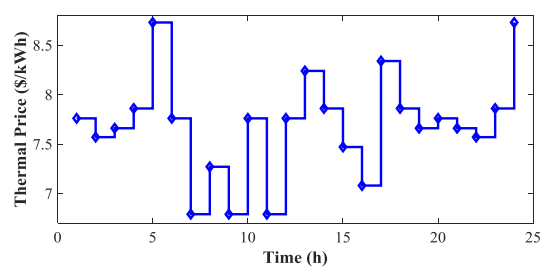
شکل ۲: سیستم نمونه هاب انرژی پیشنهادی



شکل ۳: تقاضاهای الکتریکی، حرارتی، گاز و آب سیستم هاب انرژی



شکل ۴: قیمت برق در هاب انرژی



شکل ۵: قیمت حرارتی سیستم هاب انرژی پیشنهادی

در این مقاله به منظور ارزیابی اثرات منابع تبدیل کننده برق به گاز و ذخیره ساز هوای فشرده بر روی هزینه بهره برداری و آلاینده گی جدول سناریوهای زیر ارائه گردیده است. بدین منظور، در سناریو اول هیچکدام از منابع لحاظ شده است. در سناریو دوم اثر منابع تبدیل کننده برق به گاز در نظر گرفته شده و از اثر ذخیره ساز هوای فشرده چشم پوشی شده است. در سناریو سوم عکس سناریو دوم عمل شده است. در سناریو آخر اثرات ذخیره ساز هوای فشرده و منابع تبدیل کننده برق به گاز به صورت توأمان در نظر گرفته شده است.

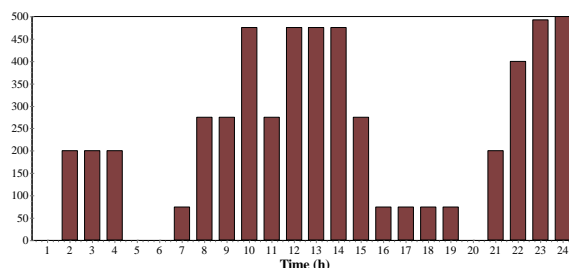


آلایندگی ناشی از هاب‌های به هم پیوسته مختلف و با المان‌های متفاوت مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

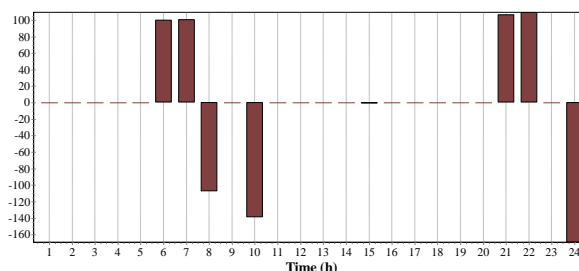
- [1] Y. Xue, et al., 2018. "Optimal coordinated operation of electricity and natural gas distribution networks with power-to-gas facilities," in Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia, ISGT Asia'18, pp. 294-299, Singapore, Singapore, 22-25.
- [2] P. Siano, "Demand response and smart grids — A survey," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 30, pp. 461-478, 2011.
- [3] Kienzle, F., Ahčin, P., Andersson, G., 2011. "Valuing investments in multi-energy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty," IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 2.
- [4] S. Dorahaki, R. Dashti, H.R. Shaker, Apr. 2020. "Optimal energy management in the smart microgrid considering the electrical energy storage system and the demand-side energy efficiency program", J. Energy Storage 28, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101229>.
- [5] H. Khani and H. E. Z. Farag., 2018. "Optimal day-ahead scheduling of power-to-gas energy storage and gas load management in wholesale electricity and gas markets," IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 9, no. 2, pp. 940-951.
- [6] X. Luo, J. Wang., 2013. "Overview of current development on compressed air energy storage", University of Warwick, Coventry, UK, School of Engineering.
- [7] Zeynali S, Rostami N, Ahmadian A, Elkamel., 2021. "A Robust multi-objective thermal and electrical energy hub management integrating hybrid battery-compressed air energy storage systems and plug-in-electric-vehicle-based demand response". J Energy Storage; 35:102265.
- [8] S. Dorahaki, A. Abdollahi, M. Rashidinejad, M. Moghbeli., 2021 "The role of energy storage and demand response as energy democracy policies in the energy productivity of hybrid hub system considering social inconvenience cost", Journal of Energy Storage, vol. 33, p. 102022
- [9] M. Mollahassani-pour, M. Rashidinejad, A. Abdollahi, M.A. Forghani., 2017. "Demand Response Resources' Allocation in Security-Constrained Preventive Maintenance Scheduling via MODM Method", IEEE Syst. J. 11 (2). 1196–1207, <https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2424675>.
- [10] S. Dorahaki, R. Dashti, and H. R. Shaker., 2020. "Optimal Outage Management Model Considering Emergency Demand Response Programs for a Smart Distribution System, Applied Sciences". vol. 10, no. 21, p. 7406, Oct. <https://doi.org/10.3390/app10217406>

مقدار گاز ذخیره شده در درون منابع تبدیل کننده برق به گاز در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به مقدار بارهای هاب انرژی، واحد منابع تبدیل کننده برق به گاز به منظور کاهش آلایندگی‌های زیست محیطی و بهبود هزینه‌های بهره‌برداری به شیفت بار پرداخته است.



شکل ۷. مقدار گاز ذخیره شده در درون واحد منابع تبدیل کننده برق به گاز

همچنین یکی دیگر از برنامه‌هایی که می‌تواند به بهره‌برداری منعطف‌تر از شبکه کمک کند برنامه پاسخگویی بار الکتریکی است که نمودار آن در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. مقدار شیفت بار در برنامه پاسخگویی بار الکتریکی

نتیجه گیری

در این مقاله، مدلی برای بهره‌برداری بهینه از هاب انرژی با در نظرگیری توابع هدف اقتصادی و زیست محیطی ارائه شد. همچنین قیود فنی مسئله نیز در کنار تابع هدف مدل سازی گردید. به منظور حل مسئله از روش لکسیکوگراف به عنوان یکی از روش‌های برنامه‌ریزی چندهدفه استفاده شد. به منظور ارزیابی اثرات ذخیره‌سازی انرژی نوین بر روی مقدار هزینه بهره‌برداری از هاب انرژی و همچنین مقدار آلایندگی خروجی ۴ سناریو در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که وجود ذخیره‌سازی هوای فشرده و منابع تبدیل کننده برق به گاز هر دو باعث کاهش آلایندگی می‌گردند اما تأثیر مقدار منابع تبدیل کننده برق به گاز بر مقدار آلایندگی بیشتر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که حجم زیاد یک ذخیره‌کننده (مانند منابع تبدیل کننده برق به گاز) می‌تواند مسئله را از نظر مقدار کاهش آلایندگی که با استفاده از یک ذخیره‌ساز می‌توان اتفاق بیفتد اثرگذار باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد پیک بار الکتریکی، حرارتی و ... می‌تواند بر روی ساعات پیک آلایندگی اثرگذار باشد. در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود این مطالعه با به‌بهم پیوستن چند هاب انرژی و بررسی

ACEC2021-57948

مروری بر روش‌های کاهش اثرات سایه‌اندازی دور و نزدیک در نیروگاه‌های خورشیدی و نحوه شبیه‌سازی سایه‌های دور در نرم‌افزار Pvsyst

امیرمحمد عادل^۱، محمد پرهام‌فر^۲

^۱ کارشناس ارشد مهندسی برق، برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران؛ a.adeli@mail.sbu.ac.ir
^۲ کارشناس ارشد انرژی‌های تجدیدپذیر، مشاور صنعت برق و انرژی، en.parhamfar@gmail.com

چکیده

سیستم‌های فتوولتائیک، برای استفاده در کاربردهای متصل به شبکه و مستقل از شبکه محبوبیت زیادی دارند. این سیستم‌ها از مزایایی مانند ساکن بودن، ماژولار بودن، سازگاری با محیط زیست و... برخوردار بوده و نور خورشید، که منبع دائمی انرژی پاک و سبز می‌باشد را به توان الکتریکی تبدیل می‌کنند. تبدیل انرژی در سیستم‌های فتوولتائیک هر چند آنی است، اما به دلیل تلفات نوری و الکتریکی، کارایی کمی دارد. تلفات نوری ناشی از ایجاد سایه دور یا نزدیک - روی یک ماژول، باعث کاهش خروجی کل سیستم فتوولتائیک می‌شود. بنابراین استفاده از روش‌های مختلف برای کاهش اثرات سایه‌اندازی در سیستم‌های فتوولتائیک، بخش جدایی‌ناپذیر یک واحد تامین توان می‌باشد. بسیاری از این روش‌ها ادبیات مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. هر یک از این روش‌ها آسیب‌پذیری خاصی را نشان می‌دهند. بنابراین، در این مقاله ابتدا به بررسی اثرات مخرب سایه‌های دور و نزدیک در سیستم‌های فتوولتائیک می‌پردازیم. سپس، یک مطالعه مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف کاهش تاثیر سایه‌های نزدیک (سایه جزئی) در نیروگاه‌های فتوولتائیک انجام ارائه داد؛ و در پایان، نحوه شبیه‌سازی سایه‌های دور به کمک نرم‌افزار Pvsyst و Meteonorm را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

واژه‌های کلیدی: انرژی پاک، سیستم فتوولتائیک، استرینگ، سایه دور و سایه نزدیک، نرم افزار Pvsyst، نرم‌افزار Pvsyst و Meteonorm

۱. مقدمه

مصرف انرژی الکتریکی به طور روز افزون در سراسر جهان در حال افزایش است. با بالا رفتن مصرف برق، تقاضا برای تولید انرژی از نیروگاه‌ها با منابع مختلف انرژی - اعم از منابع تجدیدپذیر یا متعارف انرژی - نیز افزایش خواهد یافت [1]. استفاده از منابع انرژی متعارف باعث تخریب محیط زیست به دلیل تأثیر آلودگی و واکنش‌های شیمیایی آلی می‌شود. بنابراین، در آینده‌ای نزدیک، نیاز به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش خواهد یافت. انرژی‌هایی که از نوع خورشیدی، بادی، بیوگاز، زمین گرمایی و ... هستند. [2] در بین این گزینه‌ها، سیستم فتوولتائیک^۱ یک گزینه عالی برای کاربردهای مختلف از جمله ساختمان‌های مسکونی و تجاری، وسایل نقلیه الکتریکی^۲، سیستم‌های پمپاژ آب و خانه‌های روستایی به حساب می‌آید. با این حال، توان فتوولتائیک تولید شده عمدتاً به تابش خورشید و دمای محیط بستگی دارد. اهمیت این دو پارامتر در دستیابی به نقطه حداکثر توان^۳ یک ماژول فتوولتائیک مشخص می‌شود.

با وجود پیشرفت‌های اخیر در فاکتورهای مربوط به استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک، مانند کاهش هزینه، افزایش راندمان سلول، و بهبود ادغام ساختاری در ساختمان‌ها، چالش اصلی تولید برق از سیستم‌های فتوولتائیک، وابستگی شدید آنها به عوامل محیطی از جمله تابش خورشید و دمای محیط است [3]. بنابراین، ردیابی دقیق نقطه توان حداکثر^۴ در سیستم‌های فتوولتائیک مساله بسیار مهمی است. از این رو، واحد کنترل باید با استفاده از یک الگوریتم ردیابی نقطه توان حداکثر، قادر به جمع‌آوری حداکثر انرژی از ترمینال خروجی آرایه‌های فتوولتائیک نصب شده باشد. این عمل با

^۱ Photovoltaic

^۲ Electric Vehicle

^۳ Maximum Power Point

^۴ Maximum Power Point Tracking

که برای کاهش اثر سایه‌های نزدیک مورد استفاده قرار می‌گیرند را در قالب یک مطالعه مقایسه‌ای مورد بحث قرار خواهیم داد. در پایان، نحوه شبیه‌سازی سایه‌های دور به کمک نرم‌افزار Pvsyst و Meteororm ارائه خواهد شد.

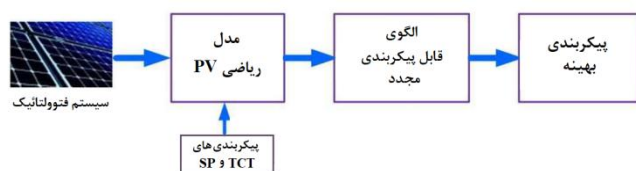
۲. پیکربندی مجدد آرایه‌های فتوولتائیک

همانطور که در بخش قبل بیان شد، تحقیقات در زمینه‌های مختلف سیستم‌های فتوولتائیک منجر به توسعه استراتژی‌های پیکربندی مجدد آرایه‌ها شده است، که شامل پیکربندی مجدد ماژول‌های فتوولتائیک درون آرایه به منظور افزایش حداکثر توان در شرایط سایه‌اندازی روی ماژول یا آرایه می‌باشد. بر اساس ادبیات موجود، این استراتژی‌ها می‌توانند به دو دسته اصلی طبقه‌بندی شوند: (۱) تکنیک‌های پیکربندی مجدد دینامیک آرایه و (۲) تکنیک‌های پیکربندی مجدد استاتیک آرایه.

در پیکربندی مجدد دینامیک، طرح اتصال ماژول‌های فتوولتائیک در آرایه به طور پویا بر اساس سطح تابش برای افزایش حداکثر توان در حال تغییر است. ساختار کنترلی پیکربندی مجدد دینامیک در شکل ۱ نشان داده شده است. این مدل شامل یک سیستم جمع‌آوری داده^۵ می‌باشد که به منظور جمع‌آوری اطلاعات میدانی مورد نیاز برای مدل ریاضی فتوولتائیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم، پیکربندی بهینه را شناسایی می‌کند و بر اساس آن، عملکرد کنترل را به ماتریس سوئیچینگ می‌دهد. در پیکربندی استاتیک، مکان فیزیکی ماژول‌ها در آرایه فتوولتائیک بدون تغییر در اتصالات الکتریکی برای توزیع اثرات سایه‌اندازی برای افزایش خروجی برق، تغییر می‌کند. مراحل مختلف تکنیک پیکربندی مجدد استاتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. این تکنیک فقط به یک الگوی قابل تنظیم برای ماژول‌های فتوولتائیک به منظور توزیع اثرات سایه بر روی آرایه نیاز دارد.



شکل ۱. ساختار پیکربندی مجدد دینامیک آرایه فتوولتائیک



شکل ۲. ساختار پیکربندی مجدد استاتیک آرایه PV

استراتژی‌های پیکربندی مجدد را می‌توان برای انواع مختلف کاربردهای فتوولتائیک اعمال کرد [7]: (۱) حالت اول؛ زمانی که نیروگاه فتوولتائیک تحت تأثیر سایه‌ی یک جسم ثابت پیش‌بینی

ایجاد یک چرخه کار مناسب برای مبدل DC-DC انجام می‌شود. با وجود تمام عوامل تأثیرگذار مانند بهره‌وری مواد، یکپارچه‌سازی و پیکربندی ساختاری، اما اقتصادی‌ترین راه برای افزایش کارایی سیستم‌های فتوولتائیک، افزایش توانایی ردیابی نقطه توان حداکثر ماژول‌ها می‌باشد.

از آنجا که ماژول‌های فتوولتائیک دارای ویژگی‌های غیرخطی هستند، چالش‌های بسیاری در استفاده از آنها برای تولید برق وجود دارد: (۱) بخشی از انرژی خورشیدی دریافت شده به دلیل پایین بودن بازده تبدیل ماژول‌های فتوولتائیک به صورت گرما تلف می‌شود؛ (۲) انرژی تولید شده توسط یک ماژول فتوولتائیک در تمام زمان‌ها یکسان و ثابت نیست، زیرا کاملاً به میزان تابش و دمای محیط وابسته است؛ و (۳) ماژول‌های فتوولتائیک تحت شرایط سایه‌اندازی - دور یا نزدیک - با کاهش راندمان روبرو خواهند شد [4]. بنابراین، تمام عواملی که در بالا ذکر شد، فاصله‌ای بین تولید واقعی انرژی و انرژی استخراج شده از یک ماژول فتوولتائیک ایجاد می‌کنند.

سایه نزدیک یا سایه جزئی^۱ شامل سایه‌اندازی اجسام نزدیک مانند درختان، ساختمان‌ها و یا عبور ابر از بالای یک نیروگاه فتوولتائیک می‌باشد. اما سایه دور^۲ به سایه‌ی اجسام دور مانند تأثیر یک کوه در اطراف نیروگاه اشاره دارد. تفاوت اصلی سایه‌های دور و نزدیک این است که تأثیر سایه‌های دور معمولاً روی کل نیروگاه می‌باشد ولی سایه‌های نزدیک بر روی عملکرد یک یا چند ماژول از نیروگاه تأثیر می‌گذارند.

امروزه، جامعه علمی در تلاش برای بهبود کارایی تبدیل انرژی ماژول‌های فتوولتائیک و کاهش هزینه هر کیلووات توان تولیدی از این ماژول‌ها است. علاوه بر این، بسیاری از محققان برای ردیابی حداکثر توان سیستم فتوولتائیک، الگوریتم‌های ردیابی نقطه توان حداکثر جدیدی را ایجاد کرده‌اند [5]. به زبان ساده، این الگوریتم‌ها ماژول را مجبور می‌کنند که تحت هر میزان تابش خورشیدی، در نقطه توان حداکثر خود کار کنند. طی سالهای گذشته، تحقیقات در زمینه‌های مختلف سیستم فتوولتائیک، منجر به توسعه استراتژی‌های پیکربندی مجدد آرایه‌ها شده است، که شامل پیکربندی مجدد ماژول‌های فتوولتائیک درون آرایه به منظور افزایش حداکثر توان در شرایط سایه‌اندازی روی ماژول یا آرایه می‌باشد. بر اساس ادبیات موجود، این استراتژی‌ها می‌توانند به دو دسته اصلی طبقه‌بندی شوند: (۱) تکنیک‌های پیکربندی مجدد دینامیک آرایه^۳ و (۲) تکنیک‌های پیکربندی مجدد استاتیک آرایه^۴ [6].

در ادامه این مقاله، به بررسی این تکنیک‌ها و تأثیر سایه نزدیک بر روی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک می‌پردازیم. سپس روش‌هایی

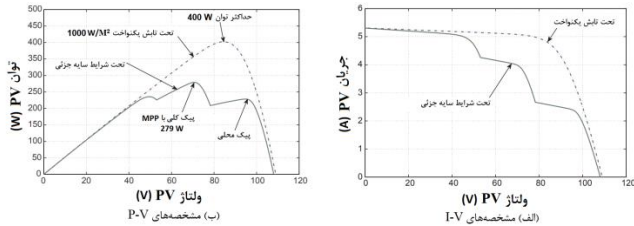
^۱ Partial Shading

^۲ Far Shading

^۳ Dynamic PV Array Reconfiguration

^۴ Static PV Array Reconfiguration

^۵ Data Acquisition System



شکل ۳. مشخصه‌های I-V و P-V آرایه در حالت یکنواخت و تحت شرایط سایه جزئی

تحت این شرایط، هر ماژول فتوولتائیک مشخصه I-V خواهد داشت که منجر به تلفات عدم تطابق در سیستم فتوولتائیک می‌شود. تلفات عدم تطابق را می‌توان به تلفات عدم تطابق داخلی و خارجی طبقه‌بندی کرد. تلفات عدم تطابق داخلی به چندین عامل از جمله ویژگی‌های غیرهمگن سلول‌های خورشیدی، نقص در تولید، سلول-های خورشیدی معیوب، سوء عملکرد ماژول‌های فتوولتائیک و اثر فیزیکی دوپینگ^۵ بستگی دارد [9]. عوامل خارجی شامل تخریب مواد سلول، آلودگی رسوب یافته در سطح سلول، دماهای مختلف و شرایط تابش می‌باشند. بنابراین، همه این عوامل ممکن است منجر به کاهش عملکرد ماژول‌ها در آرایه فتوولتائیک شود. حداکثر توان بدست آمده در شرایط سایه جزئی، کمتر از حالت تابش یکنواخت است. با این حال، نمی‌توان از این تلفات جلوگیری کرد، اما با استفاده از تکنیک‌های موثر می‌توان آن را به حداقل رساند.

۴. تکنیک‌های کاهش اثرات سایه جزئی

روش‌های مختلفی برای کاهش اثر سایه‌اندازی بر عملکرد آرایه فتوولتائیک وجود دارد. این تکنیک‌ها به دو گروه عمده طبقه‌بندی می‌شوند: (۱) توپولوژی‌های مدار محور (۲) روش‌های اصلاح شده مبتنی بر MPPT [10].

۱.۴. توپولوژی‌های مدار محور

این تکنیک‌ها برای بهینه‌سازی راندمان ریدیابی در شرایط سایه-اندازی جزئی، در پیکربندی مدار گسترش یافته‌اند. همه این روش‌های عمومی که دارای تنوع کمی در الگوی مداری یا کنترلی هستند، با هم در یک طبقه دسته‌بندی شده و تحت عنوان توپولوژی‌های مدار محور مقایسه می‌شوند.

۱.۱.۴. دیودهای بای‌پس

همانطور که در شکل ۴ (الف و ب) نشان داده شده است، ماژول‌های فتوولتائیک به طور کلی با دیود بای‌پس^۶ ارائه می‌شوند تا اثر نقطه داغ که به دلیل ایجاد سایه بوجود می‌آید را به حداقل برسانند.

شده قرار می‌گیرد. این مورد برای نیروگاه‌های فتوولتائیک که روی سقف ساختمان قرار می‌گیرند یا با نمای ساختمان‌ها ادغام می‌شوند، مرسوم است. از آنجا که سیستم‌های فتوولتائیک ادغام شده با ساختمان^۱، امکان استفاده از ناحیه وسیع‌تر در معرض نور خورشید توسط راه‌فرام می‌کنند، مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. در چنین کاربردهایی، رویکرد پیکربندی استاتیک نیز می‌تواند برای توزیع اثر سایه ثابت به طور مساوی در مکان‌های مختلف اعمال شود. (۲) حالت دوم؛ هنگامی که بخشی از یک نیروگاه بزرگ فتوولتائیک تحت تأثیر عبور ابرها قرار می‌گیرد. بسته به سرعت ابرهایی که بر روی نیروگاه ایجاد سایه می‌کنند، شرایط تابش می‌تواند به طور ناگهانی تغییر کند و منجر به وخامت زیادی در کارایی سیستم فتوولتائیک شود که این شرایط ممکن است مدت زمان زیادی طول بکشد، بنابراین در صورت خرابی یک یا چند ماژول خورشید، تولید انرژی حاصل از منبع خورشیدی متوقف می‌شود که می‌توان با استفاده از رویکرد دینامیک به طور خودکار تولید توان را متوقف نمود.

۳. سایه جزئی و تاثیرات عدم تطابق

به منظور بهره‌برداری هرچه بیشتر از انرژی تابشی خورشید، لازم است انواع تلفاتی که در مسیر حرکت الکترون‌ها وجود دارد را به حداقل مقدار ممکن رساند. یکی از این تلفات، تلفات بر اثر عدم تطابق^۲ است. این حالت زمانی رخ می‌دهد که منحنی مشخصه‌های دو ماژول با یکدیگر تفاوت داشته باشند.

به طور کلی، آرایه فتوولتائیک تحت دو شرایط ممکن کار می‌کند، حالت تابش یکنواخت^۳ و شرایط سایه جزئی^۴. در شرایط یکنواخت، میزان تابش روی تمام ماژول‌های فتوولتائیک در یک آرایه با هم برابر هستند. به طوری که هر ماژول می‌تواند حداکثر توان را تولید کند و عملکرد کلی آرایه را بهبود بخشد. مشخصه‌های I-V و P-V آرایه در حالت یکنواخت و شرایط سایه جزئی به ترتیب در شکل ۳ (الف) و (ب) نشان داده شده است. همانطور که اشاره شد، در صورتی که آرایه فتوولتائیک توسط یک درخت و یا به دلیل عبور ابرها دچار سایه شود، به این حالت سایه‌اندازی جزئی می‌گویند. در یک ماژول فتوولتائیک، میزان تابش دریافتی توسط سلول‌های سایه-دار کمتر از سلول‌های بدون سایه نیست، بلکه این مساله باعث گرم شدن سلول سایه‌دار می‌شود. بعلاوه، این حالت ممکن است به سلول‌ها یا ماژول‌ها آسیب برساند. با این حال، برای غلبه بر این مشکل، یک دیود بای‌پس به صورت موازی با هر سلول (ماژول) فتوولتائیک متصل می‌شود تا یک مسیر جریان جایگزین در طول ایجاد سایه جزئی فراهم کند.

^۱ Building Integrated Photovoltaics

^۲ Mismatch

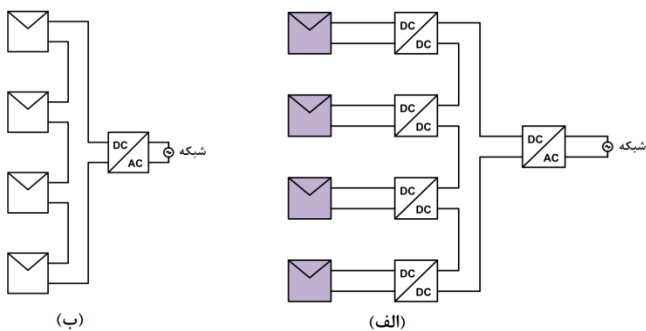
^۳ Uniform Irradiance Condition

^۴ Partial Shading Condition

^۵ Doping

^۶ Bypass Diode

دستیابی به پیک کلی ردیابی نقطه توان حداکثر در ماژول‌های فتوولتائیک ممکن می‌شود.

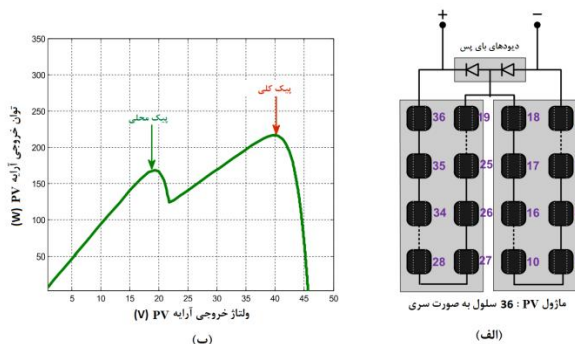


شکل ۵. معماری سیستم فتوولتائیک (الف) معماری مبدل مرکزی و (ب) معماری مبدل یکپارچه ماژول

در توپولوژی مبدل یکپارچه ماژول، هر زمان که دیود بای پس هر استرینگ روشن باشد ولتاژ آن تشخیص داده می‌شود. با استفاده از این ولتاژ می‌توان دریافت که سایه جزئی رخ داده است. هنگامی که ولتاژ روی هر استرینگ کاهش می‌یابد، جستجو برای MPP کلی آغاز می‌شود. هر جستجوی MPP جدید با MPP قبلی مقایسه می‌شود تا اینکه به تدریج به پیک کلی می‌رسد. این تکنیک دارای یک اشکال است که در شرایط خاص سایه‌اندازی، زمانی که پیک محلی از پیش تعیین شده است اما دیود بای پس فعال نمی‌شود، قادر به کار نیست. این روش به صورت تجربی تأیید شده و نتایج مناسب بودن آن برای ردیابی GP هم در سطح سلول و هم در سطح استرینگ مورد تأیید است.

۳،۱،۴. اینورترهای میکرو / ماژول‌های AC

در این حالت نیاز به مبدل DC-DC جداگانه در ماژول AC از بین می‌رود. در همه ماژول‌های AC، سه پارامتر اصلی طراحی یعنی کارایی، ایمنی و هزینه در نظر گرفته می‌شود. این ماژول‌ها همانطور که در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است، دارای میکرو اینورتر داخلی هستند. از آنجا که هر ماژول فتوولتائیک دارای یک اینورتر DC-AC اختصاصی تک مرحله‌ای است و هر ماژول جداگانه در MPP واقعی خود کار می‌کند (شکل ۶ (ب))، نیاز به روش کاهش جداگانه سایه و MPPT کلی از بین می‌رود. هر دو ساختار مبدل یکپارچه ماژول و میکرو اینورتر باعث افزایش توان در کارایی بهتر تحت شرایط سایه جزئی می‌شوند. نصب ماژول AC نیاز به در نظر گرفتن حفاظت، فیلتراسیون مناسب و حذف تداخلات الکترومغناطیسی^۶ دارد.



شکل ۴. (الف) دیود بای پس با ماژول (ها) (ب) منحنی P-V ماژول

در یک آرایه فتوولتائیک، نقطه فعال‌سازی دیود بای پس نزدیک به V_{OC} ماژول است و آخرین ماکزیمم محلی همیشه نزدیک به V_{OC} آرایه (V_{Oarray}) قرار می‌گیرد. بنابراین، روش استفاده از دیود بای پس می‌تواند در سه مرحله مختلف MPPT مورد استفاده قرار گیرد: (۱) مراحل پیکربندی^۱، (۲) مکانیسم جستجوی ماکزیمم کلی^۲ و (۳) مرحله تشخیص هدایت افزایشی^۳ [11]. اطلاعات به دست آمده در مرحله اول برای دستیابی به مرحله دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرانجام، در مرحله هدایت افزایشی، ماکزیمم کلی محاسبه می‌شود. در نهایت یک کنترل‌کننده خطای بین V_{Ref} و V_{PV} را اندازه‌گیری می‌کند؛ دقیقاً مانند تکنیک‌های معمولی MPPT و هنگامی که خطا به صفر می‌رسد، MPP حاصل می‌شود. اصلاح مدار در این طرح، با قرار دادن یک سوئیچ سری در مرحله ورودی در مبدل برای اندازه‌گیری V_{Oarray} به منظور شروع یک چرخه جدید انجام می‌شود. بیش از ۹۶٪ راندمان ردیابی در مورد تنظیمات آزمایشی آرایه فتوولتائیک ساختمانی برای این روش گزارش شده است. این روش در شرایط سایه‌اندازی به خوبی کار می‌کند.

۲،۱،۴. مبدل یکپارچه ماژول

مبدل‌های DC-DC نقش مهمی در عملکرد MPPT دارند. در مبدل یکپارچه ماژول^۴، از یک مبدل اختصاصی DC-DC برای ردیابی ماکزیمم محلی هر ماژول فتوولتائیک استفاده می‌شود. همه ماکزیمم‌های منفرد جمع شده و مقدار نهایی به عنوان پیک کلی به یک اینورتر مرکزی که در شکل ۵ (الف) نشان داده شده است وارد می‌شود. در مقابل، شکل ۵ (ب) یک معماری متمرکز متداول را برای مبدل نشان می‌دهد که فقط پیک محلی را ردیابی می‌کند، زیرا مجموع پیک‌های واحد هر ماژول یا پیک کلی سیستم^۵، به مبدل DC-AC ارائه نمی‌شود. با تغییر در معماری مبدل، اثرات عدم تطابق پنل و سایه‌اندازی جزئی کاهش می‌یابد، که به دنبال آن

^۱ Configuration Stages

^۲ Global Maxima Search Mechanism

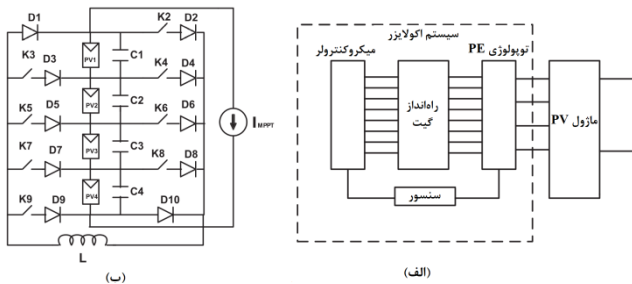
^۳ Incremental Conductance - Detection Stage

^۴ Module Integrated Converter

^۵ Global Peak

^۶ ElectroMagnetic Interference

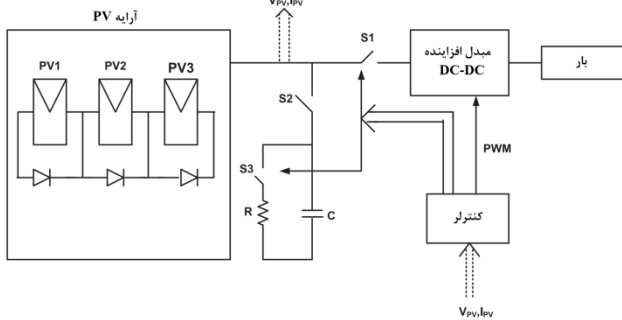
اکولایزینگ، جستجو و بای پس. اجزای مختلف زیادی در این طرح به کار گرفته می‌شوند، بنابراین اندازه‌گیری مناسب این اجزا برای کارایی مطلوب سیستم امری ضروری است [12].



شکل ۸. (الف) نمای کلی سیستم اکولایزر و (ب) توپولوژی اکولایزر

۴،۱،۶. خازن مجتمع

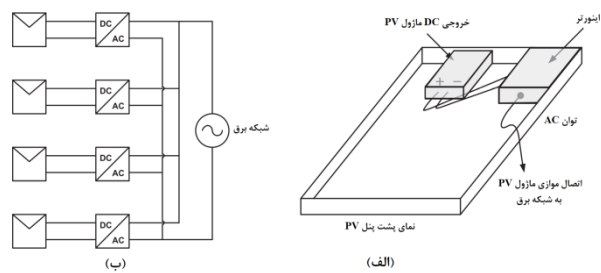
این روش ردیابی بر اساس شارژ یک خازن است که به خروجی آرایه PV متصل می‌شود. این طرح در دو حالت یعنی حالت شارژ و حالت دشارژ کار می‌کند. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است در حالت شارژ، سوئیچ 'S2' برای اتصال خازن مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولتاژ و جریان در هر لحظه از فرآیند شارژ شدن اندازه‌گیری شده، سپس توان لحظه‌ای مربوطه محاسبه و با مقدار قبلی آن مقایسه می‌شود. این پروسه تا زمانی مجاز است که خازن کاملاً شارژ شود. در این حالت پیک کلی و ولتاژ V_{MPP} مشخص شده است. زمان شارژ (tc) خازن به ولتاژ مدار باز (V_{OC}) و جریان اتصال کوتاه (I_{SC}) پنل خورشیدی بستگی دارد.



شکل ۹. شماتیک خازن مجتمع

۳،۱،۷. طرح همسان‌سازی ولتاژ

این روش مبتنی بر مفهوم یکسان‌سازی ولتاژ برای استخراج حداکثر توان تحت تابش غیر یکنواخت است و با مبدل سپیک^۳ اجرا می‌شود. مزیت اصلی این مدار کاهش پیچیدگی است؛ زیرا همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، با استفاده از یک سوئیچ واحد می‌توان مدار را کنترل کرد یا در حالت هدایت پیوسته^۴ یا حالت هدایت ناپیوسته^۵ قرار داد. عملکرد در حالت DCM نیاز به کنترل بازخورد را برطرف می‌کند و جریان مدار را به سطح مطلوب محدود می‌کند. سه حالت عملکرد DCM وجود دارد. در حالت اول، سوئیچ روشن شده و انرژی در سلف مربوطه ذخیره می‌شود. در حالت دوم،

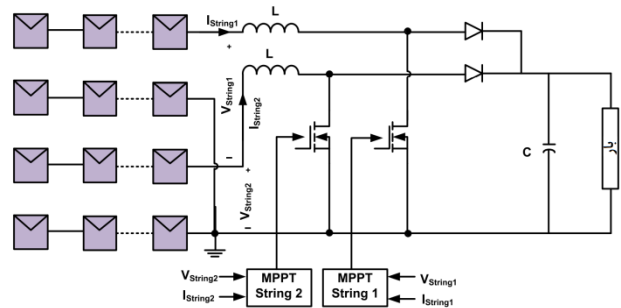


شکل ۶. (الف) ماژول AC و (ب) معماری میکرو اینورتر

با استفاده از ماژول‌های AC در سیستم‌های BIPV، با کاهش هزینه اضافی ۷،۵٪ در مقایسه با پیکربندی متداول DC، تلفات سایه از ۲۵٪ به ۱۹،۵٪ کاهش می‌یابد. میکرو اینورترهای ماژول‌های AC عمدتاً برای سیستم‌های MPPT پراکنده^۱ مناسب هستند. معماری MPPT پراکنده حتی در شرایط سایه‌اندازی جزئی، انرژی تولیدی سیستم فتوولتائیک خورشیدی را بهبود می‌بخشد.

۴،۱،۴. مبدل DC-DC چند ورودی

یک مبدل بوست چند ورودی، MPP یک ماژول یا استرینگ فتوولتائیک منفرد را تحت شرایط سایه جزئی دنبال می‌کند. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، دیویدهای بای پس حذف شده و خروجی‌های استرینگ به مبدل‌های DC-DC متصل می‌شوند. با حذف دیوید بای پس، مشخصه P-V فقط یک نقطه MPP را دنبال کرده و ردیابی MPP با استفاده از یک الگوریتم معمولی امکان‌پذیر خواهد شد.



شکل ۷. مبدل چند ورودی

۴،۱،۵. اکولایزر PV

شکل ۸ (الف و ب) یک رویکرد مبتنی بر الکترونیک قدرت^۲ برای کاهش اثر سایه اندازه‌گیری جزئی را نشان می‌دهد. این طرح معمولاً بر اساس سیستم اکولایزر باتری است. مبدل DC-DC با کنترل MPPT، با یک منبع جریان (I_{MPP}) مدل شده است. توزیع مجدد انرژی در سلول‌های فتوولتائیک بدون سایه و سایه‌دار با استفاده از توپولوژی تک سلولی و توپولوژی اینورتر جریان انجام می‌شود. سلف به وسیله جریان سلول‌های بدون سایه شارژ می‌شود، که به سلول‌های سایه دار متصل شده تا یک مسیر فرعی برای جریان اضافی MPPT ایجاد کند. این طرح در سه حالت عمل می‌کند:

^۳ Single-Ended Primary-Inductor

^۴ Continuous Conduction Mode

^۵ Discontinuous Conduction Mode

^۱ Distributed MPPT

^۲ Power-Electronic

آشفته و افزایش می‌یابد در غیر این صورت روند معکوس می‌شود. این الگوریتم در جدول ۱ خلاصه شده است.

| آشفته‌گی بعدی | تغییر در توان آرایه PV | آشفته‌گی |
|---------------|------------------------|----------|
| منفی | منفی | مثبت |
| منفی | مثبت | منفی |
| مثبت | منفی | منفی |
| مثبت | مثبت | مثبت |

جدول ۱. خلاصه الگوریتم P&O

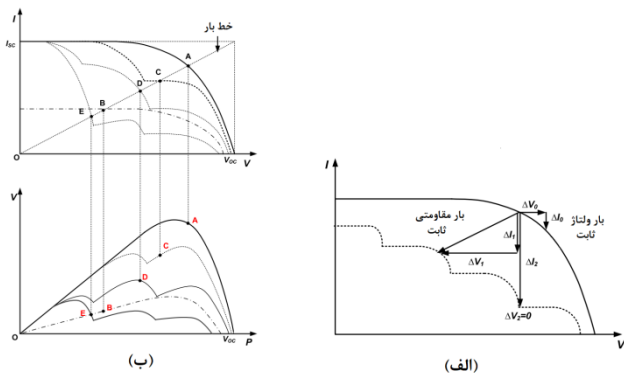
۲،۲،۴. تکنیک هدایت افزایشی (Inc-Cond) اصلاح شده یکی دیگر از تکنیک‌های MPPT واقعی متداول، هدایت افزایشی است که باعث می‌شود مشتق توان dp/dV به صفر میل کند (شیب منحنی توان آرایه فتوولتائیک در MPP صفر است). همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، برای یک سیستم PV، MPP را می‌توان با مقایسه هدایت لحظه‌ای (I/V) و هدایش افزایشی ($\Delta I/\Delta V$) ردیابی کرد

| $\frac{dp}{dV} = 0$ | MPP واقعی | ولتاژ را در $V_{PV} = V_{MPP}$ نگه می‌داریم |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| $\frac{dp}{dV} > 0$ <td>سمت چپ MPP <td>ولتاژ را تا $V_{PV} = V_{MPP}$ افزایش می‌دهیم</td> </td> | سمت چپ MPP <td>ولتاژ را تا $V_{PV} = V_{MPP}$ افزایش می‌دهیم</td> | ولتاژ را تا $V_{PV} = V_{MPP}$ افزایش می‌دهیم |
| $\frac{dp}{dV} < 0$ <td>سمت راست MPP <td>ولتاژ را تا $V_{PV} = V_{MPP}$ کاهش می‌دهیم</td> </td> | سمت راست MPP <td>ولتاژ را تا $V_{PV} = V_{MPP}$ کاهش می‌دهیم</td> | ولتاژ را تا $V_{PV} = V_{MPP}$ کاهش می‌دهیم |

جدول ۲. خلاصه الگوریتم Inc-Cond

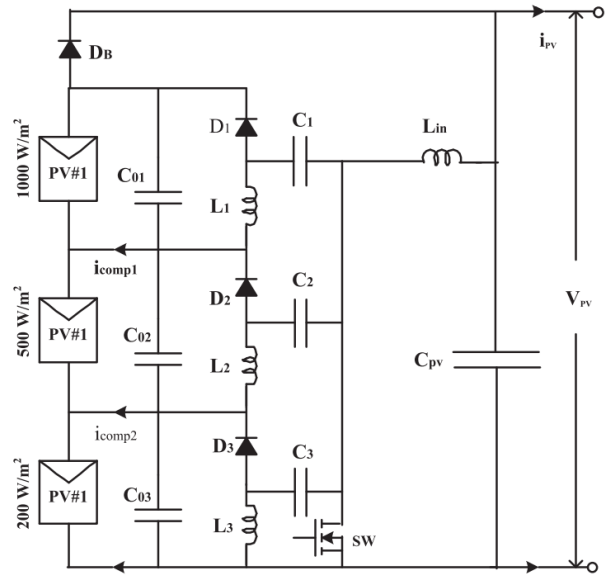
۳،۲،۴. تکنیک MPPT تطبیقی

تکنیک MPPT تطبیقی^۹، روش بهتری نسبت به MPPT معمولی است و پیک کلی را در دو مرحله ردیابی می‌کند: (۱) تشخیص سایه جزئی و (۲) جستجوی پیک کلی. تغییر در مشخصه V-I تحت سایه‌اندازی با تغییر آن در حالت یکنواخت مقایسه می‌شود. برای یک بار مقاومتی، هر دو ولتاژ خروجی افزایشی (ΔV) و جریان افزایشی (ΔI) به طور همزمان کاهش یا افزایش می‌یابند. اگر بار اینورتر DC-AC باشد، ΔV صفر می‌شود و شدت جریان ΔI افزایش خواهد یافت. هنگام ایجاد سایه بر روی آرایه، نقطه کار روی منحنی I-V به سرعت به نقطه تعیین شده توسط نسبت V_{oc} / I_{sc} منتقل می‌شود، که در مجاورت MPP واقعی قرار دارد. سپس، مطابق آنچه در شکل ۱۱ (الف و ب) نشان داده شده است، از روش معمولی MPPT برای ردیابی MPP کلی استفاده می‌شود [13].



^۹ Adaptive MPPT

سوئیچ خاموش شده و انرژی سلف از طریق دیودهای مربوطه به ماژول‌های فتوولتائیک منتقل می‌شود. در حالت سوم، سوئیچ و دیودها خاموش هستند و باعث ایجاد ولتاژ صفر در سلف می‌شوند.



شکل ۱۰. طرح همسان سازی ولتاژ بر اساس مبدل SEPIC

۲،۴. تکنیک‌های مبتنی بر MPPT برای یافتن پیک کلی در شرایط سایه‌اندازی

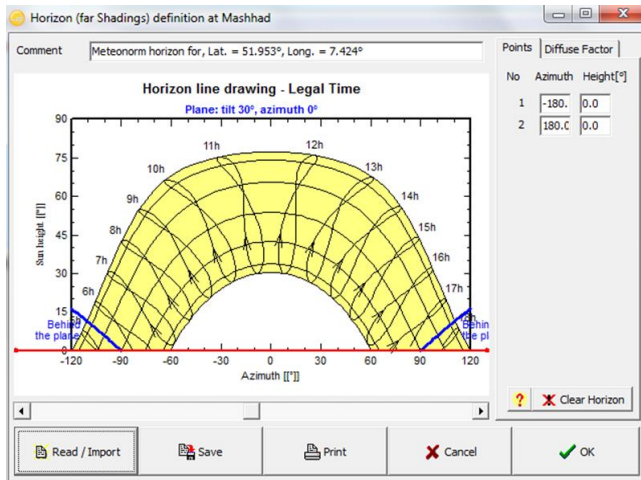
جدای از توپولوژی‌های مدار محور که در بخش ۱،۴ مطرح شد، تکنیک‌های کاهش سایه‌اندازی می‌توانند بر اساس الگوریتم‌های مختلف MPPT نیز طبقه‌بندی شوند. بیشتر روش‌های گزارش شده شامل گسترش تکنیک‌های متداول MPPT (Inc-P&O^۱، Cond^۲، HC) است. روش‌های محاسبات دیگری مانند کلنی مورچگان^۳، شبکه عصبی مصنوعی^۴، کنترل‌کننده منطق فازی^۵، الگوریتم ژنتیک^۶، بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۷، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته^۸ و غیره نیز برای کاهش اثرات سایه‌اندازی با استفاده از MPPT مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱،۲،۴. تکنیک آشفتن و مشاهده (P&O) اصلاح شده P&O فرایندی است که در آن، متغیری تغییر می‌کند (آشفته می‌شود) و اثر آن تغییر بر متغیرهای دیگر بررسی (مشاهده) می‌شود. در روش P&O معمولی، در واقع مشتق توان صفر می‌شود. این روش در اجرا ساده است و شامل اختلال (آشفته‌گی) در ولتاژ آرایه ΔV_{PV} و مشاهده همزمان افزایش یا کاهش توان فتوولتائیک می‌باشد. اگر ΔP_{PV} افزایش یابد، ولتاژ ΔV_{PV} بیشتر

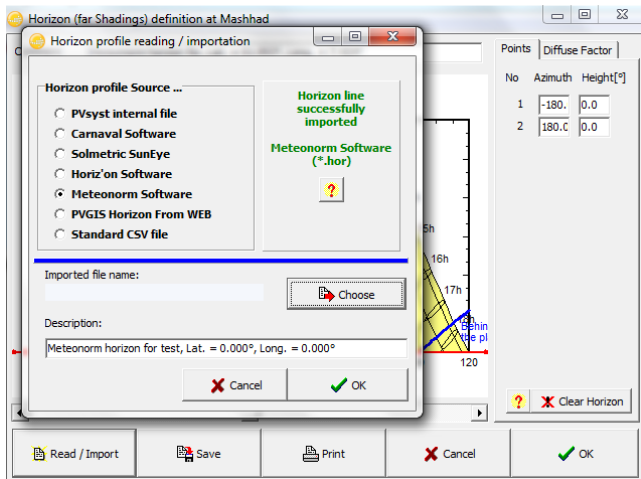
- ^۱ Perturb and Observe
- ^۲ Incremental Conductance
- ^۳ Ant Colony Optimization
- ^۴ Artificial Neural Networks
- ^۵ Fuzzy Logic Controller
- ^۶ Genetic Algorithm
- ^۷ Particle Swarm Optimization
- ^۸ Cuckoo Optimization Algorithm



سپس، با ذخیره مشخصات این نرم افزار و وارد کردن آنها در نرم افزار PVsyst می توانیم شبیه سازی سایه های دور را مطابق شکل های ۱۴ و ۱۵ از طریق این نرم افزار انجام داده و در خروجی آن، تاثیر سایه دور بر راندمان نیروگاه را مشاهده نماییم.



شکل ۱۴. منوی Far Shading در نرم افزار PVsyst



شکل ۱۵. نحوه وارد کردن فایل از نرم افزار Meteonorm

همانطور که در شکل ۱۴ مشخص شده است، از طریق گزینه Import می توان فایل خروجی نرم افزار Meteonorm را در نرم افزار PVsyst وارد کرد و مطابق شکل ۱۵ و ۱۶، با توجه به مشخصات وارد شده تاثیر آن را پس از شبیه سازی در خروجی نرم افزار PVsyst مشاهده نمود.

شکل ۱۱. (الف) مقایسه ولتاژ و جریان در منحنی های I-V آرایه فتوولتائیک و (ب) رابطه بین GPA در منحنی P-V و تقاطع منحنی خط بار I-V.

۵. نحوه شبیه سازی سایه های دور در نرم افزار PVsyst

از آنجا که نرم افزار PVsyst دارای قابلیت شبیه سازی سایه های دور می باشد، این بخش از مقاله به بررسی نحوه شبیه سازی سایه های دور در یک نیروگاه از طریق این نرم افزار- به کمک نرم افزار Meteonorm - اختصاص یافته است.

برای شبیه سازی سایه های دور از نرم افزار Meteonorm کمک گرفته شده است. مطابق شکل ۱۲، پس از انتخاب مکان پروژه، گزینه Edit Horizon را انتخاب نموده و پس از آن تاثیر سایه-اندازی های دور را مطابق شکل ۱۳ مشاهده می کنیم.

General

- Correction of global radiation measurements

- Use corrected global radiation data (excluding horizon effects)
- Use original global radiation data (including horizon effects)

Only applicable for weather stations with high horizons.

Location specific

- Plane orientation

Azimuth

0



Inclination

0

- Albedo

- Automatic
- Custom

0.15

- Horizon

- None
- Custom

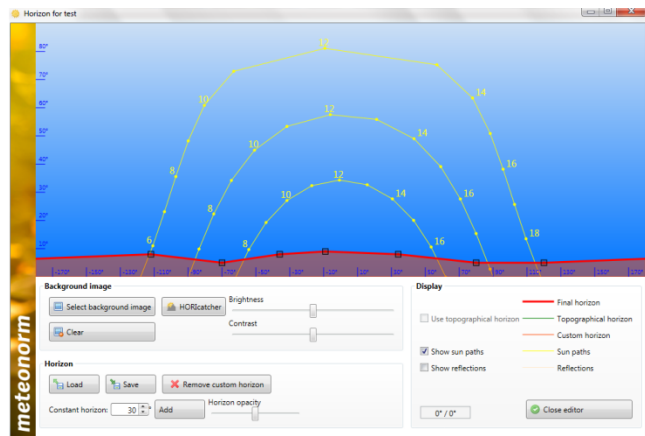
Edit horizon...

Atmospheric turbidity

- Interpolated
- Nearest Aeronet station
- Custom

Edit turbidity...

شکل ۱۲. نرم افزار Meteonorm و انتخاب گزینه Horizon



شکل ۱۳. شبیه سازی سایه های دور

applications, developmental barriers and prospects of solar photovoltaic systems in India; S.Manju, Netramani Sagar; Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 70, April 2017, Pages 298-313.

[2] Renewable and sustainable energy reviews solar photovoltaic energy progress in India: A review; Sarat Kumar Sahoo; Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 59, June 2016, Pages 927-939.

[3] Mitigation Control Against Partial Shading Effects in Large-Scale PV Power Plants, C. Rahmann, Member, IEEE, V. Vittal, Fellow, IEEE, J. Ascui, and J. Haas, IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 7, NO. 1, JANUARY 2016.

[4] Solar cell efficiency tables (Version 45); ACCELERATED PUBLICATIONS Solar cell efficiency tables (Version 45) Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, Ewan D. Dunlop; PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS Prog. Photovolt: Res. Appl. 2015; 23:1-9.

[5] A review of solar photovoltaic technologies; Bhubaneswari Parida, S.Iniyan, Ranko Goic; Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 15, Issue 3, April 2011, Pages 1625-1636.

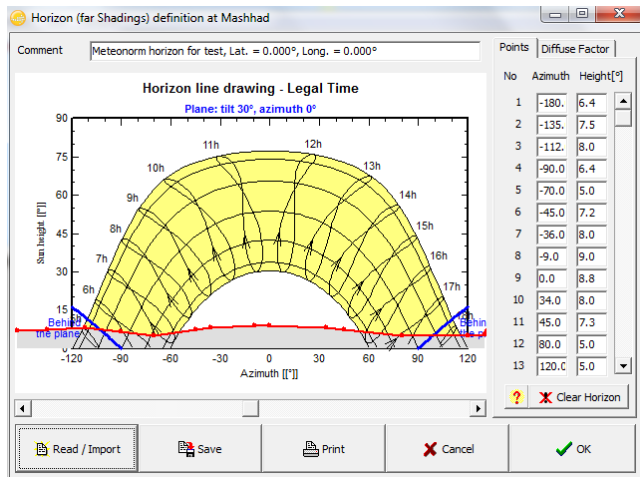
[6] Reconfiguration strategies for reducing partial shading effects in photovoltaic arrays: State of the art, G.Sai Krishna, Tukaram Moger, Solar Energy Volume 182, April 2019, Pages 429-452.

[7] Analysis of spatial fixed PV arrays configurations to maximize energy harvesting in BIPV applications

[8] Decision tree-based fault detection and classification in solar photovoltaic arrays; Ye Zhao, Ling Yang, Brad Lehman, Jean-François de Palma, Jerry Mosesian, Robert Lyons; 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).

[9] Mathematical model of total cross-tied photovoltaic arrays in mismatching conditions; C. A. Ramos-Paja, J. D. Bastidas, A. J. Saavedra-Montes, F. Guinjoan-Gispert, M. Goetz; 2012 IEEE 4th Colombian Workshop on Circuits and Systems (CWCAS).

[10] Shading mitigation techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications, Soubhagya K. Das, Deepak Verma, Savita Nema, R.K. Nema; Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 78, October 2017, Pages 369-390.



شکل ۱۶. ورود اطلاعات از نرم‌افزار Meteororm و تاثیرات آن در

خروجی محاسبات نرم‌افزار PVsyst

۶. نتیجه‌گیری

سایه‌اندازی یکی از مهمترین اشکالاتی است که باعث کاهش تولید توان از آرایه‌های فتوولتائیک می‌شود. تکنیک‌های مختلفی برای کاهش این اثرات گزارش شده است که شامل: استفاده از دیودهای بای پس، اتصال ماژول‌های فتوولتائیک، MPPT، پراکنده، اینورترهای چند سطحی و استراتژی‌های پیکربندی مجدد می‌باشند. با این حال، در این مقاله عمدتاً بر روی استراتژی‌های پیکربندی مجدد برای افزایش حداکثر توان تحت سایه‌های جزئی و عدم تطابق متمرکز هستیم. این استراتژی‌ها به تکنیک‌های پیکربندی مجدد دینامیک و استاتیک تقسیم می‌شوند.

در کل مساله، شرایط سایه (به ویژه سایه جزئی) تا حد زیادی در زمینه تامین پیک محلی بر روی مشخصه P-V مطرح و مورد بحث قرار گرفته است. اگر این مساله به درستی کنترل نشود، کارایی ردیابی پیک محلی کاهش می‌یابد. بنابراین بسیاری از تکنیک‌های کاهش سایه در طی سال‌های گذشته توسعه یافته و در دو دهه گذشته به دلیل تأکید اخیر بر فناوری‌های سبز، شتاب بیشتری به خود گرفته‌اند. مهمترین موانع رشد سریع سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی، توسعه یک توپولوژی/ الگوریتم الکترونیکی کارآمد برای ردیابی نقطه حداکثر توان تحت شرایط یکنواخت و غیر یکنواخت است. مشخص شده که ردیابی کارآمد در برابر شرایط سایه‌اندازی باعث افزایش کارایی کلی سیستم فتوولتائیک می‌شود. در این مقاله، روش‌های مختلف برای کاهش اثرات سایه بر عملکرد سیستم فتوولتائیک، با تأکید بر مناسب بودن تکنیک‌های MPPT کلی برای کاهش سایه جزئی، طبقه‌بندی و مورد بحث قرار گرفته‌اند. و در پایان، روش شبیه‌سازی سایه‌های دور با استفاده از نرم‌افزارهای مرتبط جهت پیش‌بینی تولید نیروگاه مورد بررسی قرار گرفت.

مراجع

[1] Progressing towards the development of sustainable energy: A critical review on the current status,



[11] A maximum power point tracking technique based on bypass diode mechanism for PV arrays under partial shading; Ali Murtaza, Marcello Chiaberge, Filippo Spertino, Diego Boero, Mirko De Giuseppe; Energy and Buildings Volume 73, April 2014, Pages 13-25.

[12] A Power Electronics Equalizer Application for Partially Shaded Photovoltaic Modules; Luiz Fernando Lavado Villa, Tien-Phu Ho, Jean-Christophe Crebier, Bertrand Raison; IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 60, Issue: 3, March 2013.

[13] Modeling and maximum power point tracking (MPPT) method for PV array under partial shade conditions; Jun Qi, Youbing Zhang, Yi Chen; Renewable Energy Volume 66, June 2014, Pages 337-345.

ACEC2021-58577

اثر عایق بندی بر مصرف انرژی و دینامیک حرارتی در یک ساختمان انرژی صفر: مطالعه موردی بر روی یک ساختمان اداری در کرمان

هادی فرزنان^۱

استادیار، مجتمع آموزش عالی بم، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، آدرس پست الکترونیکی: hadi.farzan@bam.ac.ir

چکیده

امروزه برای فراهم کردن آسایش در ساختمان‌ها انرژی زیادی صرف می‌شود لذا ضروریست راهکار مناسب جهت کاهش مصرف انرژی گردد. یکی از راه‌های محاسبه انرژی مصرفی ساختمان، برنامه‌های شبیه‌سازی مانند ترنسیس می‌باشد. در این مقاله انرژی مصرفی یک مدل ساختمان انرژی صفر با سیستم گرمایش خورشیدی با نرم افزار ترنسیس در شهر کرمان بر اساس دو راهبرد مختلف شبیه‌سازی شده و تاثیرات آن بر مصرف انرژی در روز ۱ جولای مورد بررسی قرار گرفته است. راهبرد اول استفاده از مصالح ساختمانی معمولی بدون استفاده از عایق حرارتی و راهبرد دوم بهره‌گیری از عایق حرارتی پلی‌استایرن به ضخامت ۲ سانتی‌متر است. در هر دو راهبرد میزان بار گرمایی ساختمان محاسبه شده است. نتایج نشان داد برای شهر کرمان راهبرد دوم یا کاربرد عایق گرمایی با ضخامت دو سانتیمتر تاثیر خوبی در کاهش مصرف انرژی دارد و همچنین دمای نواحی مختلف حرارتی ساختمان در بازه زمانی وسیع‌تری در محدوده آسایش حرارتی قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: انرژی مصرفی ساختمان، بار حرارتی، ساختمان انرژی صفر، گرمایش خورشیدی، عایق بندی

مقدمه

انسان‌ها برای ایجاد و حفظ شرایط آسایش مستلزم مصرف انرژی می‌باشند که در حال حاضر سهم زیادی از این انرژی با بهره‌برداری از منابع فسیلی امکان پذیر است. دپارتمان انرژی آمریکا میزان مصرف انرژی در بخش‌های مختلف جامعه را به چهار گروه حمل و نقل، صنعت، ساختمان‌های اداری و مسکونی تقسیم نموده است که سهم ساختمان متشکل از تجاری و مسکونی برابر با ۴۱ درصد می‌باشد [۱].

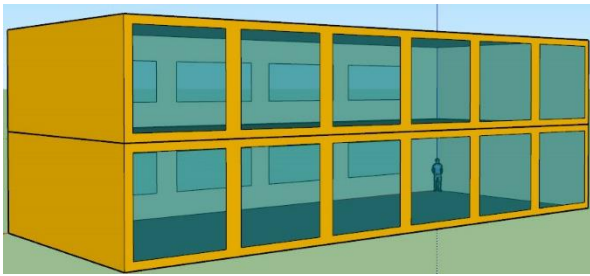
۲. براساس بررسی‌های صندوق بین‌المللی پول ایران در رده کشورهای با مصرف انرژی بالا جا دارد [۳]. تاکنون مطالعات گسترده‌ای به بررسی روش‌های متنوع کاهش مصرف انرژی ساختمان مانند عایق بندی و استفاده از سایبان پرداخته‌اند. فرهانیه و ستاری [۴] در سال ۲۰۰۶ به بررسی استفاده از عایق بندی بر روی مصرف انرژی ساختمان در ایران پرداخته‌اند. در این مطالعه آنها نشان دادند که عایق بندی مناسب به مقدار ۳۵٫۲٪ در هر متر مربع، صرفه جویی مصرف انرژی به همراه دارد. کماکیل و یوکسل [۵] به مطالعه بهینه‌سازی ضخامت عایق دیوارهای خارجی بر کاهش مصرف انرژی ساختمان در شرایط آب و هوایی ترکیه پرداختند. ابراهیم پور و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۱ با استفاده از نرم افزار انرژی پلاس^۱ روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک ساختمان اداری در دانشگاه تبریز را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که استفاده از سایبان با عمق ۵۰ سانتیمتر و رنگ روشن جدارها سبب کاهش مصرف انرژی می‌گردد. نیکوفرد و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۴ تاثیرات نصب سایبان بر مصرف انرژی گرمایی، سرمایی و تولید گازهای گلخانه‌ای را با نرم افزار ای‌اس پی آر^۲ در یک ساختمان مسکونی را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که فقط استفاده از سایبان کرکره‌ای اتوماتیک کاهش مصرف انرژی را در پی داشت. در سال ۲۰۱۵ تالفلدت و همکاران [۸] با نرم افزار آی‌دی‌ای-آی‌سی^۳ تحقیقاتی در زمینه کنترل بهینه سایبان‌های خارجی در آب و هوای اروپا را انجام دادند. در سال ۲۰۱۵ لیانینگ [۹] با روش عددی ال‌سی‌سی^۴ به بررسی تاثیرات ضخامت عایق گرمایی بر روی بار سرمایش و گرمایش ساختمان‌های تجاری در آب و هوای مختلف کشور چین اقدام کرد. این مطالعه نشان داد استفاده از عایق گرمایی بار گرمایی را بیشتر از بار سرمایی تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. یوانیس آکسپولوس و همکاران [۱۰] با توجه به انتقال گرمای رسانشی

^۱ IDE-ICE 4.5

^۲ LCCA

^۳ Energy Plus

^۴ ESP-R



شکل ۳: نمای سه بعدی ساختمان

مواد و مصالح ساختمانی

مشخصات مصالح مورد استفاده ساختمان برای دیوار خارجی در شبیه سازی به صورت زیر می باشد.

جدول ۱: مصالح ساختمانی مورد استفاده

| جنس مصالح | ضخامت (m) | جرم واحد حجم (kg/m ³) | جرم واحد سطح (kg/m ²) | مقاومت حرارتی لایه (m ² .K/W) |
|------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| گچ سفید | ۰/۰۱ | ۱۳۰۰ | ۱۳ | ۰/۰۴ |
| اندود گچ و خاک | ۰/۰۲ | ۱۶۰۰ | ۳۲ | ۰/۰۱۷ |
| ملات ماسه و سیمان | ۰/۲ | ۲۱۰۰ | ۶۳ | ۰/۰۱۷ |
| آجر | ۰/۰۳ | ۸۵۰ | ۱۷۰ | ۰/۴۲ |
| سنگ | ۰/۰۲ | ۲۴۰۰ | ۴۸ | ۰/۰۰۷ |
| پلی استایرن | ۰/۰۲۱ | ۱۲ | ۱/۲ | ۰/۴۱۲ |
| عایق رطوبتی (برای سقف) | ۰/۰۱ | ۱۰۵۰ | ۱۰/۵ | ۰/۰۴۳ |

با استفاده از مصالح جدول بالا مقدار ضریب انتقال حرارت برای جداره های بیرونی ساختمان با استفاده و بدون استفاده از عایق حرارتی پلی استایرن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: ضریب انتقال حرارت جداره های بیرونی ساختمان

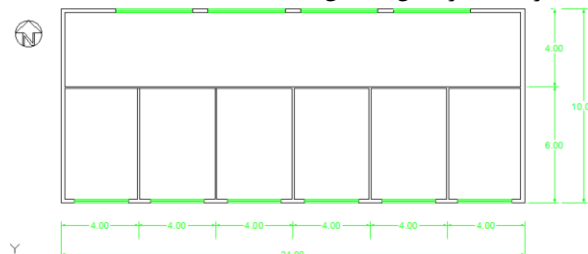
| ضریب انتقال حرارت (U) | نوع دیوار | رویکرد |
|-----------------------|-------------|--------------------|
| ۰/۵۰۱ | دیوار خارجی | با استفاده از عایق |
| ۱/۳۸۶ | دیوار داخلی | حرارتی |
| ۰/۴۹۷ | کف | |
| ۰/۴۵۲ | سقف | |
| ۱/۵۶۷ | دیوار خارجی | بدون استفاده از |
| ۱/۷۳۲ | دیوار داخلی | عایق حرارتی |
| ۱/۲۳۴ | کف | |
| ۱/۶۵۴ | سقف | |

دیوارهای خارجی و تاثیر مولفه های وزش باد بر این دیوار (سرعت و جهت) به بررسی اقتصادی ترین و بهینه ترین ضخامت عایق گرمایی بر روی دیوارهای خارجی به روش ال سی اس در سال ۲۰۱۵ اقدام کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از عایق گرمایی در وجه شمالی با ضخامت ۴/۲۵ تا ۱۵ سانتیمتر بهتر از حالت های دیگر بررسی شده بود. کائو و همکاران [۱۱] استفاده از عایق بندی دیوارهای خارجی با تسفاده از پشم شیشه برای ارتقا آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی ساختمان پیشنهاد دادند. در این رویکرد، قسمت های مختلف یک ساختمان با دماهای متفاوت از یکدیگر جهت کاهش مصرف انرژی جدا می شود. ونگ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۶ به بررسی استفاده از دیوار سبز عمودی به عنوان عایق حرارتی برای دیوارهای خارجی پرداختند. آنها نشان دادند این رویکرد، روشی مناسب برای عایق بندی دیوارها در آب و هوای گرمسیری برای کاهش مصرف انرژی ساختمان هستند.

در این مطالعه هدف بررسی اثر عایق بندی مناسب بر کاهش مصرف انرژی و ارتقا آسایش حرارتی بررسی می شود. برای این منظور یک ساختمان اداری انرژی صفر در شهر کرمان با استفاده از نرم افزار ترنسیس مدل سازی شده است. این ساختمان برای تامین بار حرارتی از یک سیستم گرمایشی خورشیدی در فصل سرد سال استفاده می کند. در ادامه با استفاده از این نرم افزار تاثیر عایق بندی بر منحنی درجه حرارت در ساختمان در طول یک روز سرد زمستانی بررسی می شود. در ادامه همچنین دینامیک حرارتی نواحی مختلف ساختمان تحت اثر استفاده و عدم استفاده از عایق حرارتی و کاهش مصرف انرژی گرمکن کمکی در طول روز نیز گزارش می شود.

مشخصات ساختمان

ساختمان مورد بررسی یک ساختمان اداری با مساحت زیر بنا ۵۰۰ متر مربع است که در دو طبقه ساخته شده است. هر طبقه دارای ۶ اتاق به ابعاد ۴m × ۶m است که در هر اتاق ۲ نفر حضور دارند. مصالح به کاررفته در ساختمان بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان مبحث انتخاب شده است. نقشه دوبعدی ساختمان شبیه سازی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: نقشه دوبعدی ساختمان اداری

شکل ۲ نمای سه بعدی ساختمان مورد بررسی را نشان می دهد. محاسبه بار گرمایی ساختمان بر اساس اطلاعات آب و هوایی شهر کرمان و در مدت یک سال با استفاده از نرم افزار ترنسیس انجام شده است.



در محاسبات مصرف انرژی گرمایی سالیانه، پارامترهای اصلی ضریب انتقال حرارت و اینرسی ساختمان هستند، اگر بخواهیم میزان انتقال حرارت را با دقت بالایی تعیین نماییم لازم است عملکرد ساختمان را در حالت ناپایدار و با در نظر گرفتن تغییر پارامترهای آب و هوایی دما، رطوبت و تابش در اوقات مختلف شبانه روز محاسبه کنیم. برای شبیه سازی ساختمان مسکونی در شرایط آب و هوایی شهر کرمان در نرم افزار ترنسیس شرایط محیطی را شبیه سازی می کنیم. سپس در قسمت ترنیلد^۶ نرم افزار با انتخاب مصالح دیوارهای ساختمان و نوع پنجره ها، بار گرمایشی ساختمان تعیین می شود. برای محاسبه بار حرارتی ساختمان در فصل سرد سال انرژی آزاد شده از هر فرد برابر 400 Btu/hr ، انرژی حرارتی ناشی از روشنایی برابر 0.9 Watt/ft^2 است. از آنجا که ساختمان اداری است، برای هر فرد یک دستگاه رایانه با توان 100 W در نظر گرفته شده است. شکل ۳ الف محاسبه بار حرارتی در نرم افزار ترنسیس را نشان می دهد. مقدار بار حرارتی گرمایشی ساختمان اداری مورد بررسی برابر 200000 Btu/hr است.

مشخصات سیستم گرمایش خورشیدی

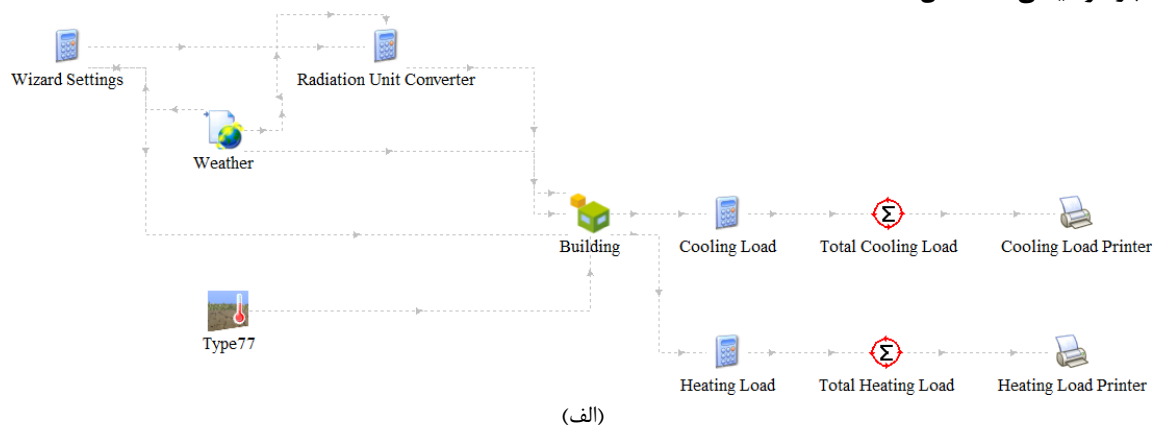
برای راه اندازی سیستم گرمایش خورشیدی از 50 متر مربع کلکتور لوله خلاء و یک مخزن ذخیره 3 متر مکعبی استفاده شده است. برای تامین حرارت مورد نیاز در زمانی که تابش خورشید کم است و یا در دسترس نیست از یک گرمکن کمکی با توان 50 کیلووات استفاده شده است. سیستم تهویه از یک هواساز با ظرفیت 45000 فوت مکعب تشکیل شده است که هوای گرم را به داخل طبقات اول و دوم تخلیه می کند. هر یک از طبقات اول و دوم یک ناحیه حرارتی در نظر گرفته شده است. زمان فعالیت سیستم گرمایش از ساعت 8 الی 16 است. طرحواره سیستم گرمایش خورشیدی در شکل ۳ ب آورده شده است.

روش حل عددی

روش حل مورد استفاده در این مطالعه یک روش عددی بر پایه استفاده از نرم افزار ترنسیس است. این برنامه توسط اعضای آزمایشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه ویسکنسین آمریکا طرح و توسعه یافته است. این نرم افزار شامل تعداد زیادی زیر برنامه به زبان برنامه نویسی فرترن^۵ و C می باشد که امکان مدل کردن تمامی اجزای زیرسیستم را با استفاده از معادلات دیفرانسیلی و معادلات جبری را مدل می کند. در این نرم افزار پس از اینکه همه اجزای سیستم مشخص شد، با رسم نمودارهای ارتباطی بین اجزا در محیط نرم افزار ارتباطات منطقی و اصولی آن ها بر پایه اصول و قواعد ریاضی بیان گردید بایستی اطلاعات ورودی که وابسته به زمان نیز می باشد وارد گردد تا پس از حل نیز خروجی های مبتنی بر زمان حاصل گردد. خروجی های به دست آمده ممکن است هر کدام به عنوان ورودی برای سایر اجزا مورد استفاده قرار گیرند. اجزای زیر برنامه های ترنسیس شامل گردآورنده های خورشیدی، کنترلرهای دیفرانسیلی، پمپ ها، گرم کننده کمکی، بارگذاری های گرمایشی، ترموستات ها و موارد دیگر می باشد. همچنین زیر برنامه هایی برای پردازش اطلاعات تشعشعی، انتگرال گیری و اطلاعات دستی ورودی و خروجی وجود دارد.

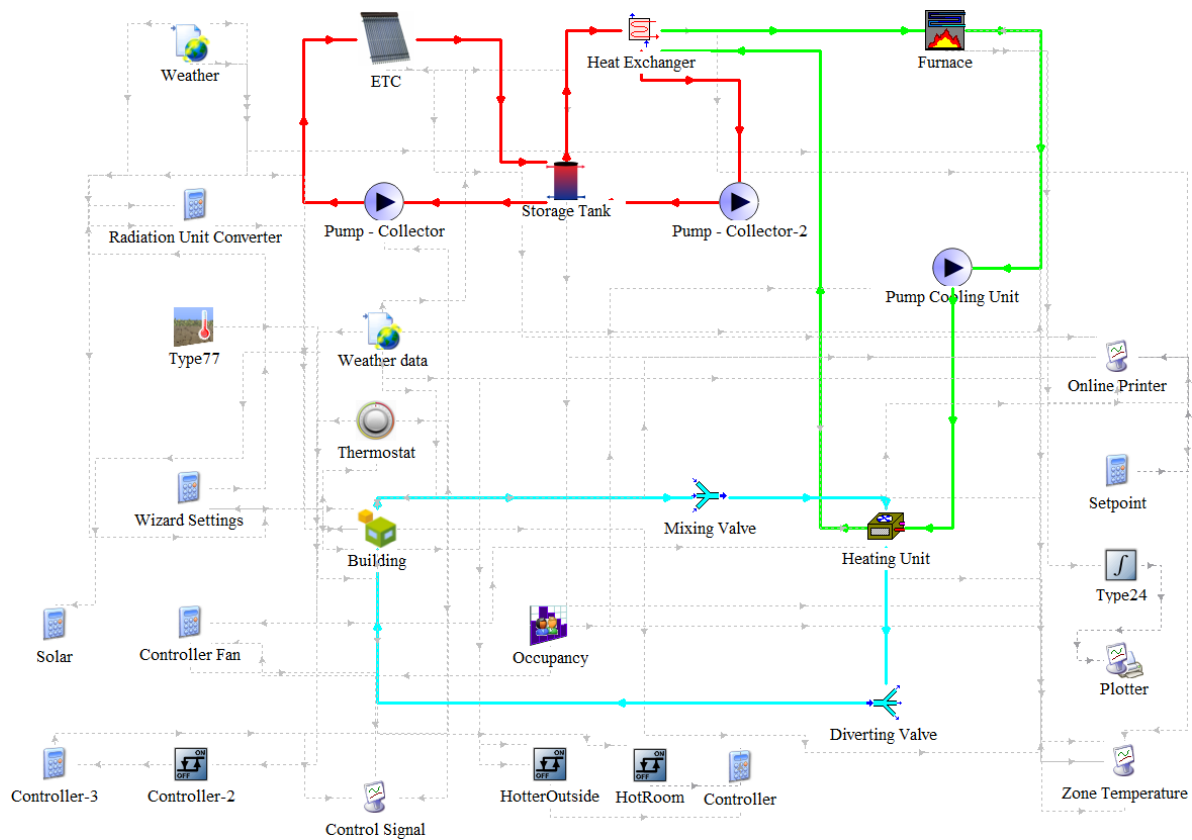
روش استفاده شده برای شبیه سازی به این صورت است که ابتدا بارهای گرمایشی ساختمان را محاسبه می شود و سپس انرژی ورودی مورد نیاز برای گرمایش ساختمان را به دست می آوریم. بنابراین شبیه سازی سیستم شامل دو قسمت اصلی است: محاسبه بار گرمایشی ساختمان و شبیه سازی سیستم تأمین انرژی

محاسبه بار گرمایشی ساختمان



^۶ TRNBUILD

^۵ FORTRAN



(ب)

شکل ۳: الف) محاسبه بار حرارتی گرمایشی و ب) طرحواره سیستم گرمایش خورشیدی

دستگاه هواساز ترموستات فرمان به روشن بودن دستگاه و فن هواساز میدهد و هیچ زمانی دستگاه تهویه خاموش نمی‌شود. شکل ۵ دمای نواحی حرارتی را در صورت وجود عایق در دیواره‌های ساختمان را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل ۵ پیداست، وجود عایق دمایی سبب میشود در طول بازه وسیعی از زمان دمای ساختمان در محدوده آسایش حرارتی قرار داشته باشد. در این حالت در ابتدای صبح با روشن شدن سیستم تهویه دمای با سرعت بیشتری به دمای مطلوب میرسد و ترموستات به منظور کنترل دمای و انرژی مصرفی در طول مدت فعالیت فرمان به روشن و خاموش شدن هواساز میدهد. خاموش شدن هواساز در طول مدت فعالیت اداری ساختمان میتواند کمک بزرگی به کاهش مصرف انرژی ساختمان باشد. علاوه بر این که در طول روز تابش فرودی از خورشید نیز میتواند بخشی از بار حرارتی گرمایشی ساختمان را از طریق انرژی ورودی از پنجره‌ها تامین نماید. لازم به ذکر است، ناحیه حرارتی یک طبقه همکف و ناحیه حرارتی دوم طبقه دوم است. همانطور که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است، در این مطالعه دینامیک حرارتی ساختمان تحت تاثیر استفاده و عدم استفاده از عایق حرارتی به تصویر کشیده شده است. علاوه بر این، نحوه عملکرد سیستم کنترلی استفاده شده (ترموستات) برای تنظیم دمای داخلی نیز قابل مشاهده است. در واقع

سیستم کنترلی تهویه خورشیدی از یک ترموستات تشکیل شده است. دمای ترموستات برای کاهش مصرف انرژی با توجه به استاندارد اشری^۷ بر روی دمای ۲۱ درجه سانتیگراد تنظیم شده است و دارای باند مرگ^۸ ۴ درجه سانتیگراد می‌باشد. با استفاده از این رویکرد در مصرف انرژی ساختمان صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای صورت می‌گیرد.

نتایج و بحث

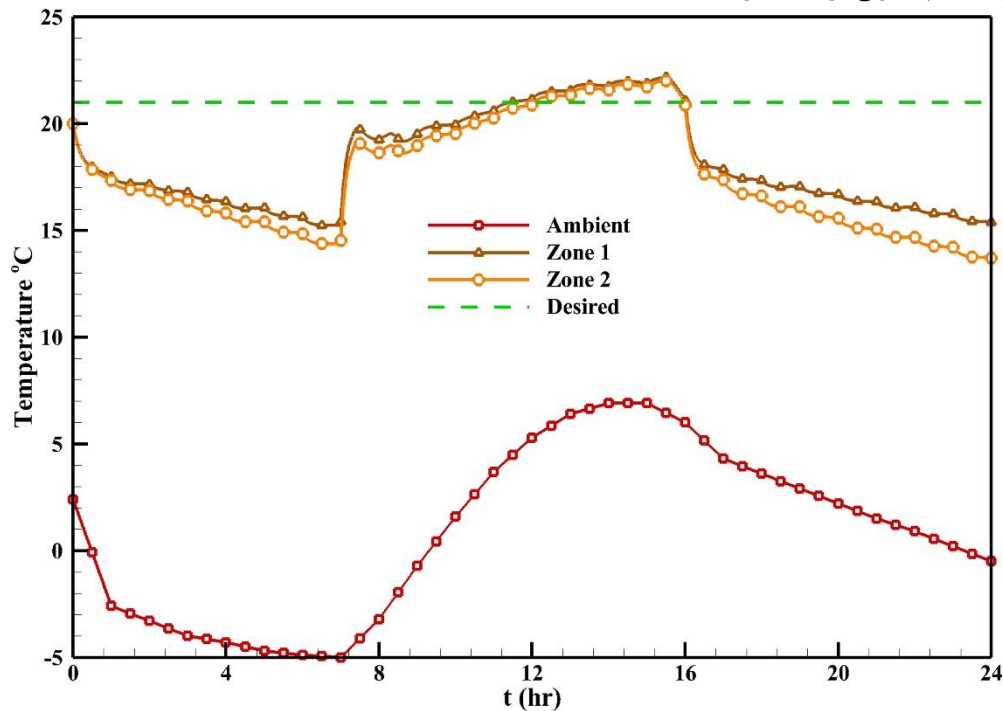
برای بررسی اثر عایق بندی دمای ناحیه های حرارتی را در یک روز سرد سال در صورت استفاده و عدم استفاده از عایق حرارتی بررسی و مقایسه خواهد شد.

شکل ۴ دمای ناحیه‌های حرارتی را در صورت عدم استفاده از عایق حرارتی را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، در صورت عدم استفاده از عایق حرارتی دمای نواحی حرارتی در گستره وسیعی از زمان به دمای مطلوب نمیرسد. در واقع به دلیل تبادل حرارتی هدایتی به واسطه دیوارهای خارجی دما در ابتدای صبح با دمای مطلوب فاصله زیادی دارد. این روند در طول روز ادامه می‌یابد و با افزایش تابش خورشید و افزایش دمای هوای بیرون رفته رفته دمای نواحی حرارتی به دمای مطلوب می‌رسد. همانطور که در شکل ۴ نیز نشان داده شده است، در طول کل زمان روشن بودن

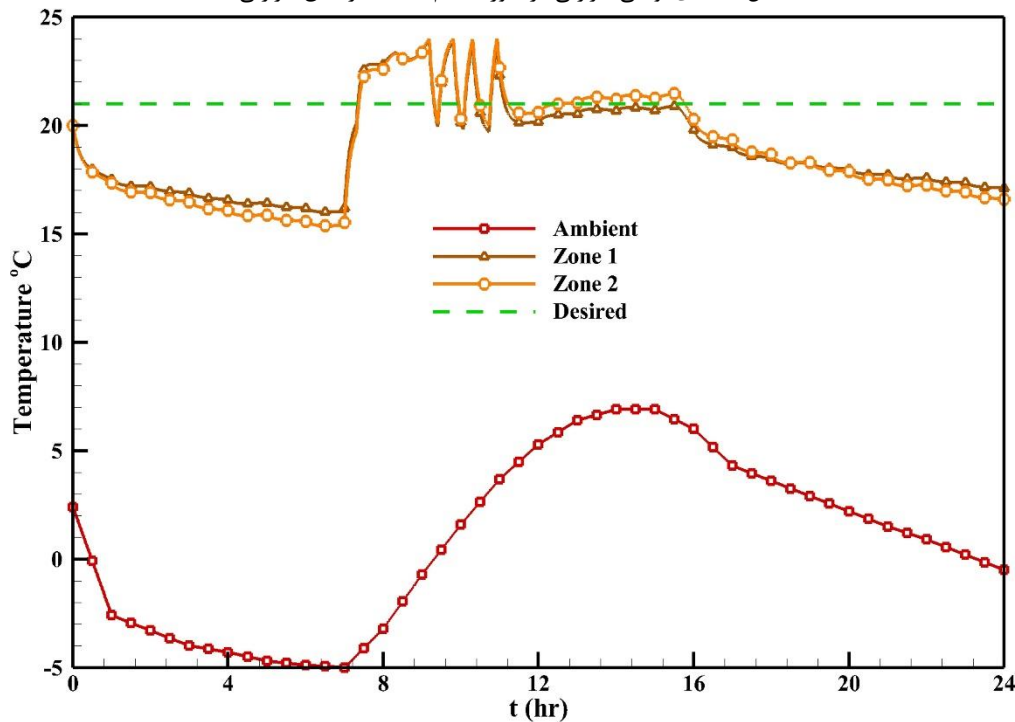
^۸ Dead band^۷ ASHREA



عملکرد ترموستات نشان دهنده کاهش مصرف انرژی در ساختمان در اثر استفاده از این سیستم کنترلی در ساختمان است.



شکل ۴: دمای نواحی حرارتی در صورت عدم استفاده از عایق حرارتی



شکل ۵: دمای نواحی حرارتی در صورت استفاده از عایق حرارتی

جهت کاهش اتلاف حرارتی از دیوارهای خارجی استفاده از ترموستات راهکاری موثر در کاهش مصرف انرژی ساختمان است.

مراجع

[1] G.M. Huebner, M. McMichael, D. Shipworth, M. Shipworth, M. Durand-Daubin, A. Summerfield, The reality of English living rooms—A comparison of internal

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

این مطالعه به بررسی استفاده از عایق حرارتی در جداره‌های بیرونی ساختمان بر روی دمای نواحی حرارتی در یک ساختمان انرژی صفر پرداخته است. نتایج این بررسی نشان می‌دهند استفاده از عایق حرارتی می‌تواند دمای نواحی حرارتی را به دمای مطلوب در فصل سرد سال نزدیک نماید و سبب کاهش انرژی مصرفی برای گرمایش و اتلاف حرارتی هدایتی از دیوارهای خارجی می‌شود. علاوه بر این به



- [8] M. Thalfeldt, J. Kurnitski, External shading optimal control macros for 1-and 2-piece automated blinds in European climates, *Building Simulation*, Springer, 2015, pp. 13-25.
- [9] Z. Lianying, W. Yuan, Z. Jiyuan, L. Xing, Z. Linhua, Numerical Study of Effects of Wall's Insulation Thickness on Energy Performance for Different Climatic Regions of China, *Energy Procedia* 75 (2015) 1290-1298.
- [10] I. Axaopoulos, P. Axaopoulos, G. Panayiotou, S. Kalogirou, J. Gelegenis, Optimal economic thickness of various insulation materials for different orientations of external walls considering the wind characteristics, *Energy* 90 (2015) 939-952.
- [11] X. Cao, J. Liu, X. Cao, Q. Li, E. Hu, F. Fan, Study of the thermal insulation properties of the glass fiber board used for interior building envelope, *Energy and Buildings* 107 (2015) 49-58.
- [12] I. Wong, A.N. Baldwin, Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region, *Building and Environment* 97 (2016) 34-39.
- temperatures against common model assumptions, *Energy and Buildings* 66 (2013) 688-696.
- [2] J. Cho, J. Yang, W. Park, Evaluation of air distribution system's airflow performance for cooling energy savings in high-density data centers, *Energy and buildings* 68 (2014) 270-279.
- [3] D. Guillaume, R. Zyteck, The economics of energy price reform in the islamic republic of iran, *International monetary fund. Approved by Middle East and central Asia department, Selected Issues Paper* (2010).
- [4] B. Farhanieh, S. Sattari, Simulation of energy saving in Iranian buildings using integrative modelling for insulation, *Renewable energy* 31(4) (2006) 417-425.
- [5] K. Çomaklı, B. Yüksel, Optimum insulation thickness of external walls for energy saving, *Applied thermal engineering* 23(4) (2003) 473-479.
- [6] ابراهیم پور، ع، کریمی واحد، ی، روش های مناسب بهینه سازی مصرف انرژی در یک ساختمان دانشگاهی در تبریز، مهندسی مکانیک مدرس ۱۲(۴) (۲۰۱۲) ۹۱-۱۰۴.
- [7] S. Nikoofard, V.I. Ugursal, I. Beausoleil-Morrison, Technoeconomic assessment of the impact of window shading retrofits on the heating and cooling energy consumption and GHG emissions of the Canadian housing stock, *Energy and Buildings* 69 (2014) 354-366.

ACEC2021-58668

تهیه نانوکامپوزیت TiO_2 آنتاژ آلانیده با نقره و زئولیت کلینو پتیلولیت و بررسی عملکرد فوتوکاتالیستی آن در تخریب آفت کش نیتن پیرام و تولید هیدروژن

ناصر قاسمیان^۱، قادر حسین زاده^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه بناب، بناب، ایران n.ghasemian@gmail.com

^۲ استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه بناب، بناب، ایران ghader87@gmail.com

چکیده

در مطالعه حاضر نانوکامپوزیت TiO_2 آنتاژ آلانیده با نقره و زئولیت کلینو پتیلولیت با روش احیا نوری و هیدروترمال تهیه گردید و برای اولین بار به عنوان فوتوکاتالیست برای تخریب آفت کش کشاورزی نیتن پیرام و تولید هیدروژن تحت تابش نور خورشید مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. بلورینگی، شکل و اندازه ذرات، تخلخل، مساحت سطح ویژه و خواص اپتیکی نانوکامپوزیت تهیه شده با آنالیزهای XRD, FESEM, BET, DRS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که نانوکامپوزیت به صورت موفق تهیه شده و در مقایسه با TiO_2 آنتاژ دارای عملکرد فوتوکاتالیستی بهتری میباشد که دلیل آن میتواند افزایش مساحت سطح و بهبود خواص اپتیکی (افزایش قابلیت جذب نور مرئی) در حضور زئولیت و آلانیدن با نقره باشد.

واژه های کلیدی: نانوکامپوزیت، TiO_2 ، کلینو پتیلولیت، فوتوکاتالیست، نقره، نیتن پیرام، هیدروژن

مقدمه

آفت کش نیتن پیرام جز آفت کش های نئونیکوتینوئیدی بوده که در کشاورزی به طور گسترده به عنوان سم دفع آفات استفاده میشود. اما با وجود اهمیت آنها به دلیل استفاده بیش از حد از آنها مسائل زیست محیطی زیادی مانند آلودگی خاک، آلودگی آبهای سطحی و زیر زمینی به وجود آورده اند [۱]. به همین دلیل در دهه های اخیر انواع روشها مانند استفاده از جاذبها، حذف توسط باکتریها، و استفاده از فوتوکاتالیست برای حذف آن از منابع آلوده توسعه یافته اند. که استفاده از فوتوکاتالیست ها به دلیل زیست سازگار بودن، ارزان بودن و راحت بودن توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۲-۵].

نیم رساناها جزء اصلی ترکیبات فوتوکاتالیستی میباشد و از بین انواع نیم رساناهای مطالعه شده، نیم رسانای TiO_2 به دلیل ارزان بودن، سمیت کم، تولید آسان، عملکرد فوتوکاتالیستی بالا، قدرت اکسیداسیون زیاد بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۶، ۷]. اما این نیم رسانا به دلیل داشتن گاف انرژی بزرگ (تقریباً ۳٫۲ الکترون ولت) تنها میتواند توسط نور فرابنفش فعال شود [۸]. در حالی که نور فرابنفش درصد کمی از تابش نور خورشید را به خود اختصاص میدهد. بنابراین برای استفاده موثر از انرژی رایگان نور خورشید در کاربردهای فوتوکاتالیستی TiO_2 ، و همچنین بهبود عملکرد این نیم رسانا، تحقیقات گسترده ای در سالهای اخیر صورت گرفته و روشهای متعددی به این منظور توسعه یافته است که از آن جمله میتوان به آلانیدن با فلزات نجیب و نافلزات [۹]، کامپوزیت کردن با سایر نیم رساناها [۱۰]، کامپوزیت کردن با مواد رسانایی بالا مانند نانوساختارهای کربنی [۱۱]، حساس سازی با رنگها، اصلاح ساختار و سطح اشاره نمود [۱۲].

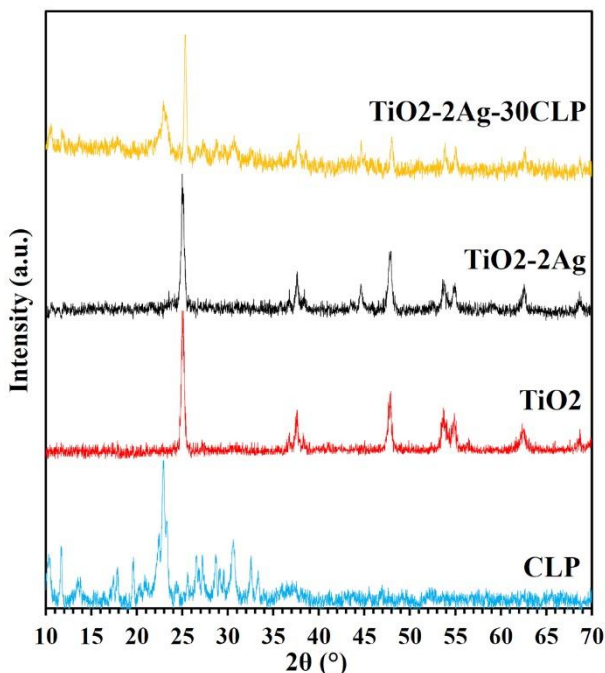
زئولیت ها به دلیل ساختار خاص و ویژه که دارند مانند مساحت سطح بالا و تخلخل نانویی به عنوان جاذب در کاربردهای حذف آلودگی بسیار مورد توجه قرار گرفته اند [۱۳]. همچنین برخی از آنها مانند کلینو پتیلولیت دارای فعالیت کاتالیستی بوده و در حذف آلاینده ها مورد استفاده قرار گرفته اند [۱۴]. علاوه بر این در سالهای اخیر با کامپوزیت کردن این مواد با نیم رساناهای فوتوکاتالیستی، ترکیبات فوتوکاتالیستی جدید و با کارایی بالا گزارش شده است [۱۵، ۱۶]. همچنین گزارشهایی از عملکرد مناسب کامپوزیت برای تولید فوتوکاتالیستی هیدروژن از تجزیه آب وجود دارد. [۱۷، ۱۸] به همین دلیل در مطالعه حاضر ما با کامپوزیت کردن نیم رسانا TiO_2 با زئولیت کلینو پتیلولیت

مصنوعی خورشید قرار گرفت. در فواصل زمانی مشخص از محلول نمونه برداری گردید و غلظت باقیمانده سم نیتن پیرام توسط دستگاه UV-Vis spectrophotometer (Varian 100 Bio, Cary) مشخص گردید. و با استفاده از غلظت اولیه و غلظت باقیمانده درصد تخریب (D.P) محاسبه گردید.

برای بررسی کارایی فوتوکاتالیستی تولید هیدروژن بر روی نمونه های تهیه شده ۵ میلی گرم از نمونه های تهیه شده در ۱۰۰ میلی لیتر آبی حاوی ۱۰ میلی لیتر تری اتانول آمین (TEOA) توسط پروب فراصوت پخش و پس از تنظیم pH در ۹ توسط محلول NaOH، سوسپانسیون حاصل توسط دماش گاز نیتروژن به مدت ۳۰ دقیقه اکسیژن زدایی شده و سپس تحت تابش نور خورشید مصنوعی 570W Xenon lamp قرار گرفت. مقدار هیدروژن تولیدی توسط Shimadzu GC-2014 gas chromatograph اندازه گیری شد.

نتایج و بحث

طیف های XRD نمونه های تهیه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. در طیف XRD نمونه CLP پیکهای مربوط به صفحات پراش (151), (422), (002), (400) کاملاً با JCPDS #39-1383 منطبق است و نشان دهنده فاز خالص CLP است. در طیف XRD نمونه TiO_2 پیکهای مشاهده شده در $2\theta = 25.3^\circ$, 37.7° , 47.9° , 54.5° , 62.5° میباشند (JCPDS Card No. 21-1272). در نمودار XRD مربوط به کامپوزیت حضور پیکهای TiO_2 کاملاً مشهود و چندین پیک مرتبط با CLP در زاویه های 23.9° و 29.5° درجه مشاهده میشود و همچنین یک پیک در 54.5° نشانگر حضور نقره فلزی است و نشان دهنده تهیه موفقیت آمیز کامپوزیت است.



میخواهیم عملکرد فوتوکاتالیستی آن را در حذف حشره کش نیتن پیرام و تولید هیدروژن مورد ارزیابی قرار دهیم.

بخش تجربی

در این مطالعه تجربی از زئولیت کلینو پتیلولیت (CLP) که از استان سمنان تهیه شد، استفاده گردید. به منظور کاهش اندازه ذرات از آسیاب مکانیکی استفاده گردید. ۲ گرم از ذرات پودر حاصل به منظور اسید شویی در ۲۰۰ میلی لیتر محلول ۰,۰۵ مولار اسید اگزالیک توسط پروب فراصوت پخش گردید و پس از منتقل کردن به اتوکلاو ۲۵۰ میلی لیتری به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سلیسیوس تحت شرایط هیدروترمال قرار گرفت.

برای تهیه نانوذرات TiO_2 آناناز ۱۹ میلی لیتر تیتانیم ایزوپروپوکساید در ۱۶۰ میلی لیتر ایزوپروپانال حل گردید و سپس تحت فراصوت محلول اوهر (۲ گرم در ۴۰ میلی لیتر آب) به آن به صورت قطره قطره اضافه گردید و به مدت ۱ ساعت اعمال فراصوت ادامه یافت

. به منظور آلییدن ۲ درصد وزنی نقره به TiO_2 که مختصراً به صورت TiO_2-2Ag نشان داده میشود، ۲ گرم از نانوذرات TiO_2 آناناز در ۵۰ میلی لیتر محلول ۲ مولار فرمیک اسید توسط فراصوت پخش گردید و بعد از اضافه کردن ۰,۰۶۵ گرم $AgNO_3$ به آن تحت تابش فرابنفش قرار گرفت تا نانوذرات نقره فلزی توسط احیا نوری بر روی سطح TiO_2 قرار بگیرد.

برای تهیه کامپوزیت TiO_2-2Ag با CLP با درصد وزنی ۳۰ درصد CLP که مختصراً به صورت $TiO_2-2Ag-30CLP$ نشان داده خواهد شد ۱ گرم TiO_2-2Ag در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر با استفاده از پروب فراصوت پخش گردید و سپس ۰,۳ گرم CLP اسید شویی شده به آنها اضافه شد و اعمال فراصوت تا یک ساعت ادامه یافت و سوسپانسیون حاصل بعد از انتقال به اتوکلاو ۱۵۰ میلی لیتری به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد تحت فرآیند هیدروترمال قرار گرفت. و در پایان کامپوزیت حاصل با استفاده از سانتریفیوژ جدا گردید.

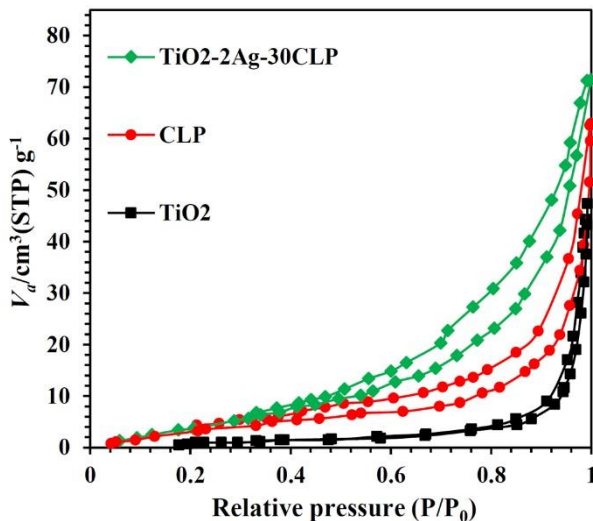
آنالیز XRD با دستگاه Philips X'Pert MPD Pro X-ray diffractometer with Cu K α irradiation ($\lambda = 1.54018$ Å) انجام شد. آزمون FESEM با دستگاه FESEM, MIRA3 (A) انجام شد. دستگاه TESCAN FESEM, Czech Republic از دستگاه (Belsorp II surface analyzer (mini, Japan) استفاده آنالیز BET صورت گرفت. و آزمون DRS در دستگاه Shimadzu-UV-3101PC UV/Vis spectrophotometer انجام شد.

برای بررسی عملکرد فوتوکاتالیستی ۵۰ میلی گرم از فوتوکاتالیستهای تهیه شده به ۱۰۰ میلی لیتر محلول حاوی آفت کش نیتن پیرام با غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر اضافه گردید. سپس در شرایط تاریک تحت چرخش به مدت ۴ ساعت قرار گرفت تا تعادل جذب و واجب سطحی ایجاد شود. و در ادامه تحت تابش W Xenon lamp (OSRAM Co.570) به عنوان تابش



شکل ۱- طیف های XRD نمونه های تهیه شده.

فوتوکاتالیست کامپوزیتی در تابش طبیعی خورشید شود. به منظور بررسی دقیق تر این اثر، گاف انرژی نمونه های TiO_2 و $\text{TiO}_2\text{-2Ag-30CLP}$ بررسی شد و مشاهده شد که در مقایسه با TiO_2 با گاف انرژی تقریباً ۳,۱۴ الکترون ولت نمونه $\text{TiO}_2\text{-2Ag-30CLP}$ دارای گاف انرژی ۲,۷۵ الکترون ولت می باشد. و بنابراین میتوان نتیجه گرفت که حضور CLP در TiO_2 و آلاینده آن با نقره میتواند همزمان با افزایش مساحت سطح نمونه با بهبود ناحیه جذب تابشی آن به سمت نورهای مرئی، عملکرد فوتوکاتالیستی نمونه کامپوزیتی را بهبود بخشد.



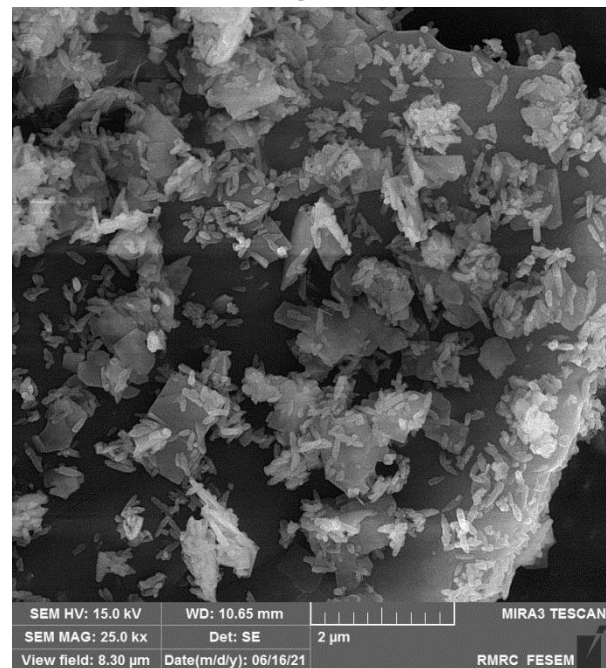
شکل ۳- نمودارهای جذب و واجذب N_2 نمونه های تهیه شده.

در شکل ۵ کارایی فوتوکاتالیستی نمونه های مختلف تهیه شده در تخریب آفت کش نیتن پیرام تحت تابش نور خورشید مصنوعی باهم مقایسه شده اند شود. همچنان که مشاهده میشود در غیاب فوتوکاتالیست و یا در حضور CLP تنها راندمان تخریب بسیار ناچیز است در حالی که تخریب قابل توجهی در حضور TiO_2 اتفاق افتاده است. همچنین حضور CLP در TiO_2 و آلاینده آن با نقره عملکرد این کاتالیست را به طور قابل توجهی افزایش داده است و راندمان تخریب آن را از تقریباً ۵۸ درصد به ۱۰۰ درصد بعد از ۸۰ دقیقه تابش دهی افزایش داده است. بهبود کارایی فوتوکاتالیست TiO_2 در حضور CLP و نقره میتواند به عواملی مانند افزایش مساحت سطح کاتالیست و جب آلاینده بیشتر در سطح آن و افزایش راندمان جذب خورشید با کاهش گاف انرژی TiO_2 به سمت نور مرئی مربوط باشد.

به منظور بررسی تخریب کامل نیتن پیرام بر روی $\text{TiO}_2\text{-2Ag-30CLP}$ تحت تابش نور خورشید، آنالیز کربن کل آلی (TOC) بر روی محلول باقی مانده در زمانهای مختلف تابش دهی انجام شد. همچنان که در شکل ۶ مشاهده میشود آفت کش نیتن پیرام پس از تقریباً ۱۸۰ دقیقه تابش دهی به صورت کامل به مواد غیر قابل تخریب معدنی تبدیل شده است.

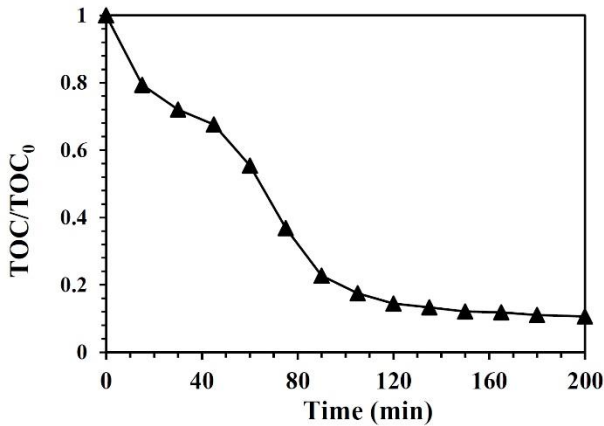
تصویر SEM نمونه $\text{TiO}_2\text{-2Ag-30CLP}$ در شکل ۲ آورده شده است. در این تصویر حضور نانوذرات TiO_2 آلاینده با نقره در کنار صفحات زئولیت CLP مشاهده میشود.

یکی از عوامل موثر در عملکرد فوتوکاتالیستها مساحت سطح آنها و تخلخل آنها میباشد به همین دلیل آزمون BET بر روی نمونه های تهیه شده انجام شد تا مساحت سطح ویژه و نوع تخلخل آنها بررسی شود. همچنان که در شکل ۳ مشاهده میشود نانوذرات TiO_2 نمودار از نوع II نشان میدهد که مربوط به ساختارهای مزوپور میباشد در حالی که کامپزیت آن با CLP و نقره نمودار از نوع III دارد که مربوط به ساختارهای میکروپور میباشد که با حفرات ریز موجود در ساختار CLP مربوط است. مساحت سطح ویژه نانوذرات TiO_2 و کامپزیت آن با CLP و نقره به ترتیب ۳۳ و ۶۱ متر مربع بر گرم میباشد که نشان میدهد حضور CLP باعث افزایش مساحت سطح کامپوزیت نسبت به TiO_2 شده است که میتواند باعث افزایش عملکرد فوتوکاتالیستی آن شود.



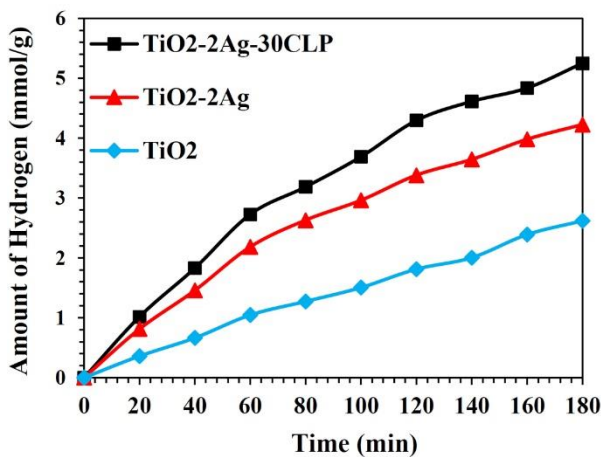
شکل ۲- تصویر SEM نمونه $\text{TiO}_2\text{-2Ag-30CLP}$.

به منظور بررسی عملکرد فوتوکاتالیستی یک فوتوکاتالیست باید رفتار اپتیکی آن مورد ارزیابی قرار گیرد به این منظور طیف جذب نوری نمونه های تهیه شده مورد آزمون قرار گرفت که نتایج مربوطه در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنان که مشاهده میشود نانوذرات TiO_2 آناتاز عمدتاً در ناحیه فرابنفش جذب دارند. در حالی که حضور زئولیت CLP در TiO_2 و یا آلاینده آن با نقره باعث جابجایی لبه جذب TiO_2 به سمت طول موجهای بلند تر و محدوده نور مرئی شده است که میتواند باعث بهبود عملکرد



شکل ۶- نمودار TOC نمونه $TiO_2-2Ag-30CLP$ برای تخریب نیتن پیرام تحت تابش نور خورشید.

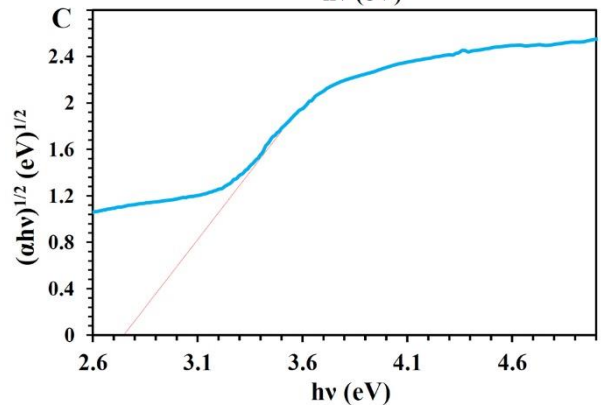
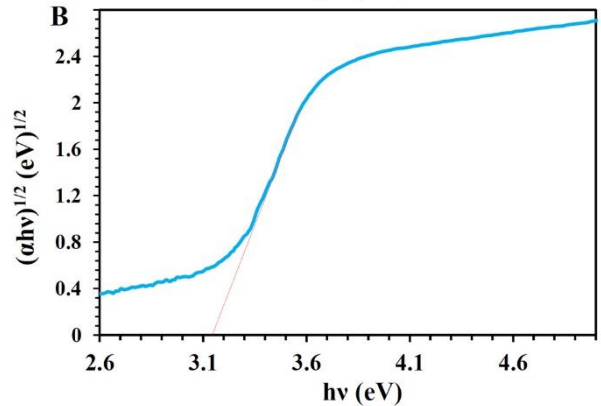
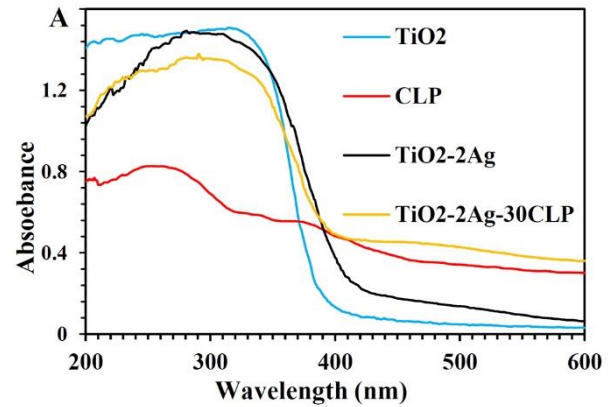
در شکل ۷ کارایی فوتوکاتالیستی نمونه های مختلف تهیه شده در تولید هیدروژن از تجزیه آب تحت تابش نور خورشید مصنوعی باهم مقایسه شده اند. همچنان که مشاهده میشود کامپوزیت کردن نقره و CLP در ساختار TiO_3 عملکرد فوتوکاتالیستی تولید هیدروژن آن را به طور قابل توجهی افزایش داده است بهر حال کارایی فوتوکاتالیستی در کامپوزیت میتواند به عواملی مانند بهبود جذب تابش مرئی با کاهش گاف انرژی و کاهش بازترکیب الکترون و حفره و افزایش مساحت سطح مربوط باشد.



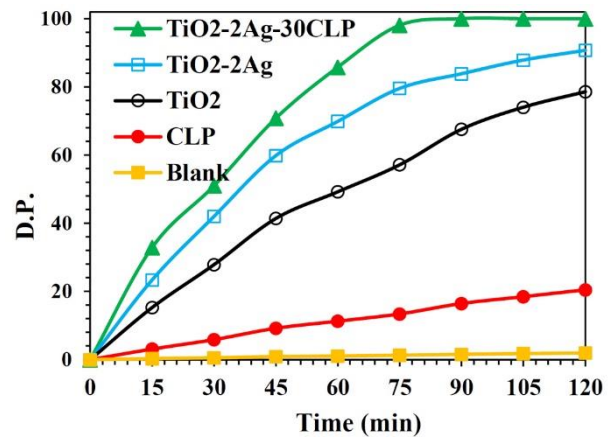
شکل ۷- مقدار هیدروژن تولیدی بر روی نمونه های مختلف فوتوکاتالیستی تحت تابش نور خورشید.

نتیجه گیری و جمع بندی

در این مطالعه نانوکامپوزیت TiO_2 آناناز آلاییده با نقره و زئولیت کلینو پتیلولیت با روش احیا نوری و هیدروترمال تهیه گردید و برای اولین بار به عنوان فوتوکاتالیست برای تخریب آفت کش کشاورزی نیتن پیرام و تولید هیدروژن تحت تابش نور خورشید مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. بلورینگی، شکل و اندازه ذرات، تخلخل، مساحت سطح ویژه و خواص اپتیکی نانوکامپوزیت تهیه شده با آنالیزهای



شکل ۴- (A) طیف DRS (B) گاف انرژی محاسبه شده نمونه $TiO_2-2Ag-30CLP$ و (C) گاف انرژی محاسبه شده نمونه TiO_2



شکل ۵- نمودار درصد تخریب نیتن پیرام تحت تابش نور خورشید بر روی نمونه های تهیه شده.



transfer dynamics, *The Journal of physical chemistry A*, 115 (2011) 13211-13241.

[9] P.S. Basavarajappa, S.B. Patil, N. Ganganagappa, K.R. Reddy, A.V. Raghu, C.V. Reddy, Recent progress in metal-doped TiO₂, non-metal doped/codoped TiO₂ and TiO₂ nanostructured hybrids for enhanced photocatalysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020) 7764-7778.

[10] Y. Xia, Q. Li, K. Lv, M. Li, Heterojunction construction between TiO₂ hollowsphere and ZnIn₂S₄ flower for photocatalysis application, *Applied Surface Science*, 398 (2017) 81-88.

[11] B.A. Bhanvase, T.P. Shende, S.H. Sonawane, A review on graphene-TiO₂ and doped graphene-TiO₂ nanocomposite photocatalyst for water and wastewater treatment, *Environmental Technology Reviews*, 6 (2017) 1-14.

[12] A. Toumazatou, M.K. Arfanis, P.-A. Pantazopoulos, A.G. Kontos, P. Falaras, N. Stefanou, V. Likodimos, Slow-photon enhancement of dye sensitized TiO₂ photocatalysis, *Materials Letters*, 197 (2017) 123-126.

[13] S. Wang, Y. Peng, Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment, *Chemical engineering journal*, 156 (2010) 11-24.

[14] A.M. Dakdareh, C. Falamaki, N. Ghasemian, Hydrothermally grown nano-manganese oxide on clinoptilolite for low-temperature propane-selective catalytic reduction of NO_x, *Journal of Nanoparticle Research*, 20 (2018) 1-14.

[15] Y. Shen, P. Zhou, S. Zhao, A. Li, Y. Chen, J. Bai, C. Han, D. Wei, Y. Ao, Synthesis of high-efficient TiO₂/clinoptilolite photocatalyst for complete degradation of xanthate, *Minerals Engineering*, 159 (2020) 106640.

[16] P. Zhou, Y. Shen, S. Zhao, G. Li, B. Cui, D. Wei, Y. Shen, Synthesis of clinoptilolite-supported BiOCl/TiO₂ heterojunction nanocomposites with highly-enhanced photocatalytic activity for the complete degradation of xanthates under visible light, *Chemical Engineering Journal*, 407 (2021) 126697.

[17] R. Akbari Sene, G.R. Moradi, S. Sharifnia, Sono-dispersion of TiO₂ nanoparticles over clinoptilolite used in photocatalytic hydrogen production: Effect of ultrasound irradiation during conventional synthesis methods, *Ultrasonics Sonochemistry*, 37 (2017) 490-501.

[18] R.A. Sene, S. Sharifnia, G.R. Moradi, On the impact evaluation of various chemical treatments of support on the photocatalytic properties and hydrogen evolution of sonochemically synthesized TiO₂/Clinoptilolite, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (2018) 695-707.

XRD, FESEM, BET, DRS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که نانوکامپوزیت به صورت موفق تهیه شده و در مقایسه با فوتوکاتالیست تجاری TiO₂ آنتاز دارای عملکرد فوتوکاتالیستی بهتری میباشد که دلیل آن میتواند افزایش مساحت سطح و بهبود خواص اپتیکی (افزایش قابلیت جذب نور مرئی) TiO₂ آنتاز در حضور نقره و زئولیت باشد.

تشکر و قدردانی

با سپاس از معاونت پژوهشی دانشگاه بناب بابت حمایت مالی از این تحقیق به شماره گرنت 98/I/ER/9812.

مراجع

[1] N. Muhammad, Y. Zhang, W. Li, Y.G. Zhao, A. Ali, Q. Subhani, T. Mahmud, J. Liu, H. Cui, Y. Zhu, Determination of nitenpyram and 6-chloronicotinic acid in environmental samples by ion chromatography coupled with online photochemically induced fluorescence detector, *Journal of separation science*, 41 (2018) 4096-4104.

[2] M. Tang, Y. Ao, P. Wang, C. Wang, All-solid-state Z-scheme WO₃ nanorod/ZnIn₂S₄ composite photocatalysts for the effective degradation of nitenpyram under visible light irradiation, *Journal of hazardous materials*, 387 (2020) 121713.

[3] S. Hussain, C.J. Hartley, M. Shettigar, G. Pandey, Bacterial biodegradation of neonicotinoid pesticides in soil and water systems, *FEMS Microbiology Letters*, 363 (2016).

[4] Q. Zhou, W. Wang, F. Liu, R. Chen, Removal of difenoconazole and nitenpyram by composite calcium alginate beads during apple juice clarification, *Chemosphere*, 286 (2022) 131813.

[5] M. Noestheden, S. Roberts, C. Hao, Nitenpyram degradation in finished drinking water, *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 30 (2016) 1653-1661.

[6] N. Serpone, A.V. Emeline, *Semiconductor Photocatalysis* Past, Present, and Future Outlook, ACS Publications, 2012.

[7] R. Daghrrir, P. Drogui, D. Robert, Modified TiO₂ for environmental photocatalytic applications: a review, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52 (2013) 3581-3599.

[8] S.G. Kumar, L.G. Devi, Review on modified TiO₂ photocatalysis under UV/visible light: selected results and related mechanisms on interfacial charge carrier

ACEC2021-59164

بررسی عملکرد سیستم آب شیرین کن انجمادی

مریم سلاجقه^۱، مهران عامری^۲

^۱ دانشجوی دکتری، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان و پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه

تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران؛ maryam_salajeghe@yahoo.com

^۲ استاد، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران؛ ameri_mm@uk.ac.ir

چکیده

دیگری از جمله انجماد وجود دارد که برای مناطق و زمان‌های خاص مناسب است. فرایند انجماد-ذوب سازی شامل فرایند حذف نمک و خالص سازی آب از محلول آب شور با استفاده از انجماد و کریستال شدن آب است که در حالت ایده آل یخ تولید شده بایستی عاری از نمک باشد و سپس جداسازی فیزیکی کریستال‌های یخ از محلول و در نهایت ذوب یخ و تبدیل آن به مایع به دست می‌آید [۱].

اگر چه فرایند انجماد-ذوب سازی (F-M) به صورت گسترده‌ای استفاده نمی‌شود، اما این فرایند در جای خود دارای مزایا و معایب خاص خود است. شاید بزرگترین مزیت آن، مقدار انرژی مورد نیاز در مقایسه با روشهایی مثل تقطیر است، چرا که گرمای نهان ذوب یخ یک هفتم گرمای نهان تبخیر است [۱]. از آنجا که انجماد در دمای پایین انجام می‌شود پس مشکلاتی همچون خوردگی و لایه‌گذاری کمتر دیده می‌شود [۲]. همچنین به دلیل پایین بودن دمای عملیات، جهت ساخت تجهیزات می‌توان از پلاستیک و دیگر مواد ارزان قیمت استفاده نمود [۳]. از معایب انجماد هم می‌توان مواردی همچون بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، ماندن طعم و بوی اولیه آب را نام برد [۴].

فرایند انجماد-ذوب سازی شامل سه دسته اصلی انجماد با تماس مستقیم^۱، انجماد با تماس غیر مستقیم^۲ و انجماد خلاء^۳ است. در روش انجماد با تماس مستقیم برای پایین آوردن دما و کریستال سازی از مواد سرد کننده مثل بوتان، فرئون و گازهای CFC^۴ استفاده می‌شود. در این روش ماده منجمد کننده به صورت مایع و تحت فشار از طریق

یکی از راه‌های تامین آب در صورت عدم وجود منابع کافی آب، شیرین سازی آب‌های شور و لب شور است. اگر چه سیستم‌های متداولی همچون اسمز معکوس و تقطیر چند اثره به صورت تجاری برای نمک زدایی استفاده می‌شوند اما فرایند انجماد هم یکی از روش‌هایی است که برای تولید آب شیرین استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی نمک‌زدایی انجمادی است. در این پژوهش، آنالیز ترمودینامیکی سیستم نمک زدایی انجمادی با استفاده از نرم افزار EES انجام شده است. همچنین اثر پارامترهای مهم از جمله غلظت نمک در آب شور ورودی، دمای آب شور ورودی و نسبت بازیافت بر مصرف انرژی سیستم آب شیرین کن انجمادی بررسی شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نمک در آب شور تغذیه و دمای آب شور تغذیه، مصرف انرژی سیستم افزایش می‌یابد، همچنین افزایش نسبت بازیافت باعث افزایش انرژی مصرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آب شیرین کن انجماد غیر مستقیم، کریستالایزر، نسبت بازیافت

مقدمه

امروزه تعداد زیادی از کشورها دارای مشکل کم آبی هستند و اکثر آنها مجبور به استفاده از روشهای شیرین سازی آب برای تهیه آب آشامیدنی هستند. تکنولوژی‌های نمک زدایی برای تولید آب آشامیدنی به دو دسته بزرگ تقسیم بندی می‌شوند: فرایند جداسازی با غشاء همانند فرایندهای اسمز معکوس و الکترودیالیز که به ترتیب از نیروی مکانیکی (فشاری) و الکتریکی استفاده می‌کنند و فرایندهای جداسازی با حرارت همانند تقطیر و انجماد که در آنها تغییر فاز رخ می‌دهد. اگر چه فرایندهای اسمز معکوس (RO) و تقطیر چند اثره (MED) به صورت تجاری برای نمک زدایی استفاده می‌شوند، اما فرایندهای

Direct Freeze^۱
Indirect Freeze^۲
Vacuum Freeze^۳
Chlorofluorocarbons^۴

دمای 25°C و شوری 35 g/l به پیش خنک کننده‌ی سیستم فرستاده می‌شود و با تبادل گرما با پساب خروجی و آب شیرین تولیدی، پیش سرد می‌شود و از آنجا به واحد کریستالایزر تغذیه می‌شود که پس از تبادل حرارت، کریستال‌های یخ تقریباً خالص در آن تولید شده و به سمت ستون شستشو هدایت می‌شوند. در ستون شستشو کریستال‌های یخ از آب نمک غلیظ جدا شده و پس از شستشو به واحد ذوب فرستاده می‌شود. واحد ذوب جایی است که یخ شستشو شده با انتقال حرارت ذوب شده و آب شیرین تولید می‌شود.

مدلسازی سیستم آب شیرین کن انجمادی

به منظور تحلیل انرژی سیستم ترکیبی آب شیرین کن انجمادی، هر یک از اجزاء سیستم به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته شده است و قوانین بقای جرم، بقای هر جزء از محلول و بقای انرژی برای جریان پایدار برای آن بیان می‌شود. معادله بالانس جرم در کریستالایزر طبق رابطه ۱ بیان می‌شود، که D_F ، D_{CRY} ، D_{FC} به ترتیب دبی جرمی آب تغذیه، دبی جرمی یخ تشکیل شده و دبی جرمی آب نمک باقیمانده است.

$$D_F = D_{CRY} + D_{F,C} \quad (1)$$

در سیستم آب شیرین کن انجمادی، آب شور از دو جزء آب خالص و نمک تشکیل شده است و بقای نمک در کریستالایزر به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود که X_{FC} ، X_{CRY} ، X_F به ترتیب غلظت نمک در آب تغذیه، یخ تشکیل شده و آب نمک باقیمانده است.

$$X_F * D_F = X_{CRY} * D_{CRY} + X_{F,C} * D_{F,C} \quad (2)$$

بالانس انرژی در کریستالایزر طبق رابطه ۳ بیان می‌شود که Q_C ظرفیت تبرید کریستالایزر است و برابر با مقدار گرمایی است که در مرحله انجماد از آب شور حذف می‌شود و شامل گرمای محسوس و گرمای نهان برای انجماد است.

$$Q_C = D_F * C_{p,F} * (T_C - T_{F,P}) + D_{CRY} * \Delta H_F \quad (3)$$

$$Q_C = Q_{SENS} + Q_{LAT} \quad (4)$$

مقدار یخ تشکیل شده نسبت به مقدار آب تغذیه توسط پارامتر F_s در رابطه ۵ تعریف می‌شود. بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که نسبت یخ تشکیل شده بالاتر، منجر به کیفیت یخ پایین‌تر می‌شود، در حالی که نسبت یخ پایین‌تر می‌تواند خلوص بیشتری در یخ ایجاد کند [۱۰].

(۵)

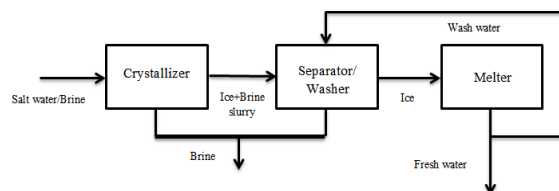
کاهش دمای انجماد آب (ΔT_F) به دلیل نمک و ناخالصی‌های درون آب شور است و با رابطه ۶ بیان می‌شود که C_L میزان کلرینه بودن آب شور و S غلظت نمک در آب شور است [۱۱].

$$\Delta T_F = -9.66 * 10^{-2} * C_L - 5.2 * 10^{-6} * C_L \quad (6)$$

$$S = 1.8147 * C_L \quad (7)$$

یک نازل به درون آب شور پخش می‌شود. میرد در فشار پایین تبخیر می‌شود و انرژی مورد نیاز برای تبخیر را از آب شور می‌گیرد، بنابراین دمای آب شور پایین آمده و منجر به تشکیل کریستال‌های یخ می‌شود. در روش انجماد با تماس غیر مستقیم انرژی حرارتی برای انجماد از میان دیواره‌های مبدل حرارتی عبور می‌کند و با انتقال حرارت از دیواره‌ها به آب شور، کریستال سازی انجام می‌شود [۵]. در انجماد خلاء آب خود به عنوان ماده سرد کننده عمل می‌کند. در این روش از ایجاد شرایط خلاء جهت تبخیر شدید و ناگهانی آب و در نتیجه سرد شدن توده آب و انجماد آن استفاده می‌شود. بخارهای حاصل به عنوان یک ماده سرد کننده برای کاهش دمای محلول و بهتر شدن عمل کریستال سازی استفاده می‌شود.

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است تمامی این روشها دارای مراحل کریستال سازی، جداسازی کریستال‌ها، شستشوی سطحی، ذوب و تولید آب شیرین هستند [۶]. امروزه از فرایند انجماد برای پیش تصفیه آب‌های شور و لب شور که وارد سیستم‌های حساس - تر مثل الکترودیالیز و اسمز معکوس می‌شود نیز استفاده می‌شود [۷].



شکل ۱. شماتیک سیستم نمک زدایی انجمادی

حمید و همکاران [۸] در یک تحقیق تجربی به بررسی تاثیر دمای میرد بر کیفیت آب خالص در یک سیستم نمک‌زدایی انجماد غیر مستقیم پرداختند. نتایج نشان داد که دمای میرد 12°C ، منجر به کاهش ۴۷ درصدی در میزان شوری آب تولیدی می‌شود و در نهایت انجماد مجدد آب تولیدی، به منظور رسیدن به کیفیت استاندارد برای آب خروجی پیشنهاد داده شد.

هتیرا و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۸ به بررسی فرایند تصفیه فاضلاب به وسیله انجماد و ذوب پرداختند و غلظت ناخالصی در یخ پس از هر چرخه انجماد تجزیه و تحلیل کردند و نشان دادند که غلظت ناخالصی در یخ عمدتاً به غلظت ناخالصی در محلول اولیه و سرعت رشد یخ بستگی دارد. علاوه بر این تاثیر افزودن یک مرحله اضافی ذوب و انجماد را نیز بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که باید تعادلی بین مدت زمان کل فرآیند، بازده و مصرف انرژی آن برقرار شود و با مطالعه نتایج، این تحقیق را ایده خوبی برای تصفیه فاضلاب بیان کردند.

در این مطالعه یک سیستم آب شیرین کن انجمادی با روابط ترمودینامیکی مدل سازی شده است. در ادامه تاثیر پارامترهای حاکم بر مساله مانند دمای آب شور، غلظت آب شور ورودی و نسبت بازیافت بر دمای انجماد و انرژی مورد نیاز مورد بررسی قرار گرفته است....

عملکرد سیستم و معادلات حاکم

در این مطالعه، سیستم آب شیرین کن انجمادی با در نظر گرفتن شرایط حالت دائم بررسی می‌شود. در مدل ارائه شده، آب ورودی در

نتایج و بحث بر روی نتایج

از آنجائیکه پارامترهایی از قبیل دمای آب شور ورودی (T_F)، غلظت آب شور ورودی (X_F) و نسبت بازیافت، بیشترین تاثیر را بر عملکرد سیستم ترکیبی دارند، بنابراین در یک مطالعه پارامتری، میزان تاثیر هر کدام از این عوامل بر عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است و میزان انرژی مورد نیاز سیستم آب شیرین کن انجمادی مورد بررسی و محاسبه قرار گیرند.

جدول ۱: کمیت های ورودی برای شبیه سازی

| مقدار | پارامتر |
|-------|-----------------------------------------------|
| ۲۵ | دمای آب شور ورودی ($^{\circ}C$) |
| ۳۵ | غلظت آب شور ورودی (g/l) |
| ۲۰۰۰ | تولید آب شرب روزانه (m^3) |
| ۰/۲۲ | غلظت نمک در آب خروجی از FD (g/l) |
| ۲۰ | دمای آب خروجی از FD ($^{\circ}C$) |
| ۰ | غلظت نمک در یخ تولید شده در کریستالایزر (g/l) |

نتایج حاصل از حل معادلات بقای جرم و انرژی قسمت های مختلف سیستم FD در جدول ۲ ارائه می شود. این جدول دبی جریان، غلظت نمک، دما و میزان گرمایی که برای انجماد و ذوب یخ باید حذف یا فراهم شود را نشان می دهد.

جدول ۲: نتایج شبیه سازی

| دبی آب شور ورودی (m^3/day) | دبی آب شیرین تولید شده (m^3/day) | شوری پساب (g/l) | انرژی مورد نیاز برای انجماد (kJ/kg) | انرژی مورد نیاز برای ذوب (kJ/kg) |
|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| ۵۶۹۱ | ۲۰۰۰ | ۵۳۸۴۶ | ۹۳۹۴ | ۷۶۷۲ |

شکل ۲(الف) تاثیر غلظت نمک در آب تغذیه را بر روی دمای کریستالایزر و غلظت نمک در پساب نشان می دهد. با افزایش غلظت نمک در آب شور ورودی با توجه به رابطه ۶، نقطه انجماد آب شور کاهش می یابد که باعث کاهش دمای کریستالایزر می شود. همچنین نتایج نشان می دهد با افزایش غلظت نمک در آب تغذیه و به دلیل ثابت فرض کردن خلوص آب شیرین تولید شده، با افزایش غلظت نمک در آب تغذیه، غلظت نمک در پساب هم افزایش می یابد.

شکل ۲(ب) اثر نسبت بازیافت را بر روی دمای کریستالایزر و غلظت نمک در پساب نشان می دهد. همانگونه که در شکل دیده می شود، با افزایش نسبت بازیافت، غلظت نمک در محلول آب نمک باقیمانده افزایش و به دنبال آن دمای نقطه انجماد آب نمک کاهش می یابد، و به دلیل ثابت فرض کردن خلوص آب شیرین تولید شده، با افزایش نسبت

بازیافت، غلظت نمک در پساب هم افزایش می یابد.

$$Q_{water} = \frac{Q_{total}}{m_{productwater}}$$

بقای جرم نمک در ستون شستشو و جداکننده طبق رابطه ۸ بدست می آید که X_B, X_P, X_{Wash} به ترتیب غلظت نمک در آب شستشو، آب شیرین تولیدی و پساب خروجی است.

$$X_{CRY} * D_{CRY} + X_{F,C} * D_{F,C} \quad (8)$$

$$+ X_{Wash} * D_{Wash} = X_P * D_P + X_B * D_B$$

$$D_P = D_{CRY} + D_{IMP} \quad (9)$$

$$X_P * D_P = X_{CRY} * D_{CRY} + X_{IMB} * D_{IMP} \quad (10)$$

$$D_{Wash} = .05 * D_P \quad (11)$$

قبل از تخلیه یخ های ذوب شده از سیستم، مقدار کمی آب شیرین تولیدی به عنوان آب شستشو به واحد جداسازی منتقل می شود. مقدار مطلوب آب شستشو از ۵٪ از کل آب تولیدی بیشتر نمی شود. سپس آب تولیدی باقیمانده از واحد ذوب از مبدل حرارتی عبور می کند [۱۲]. بقای انرژی در ذوب کننده و مبدل حرارتی پیش گرم کن طبق رابطه های ۱۲ و ۱۳ بدست می آید.

$$Q_{melt} = D_{CRY} * \Delta H_F \quad (12)$$

$$+ D_{IMB} * C_{IMB} * (T_{melt} - T_C)$$

$$D_F * C_{P,F} * (T_{F,P} - T_F) \quad (13)$$

$$+ D_B * C_{P,B} * (T_P - T_C)$$

$$+ D_P * C_{P,B} * (T_P - T_{melt}) = 0$$

که D_F, D_P, D_B و D_{IMB} به ترتیب دبی آب شور ورودی، آب شیرین تولیدی، پساب تولیدی و آب همراه با یخ می باشد.

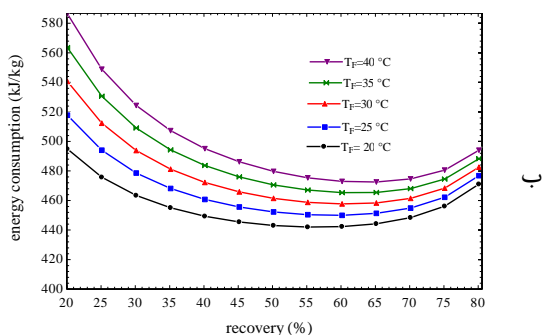
کل انرژی مورد نیاز سیستم به صورت حاصل جمع انرژی مورد نیاز برای انجماد آب شور و یک مقدار انرژی اضافی بیان می شود که انرژی اضافی برای اطمینان از تولید سرمای کافی در سیستم FD، در نظر گرفته شده است [۱۱].

$$Q_{total} = Q_C + Q_{ADD} \quad (14)$$

$$Q_{ADD} = 0.15 * Q_C \quad (15)$$

در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد سیستم آب شیرین کن FD از پارامتر مصرف انرژی ویژه استفاده شده است. Q_{water} را می توان نسبت انرژی مصرف شده به آب شیرین تولید شده تعریف نمود.

$$(27)$$



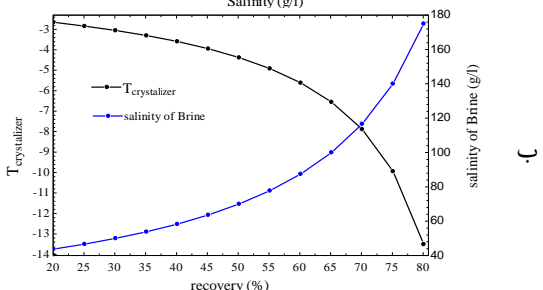
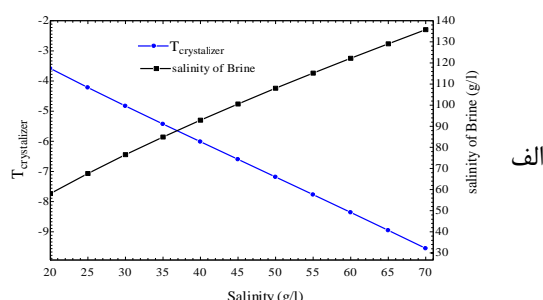
شکل ۳: تغییرات مقدار انرژی مصرفی در کریستالایزر با (الف) غلظت نمک در آب شور تغذیه، (ب) نسبت بازیافت

نتیجه گیری و جمع بندی

نمک زدایی آب دریا به عنوان منبع آب آشامیدنی احتمالاً در آینده افزایش خواهد یافت، زیرا منابع آب خالص موجود در حال کاهش است. اگرچه روش نمک زدایی یخ به طور گسترده‌ای بصورت تجاری مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، اما این سیستم دارای چندین مزیت است که برای مناطق و زمان‌های خاص قابل استفاده می‌باشد. تحلیل ترمودینامیکی تعدادی از پارامترهای موثر کمک کرد تا درک بهتری از تاثیر این پارامترها بر روی مصرف انرژی سیستم بدست آید. همانطور که انتظار می‌رفت، مصرف انرژی فرایند نمک‌زدایی انجمادی با افزایش دمای آب شور تغذیه افزایش یافته است، علاوه بر این افزایش غلظت نمک در آب شور ورودی باعث افزایش انرژی مورد نیاز برای انجماد شده است و افزایش غلظت نمک در پساب را به دنبال دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد به ازای دماهای متفاوت آب شور ورودی یک مقدار بهینه برای نسبت بازیافت وجود دارد که مقدار انرژی مورد نیاز برای انجماد را کمینه می‌کند.

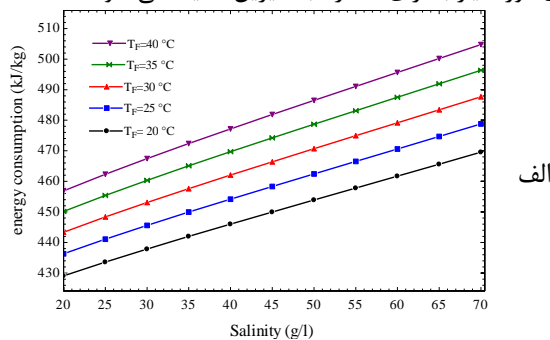
فهرست علائم

| | |
|--------------------------------------------------|--------------|
| دبی آب شور ورودی | D_F |
| دبی مخلوط آب و یخ خروجی از کریستالایزر | D_{IS} |
| دبی یخ خروجی از کریستالایزر | D_{Cr} |
| دبی آب شور منجمد نشده m^3/d | $D_{F,c}$ |
| دبی پساب شور خروجی از FD | D_B |
| دبی آب شیرین تولیدی | D_P |
| دبی آب موردنیاز برای شستشوی یخ | D_{wash} |
| دبی آب همراه با یخ | D_{IMP} |
| دمای آب شور ورودی ($^{\circ}C$) | T_F |
| دمای آب شور خروجی از پیش گرم کن ($^{\circ}C$) | $T_{F,P}$ |
| دمای کریستالایزر ($^{\circ}C$) | T_C |
| دمای آب شیرین و پساب خروجی از FD ($^{\circ}C$) | T_P |
| دمای ذوب یخ ($^{\circ}C$) | T_{melt} |
| کاهش دمای انجماد آب شور بر حسب غلظت | ΔT_F |



شکل ۲: تغییرات دمای انجماد و غلظت نمک در پساب با (الف) غلظت نمک در آب شور تغذیه، (ب) نسبت بازیافت

در شکل ۳ (الف) تأثیر غلظت نمک آب شور بر انرژی سرمایشی مورد نیاز در کریستالایزر در دماهای متفاوت نشان می‌دهد. ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نمک در آب شور تغذیه، انرژی مورد نیاز برای انجماد افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت نمک آب شور ورودی، نقطه انجماد آب شور کاهش می‌یابد و به دلیل کاهش دمای کریستالایزر، مقدار انرژی مورد نیاز انجماد افزایش می‌یابد. شکل ۳ (ب) اثر نسبت بازیافت را بر روی انرژی سرمایشی مورد نیاز در کریستالایزر در دماهای متفاوت نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در ابتدا با افزایش نسبت بازیافت شاهد کاهش انرژی سرمایشی هستیم، سپس با افزایش نسبت بازیافت، در حدود نسبت بازیافت ۷۰٪ انرژی سرمایشی نیز تدریجی افزایش می‌یابد و نقطه بهینه ای برای انرژی سرمایشی وجود دارد، با افزایش نسبت بازیافت، غلظت نمک در محلول آب نمک باقیمانده افزایش و به دنبال آن دمای نقطه انجماد آب نمک کاهش می‌یابد، در نتیجه انرژی سرمایشی بیشتری نیاز است. از سوی دیگر با افزایش نسبت بازیافت، مقدار یخ تشکیل شده و در نتیجه آب شرب تولیدی نیز افزایش یافته و به ازای یک نسبت بازیافت مشخص، انرژی مورد نیاز به ازای مقدار آب شیرین کمینه می‌شود.





- to Desalination, Public Health and the Environment, Geneva, pp.1-50 . 2007.
- [5] AWWA, Water Desalting Planning Guide for Water Utilities. New York: John Wiley and Sons, 2004.
- [6] J. Rosen, Freeze concentration beats the heat, Mech. Engr, Vol. 12, pp. 46–50, 1990.
- [7] A. M. Rahman, X. D. Chen, Freezing-melting process and desalination: I. review of the state-of-the art. Separation and Purification Reviews, Vol.35, pp.59-96, 2006.
- [8] F. H. Ab.Hamid, N. A.Rahim, N. Ngadi, Z.Y. Zakaria, M. Jusoh, Effect of Coolant Temperature on Desalination Process via Progressive Freeze Concentration, Applied Mechanics and Materials, Vol. 695, pp.443-446,2015.
- [9] T. Htira, C. Cogne, E. Gagniere, D. Mangin Experimental study of industrial wastewater treatment by freezing. Journal of Water Process Engineering, Vol. 23, pp. 292-298, 2018.
- [10] I. Baayyada, N. Semlali, A. Hassania, T. Bounahmidia, Evaluation of the energy consumption of industrial hybrid seawater desalination process combining freezing system and reverse osmosis, Desalination and Water Treatment doi: 10.1080/19443994.2014.968901
- [11] A.A. Madani, S.E. Aly, A combined RO/Freezing system to reduce inland rejected brine, Desalination, Vol. 75, pp. 241-258, 1989.
- [12] W.E. Johnson, State-of-the-art of freezing processes, their potential and future, Desalination, Vol. 19, pp. 349–358, 1976.

| نمک | |
|-------------------------------------|--------------------|
| غلظت نمک در آب ورودی به FD | X _F |
| غلظت نمک در آب شور منجمد نشده | X _{F,c} |
| غلظت نمک در آب خروجی از FD | X _P |
| غلظت نمک در یخ خروجی از کریستالایزر | X _{Cry} |
| غلظت نمک در پساب خروجی از FD | X _B |
| غلظت نمک در آب همراه با یخ | X _{IMB} |
| شوری آب نمک (g/l) | S |
| نسبت یخ تشکیل شده | F _s |
| انرژی مورد نیاز برای انجماد آب شور | Q _C |
| گرمای مورد نیاز برای ذوب یخ | Q _{melt} |
| انرژی اضافی مورد نیاز | Q _{ADD} |
| مقدار انرژی ویژه (kJ/kg) | Q _{water} |

مراجع

- [1] J. A. Heist, Freeze crystallization, Chemical Engineering, Vol. 86, No. 10, pp. 72–82, 1979.
- [2] W.E. Johnson, State-of-the-art of freezing processes, their potential and future, Desalination, Vol. 19, pp. 349–358, 1976.
- [3] J.G. Muller, Freeze concentration of liquids: theory, practice and economics, Food Technology, Vol.21, pp. 49–60, 1967.
- [4] Who, Desalination for safe water supply Guidance for the Health and Environmental Aspects Applicable

ACEC2021-60810

بازیافت حرارتی گازهای احتراقی کوره‌ها در مبدل حرارتی لوله‌ای به همراه مولد گردابه

الهام احمدرجبی^۱، امیربابک انصاری^۲، سید محمد حجت محمدی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران؛ e.ahmadrajabi@gmail.com
^۲ استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران؛ a.b.ansari@kgut.ac.ir
^۳ استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران؛ smh.mohammadi@kgut.ac.ir

واژه‌های کلیدی: مبدل حرارتی لوله‌ای، گاز تشعشعی، مولد گرداب

چکیده

مبدل‌های حرارتی^۱ از مهمترین تجهیزات جهت انتقال حرارت بین دو سیال در فرآیندهای مختلف صنعتی هستند. یکی از کاربردهای مبدل‌های حرارتی، بازیافت حرارت^۲ گازهای احتراقی خروجی از کوره‌های گازی جهت پیش‌گرمایش هوا و استفاده از آن در مشعل‌های گازی است. استفاده از هوای گرم باعث کاهش مصرف سوخت در مشعل‌ها، افزایش دمای اشتعال، احتراق بهتر، کاهش آلاینده‌ها و در نتیجه افزایش راندمان مشعل می‌شود. به همین منظور طراحی مناسب و صحیح مبدل‌ها و همچنین افزایش راندمان آنها از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. استفاده از مولدهای گردابه^۳ (VG) یکی از موثرترین روش‌های غیرفعال برای افزایش انتقال حرارت^۴ و همچنین افزایش راندمان مبدل‌های حرارتی است. در کار حاضر به مطالعه و بررسی رفتار حرارتی-سیالاتی یک مبدل حرارتی لوله‌ای با مولدهای گرداب جهت بازیافت حرارت گازهای تشعشعی خروجی از کوره‌های احتراقی پرداخته شده است. نتایج بدست آمده از این مطالعه با نتایج دیگر پژوهش‌ها اعتبارسنجی گردیده و همچنین روش جهت مجزا (DOM^۵) جهت شبیه‌سازی رفتار تشعشعی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل پارامترهای عملکردی یک مبدل حرارتی شامل عدد ناسلت و دمای خروجی به ازای ضریب جذب گاز ورودی و ضریب صدورهای مختلف برای دیوارها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده این است که افزایش میزان ضریب جذب و صدور بر میزان انتقال حرارت اثربخش بوده است بطوریکه در نظر نگرفتن مکانیزم تشعشع خطای نسبتاً زیادی را در نتایج اعمال خواهد کرد.

مقدمه

مبدل‌های حرارتی فین-لوله کاربردهای بسیار متعددی در صنایع مختلف مانند خودروسازی، صنایع شیمیایی، نیروگاه‌های تولید برق، سیستم‌های تهویه مطبوع و گرمایش و یا بازیافت حرارت دارند. کاربرد وسیع آنها عمدتاً به دلیل اثر حرارتی بالا، استقامت در فشار زیاد در محدوده لوله، سادگی ساخت، شکل فشرده و هزینه‌های نسبتاً کم است [۱-۳]. با توجه به اهمیت این نوع مبدل‌ها، آنالیز رفتار حرارتی-سیالاتی آنها همواره مورد توجه محققان بوده و در این راستا مطالعات عددی و آزمایشگاهی بسیار زیادی جهت آنالیز رفتار حرارتی-سیالاتی آنها صورت گرفته است. بطور کلی برای افزایش راندمان حرارتی این نوع از مبدل‌ها روش‌های مختلفی شامل روش‌های فعال و غیرفعال مورد استفاده قرار گرفته است.

جانگ و همکاران [۴] یک مطالعه تجربی و عددی در مورد انتقال حرارت و رفتار سیالاتی مبدل حرارتی لوله‌ای با پره‌های ساده چند ردیفی انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که افزایش ردیف‌های لوله (از ۱ به ۶) منجر به کاهش عدد ناسلت (Nu°) می‌شود. سوارز و همکاران [۵] یک مدل تک بعدی برای پیش‌بینی انتقال حرارت از و به پره‌ها و لوله‌ها ارائه دادند. آنها طیف وسیعی از شرایط لوله و شرایط عملکرد مبدل حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند. حاتمی و همکاران [۶] بازیابی انرژی از اگزوز موتور دیزل را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از یک مبدل حرارتی لوله فین‌دار بهینه‌سازی شده استفاده کردند. برای انجام

^۵ Discrete Ordinates Method

^۶ Nusselt number

^۱ Heat exchanger

^۲ Heat recovery

^۳ Vortex Generator

^۴ Passive thermal enhancement method

زبان‌های آزاد می‌تواند انتقال گرما را در حدود ۱۱۸٪ نسبت به یک لوله خالی بهبود بخشد، در حالی که برای نوع صلب^{۱۲} (RVG) حدود ۹۷٪ بود.

در بسیاری از مواقع، جریان سیالی که از روی صفحات مبدل عبور می‌کنند، حاوی ذرات ریزی هستند که این ذرات بسته به نوع و جنس ذرات، رژیم جریان (آرام یا آشفته) و همچنین میزان دمای موثر، به صورت رسوب بر روی سطوح ته‌نشین شده و با ایجاد یک لایه باعث افزایش مقاومت حرارتی و کاهش راندمان مبدل می‌شوند. لذا استفاده از مولدهای گردابه نه تنها باعث افزایش انتقال حرارت شده، بلکه به دلیل ایجاد آشفتگی در جریان مانع از رسوب این ذرات بر روی سطوح می‌شوند. ژانگ و همکاران [۱۱]، افزایش انتقال حرارت و ضد رسوب در مبدل حرارتی با اجزای القاکننده گردابه را مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند اجزای القاکننده گردابه به طور موثری ضریب انتقال حرارت را بهبود بخشیده و همچنین لایه آرام پایین را در نزدیکی سطح سرکوب می‌کنند که منجر به مهار تولید رسوب می‌شود. هان و همکاران [۱۲] با استفاده از روش اولر^{۱۳} به صورت عددی اثرات ارتفاع، طول و فاصله مولد گردابه بر روی مشخصات رسوب ذرات در یک کانال مستطیلی با و بدون مولد گردابه را بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که مقاومت رسوب با افزایش ارتفاع و طول مولد گردابه کاهش می‌یابد.

یکی از کاربردهای بسیار مهم مبدل‌های حرارتی لوله‌ای، بازیافت حرارت از گازهای خروجی از کوره‌های گازی است که تقریباً در تمام صنایع فلزی وجود دارند. در بسیاری مواقع این گازها از طریق دودکش به اتمسفر تخلیه می‌شوند. با توجه به اینکه دمای این گازها که در واقع محصولات احتراق هستند، بسیار زیاد است، می‌توان از این حرارت اتلافی برای موارد مختلفی مانند پیش گرمایش هوا استفاده نمود. در این گازها، با توجه به دمای بالا و ترکیبات گاز، انتقال حرارت تشعشعی یکی از مکانیزم‌های غالب بوده که باید در همواره در محاسبات مدنظر قرار گیرد. تابش حرارتی توسط هر دو گاز، H_2O و CO_2 و همچنین ذرات به شکل سوخت، خاکستر و دوده در محفظه احتراق ساطع و جذب می‌شود. برای محاسبه تشعشع، معادله انتقال تابشی باید حل شود که برای این منظور معمولاً از روش‌های عددی مختلفی مانند روش جهات مجزا، مدل‌های مونت کارلو و غیره استفاده می‌شود.

فروزان نیا و همکاران [۱۳] تاثیر تابش گازهای خروجی و زاویه شیب بر عملکرد حرارتی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای گاز به گاز را بررسی کردند. نتایج بیانگر نقش مهم تابش، در سرعت انتقال حرارت و بهبود بازده حرارتی مبدل در بازیابی گرمای اتلافی بود. بطوریکه افزایش مقدار $RC^{۱۴}$ از ۰-۵۰ منجر به ۲۲۰٪ افزایش در انتقال حرارت می‌شد. در مطالعه انجام شده توسط یو و همکاران [۱۴] ذرات زغال سنگ و

بهینه‌سازی چند هدفه از شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج نشان داد که حداکثر بازیابی انرژی در بارهای زیاد موتور اتفاق می‌افتد و مبدل بهینه حرارتی با ۱۰ باله به طور متوسط ۸٪ راندمان قانون دوم را در بازیابی انرژی دارد.

یکی از روش‌های غیرفعال جهت افزایش راندمان انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی، استفاده از مولدهای تولید گردابه است. هدف از معرفی VGها، تغییر ساختار جریان و افزایش اختلاط سه بعدی با ایجاد گردابه‌های عرضی، طولی و جریان چرخشی است. استفاده از VG در مبدل‌های حرارتی منجر به قطع و شکستن لایه مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی می‌شود، در نتیجه انتقال حرارت را افزایش می‌دهد.

فیبیگ و همکاران [۷] یک تحقیق تجربی و عددی در مورد افزایش انتقال حرارت توسط مولد گردابه نوع بال مستطیلی (RVG^y) و استفاده از آن در مبدل‌های حرارتی فین-لوله بیضی با تغییر عدد رینولدز بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که در رینولدز ۱۷۵ نوسانات جریان، انتقال حرارت را تقریباً ۱۵٪ افزایش می‌دهد، در حالیکه ایجاد لایه مرزی^۸ و چرخش باعث افزایش انتقال حرارت در حدود ۶۰٪ می‌شود. همچنین ایجاد لایه‌های مرزی و چرخش منجر به افزایش انتقال حرارت در تمام اعداد رینولدز می‌شود. نتایج عددی مطالعات گانگ و همکاران [۸] در بررسی تاثیر چندین پارامتر اصلی جفت بالک ترکیبی مستطیلی ($CRWP^9$) در انتقال حرارت و اصطکاک بر روی مبدل‌های حرارتی فین-لوله در مقایسه با جفت بالک‌های مستطیلی معمولی (RWP^{10}) نشان داد، گردابه‌های تولید شده توسط CRWP بیشتر، بزرگتر و قوی‌تر است و از این رو، CRWP می‌تواند به طور موثرتر انتقال گرما را بهبود و اصطکاک را افزایش دهد. غلامی و همکاران [۹] در یک بررسی عددی، افزایش انتقال حرارت و افت فشار را برای مبدل‌های حرارتی فشرده فین-لوله با باله مستطیلی موج‌دار برای اعداد مختلف رینولدز (۸۰۰-۴۰۰) و زاویه حمله ۳۰ درجه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^{۱۱} (CFD) مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که مولدهای موج‌دار گردابه، به ویژه ساختار باله مستطیل شکل موج‌دار، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد انتقال گرما دارند. همچنین با افزایش عدد رینولدز، میزان عدد ناسلت برای تمام حالات افزایش داشت و بیشترین میزان افزایش به ترتیب برای RVG موجی روبه‌بالا، روبه‌پایین و معمولی بود. یکی از راهکارهای افزایش راندمان مبدل‌های حرارتی، ایجاد آرایش و چیدمان مختلفی از بالک‌ها است که این موضوع نیز در مطالعات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. علی و همکاران [۱۰] یک ساختار VG انعطاف‌پذیر را در داخل لوله‌های مبدل قرار داده و عملکرد انتقال حرارت و اختلاط را با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی سه بعدی بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که نوسان

^{۱۲} Rigid Vortex Generator

^{۱۳} Eulerian method

^{۱۴} radiation-conduction

⁷ Rectangular Vortex Generators

⁸ Boundary Layer

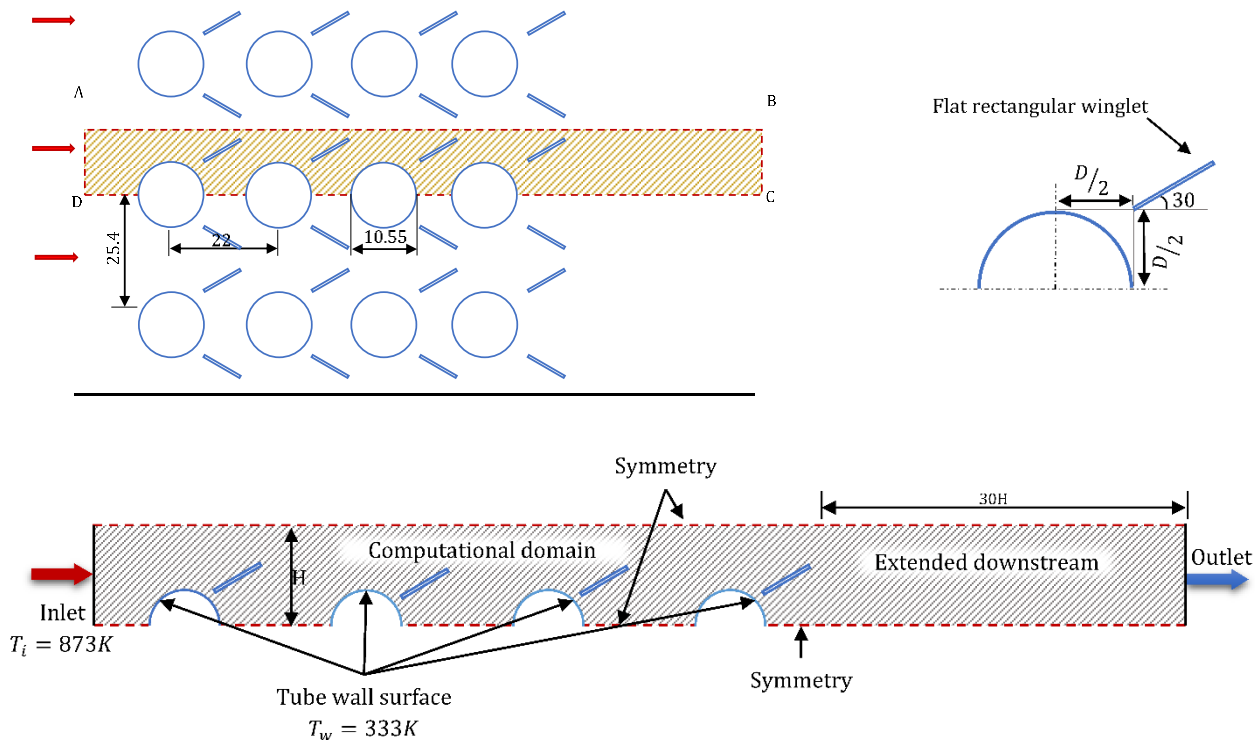
⁹ Combined Rectangular Winglet Pair

¹⁰ Rectangular Winglet Pair

¹¹ Computational Fluid Dynamics



دوده در گاز تشعشعی در نظر گرفته شد و تابش گاز با هم به صورت خاکستری و غیرخاکستری بررسی شد.



شکل ۱: شماتیک مبدل حرارتی و فضای محاسباتی

همچنین زاویه حمله و نسبت ابعاد مولد گرداب (یعنی نسبت ارتفاع VG به طول وتر) به ترتیب ۳۰ و ۰/۵ در نظر گرفته شده است. ابعاد و اندازه سایر پارامترهای هندسی نیز در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱: ابعاد ناحیه محاسباتی

| مولفه | نماد | مقدار |
|-----------------|----------|------------|
| قطر خارجی لوله | D | ۱۰/۵۵ (mm) |
| گام طولی لوله | P_l | ۲۲ (mm) |
| گام عرضی لوله | P_t | ۲۵/۴ (mm) |
| تعداد ستون لوله | N | ۴ |
| طول بالک | l | ۶ (mm) |
| عرض بالک | δ | ۰/۲ (mm) |
| زاویه حمله بالک | α | ۳۰ |

معادلات حاکم

برای مطالعه حاضر سیال غیرقابل تراکم با خواص ترموفیزیکی ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به سرعت ورودی کم، رژیم جریان به صورت آرام در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم بر مساله را در جریان آرام به صورت زیر می توان بیان کرد:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

مطالعات فوق نشان می دهد استفاده از مولدهای گردابه تا حد زیادی می تواند به بهبود عملکرد مبدل ها کمک کند. همچنین مرور مطالعات پیشین نشان می دهد که تاکنون انتقال حرارت تشعشع در مبدل های فین-لوله مورد بررسی قرار نگرفته و با توجه به اینکه یکی از کاربردهای مهم این مبدل ها بازیافت حرارتی از گازهای احتراقی است، لذا مکانیزم تشعشع نقش بسیار مهمی در انتقال حرارت دارد. لذا در این مطالعه به بررسی رفتار حرارتی سیالاتی یک مبدل حرارتی لوله ای جهت بازیافت حرارت از گازهای تشعشعی خروجی از کوره های احتراقی پرداخته شده که در آن تاثیر مولدهای گردابه نیز بر راندمان انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل سازی مبدل حرارتی

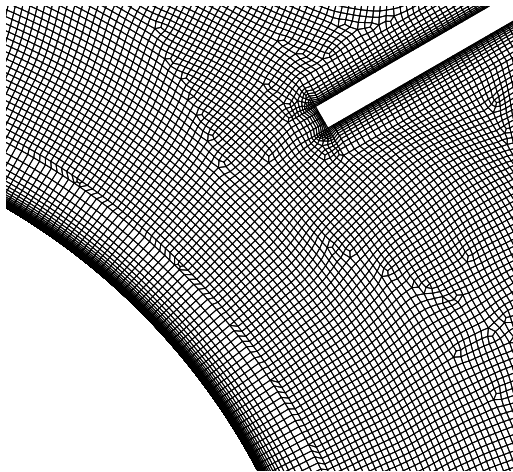
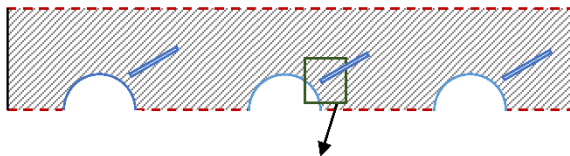
شکل ۱ شماتیک دو بعدی را برای مبدل حرارتی فین-لوله نشان می دهد که در آن ۴ ستون لوله با قطر D قرار دارد. با توجه به تقارن، ناحیه ای که توسط خط چین در شکل مشخص شده است به عنوان ناحیه محاسباتی انتخاب شده است.

در مرز ورودی، سرعت جریان یکنواخت $U = U_{in}$ و دمای ثابت $T_{in} = 873 K$ در نظر گرفته شده است. برای دیوار لوله ها، از اصل عدم لغزش برای سرعت استفاده شده است. در مرز خروجی، شرط توسعه یافتگی و گرادیان صفر برای همه متغیرها در نظر گرفته شده است. دما در دیواره لوله ها $T_w = 333 K$ در نظر گرفته شده است.

کاری مبدل حرارتی، از انتقال حرارت تشعشعی صرف‌نظر شده است. در شکل ۲ تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز جریان نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش عدد رینولدز، به دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی، مقدار عدد ناسلت نیز افزایش یافته که نشان‌دهنده افزایش میزان انتقال حرارت از لوله‌ها به جریان هوا است. همچنین در این شکل نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده با نتایج غلامی و همکاران [۹] مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، تطابق بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد که بیانگر صحت مدل عددی ارائه شده است.

مطالعه شبکه

با توجه به اینکه در هر شبیه‌سازی عددی، شبکه محاسباتی نقش بسیار مهمی در دقت نتایج دارد، لذا مطالعه شبکه برای هندسه مورد نظر انجام شده است بطوری که عدم وابستگی نتایج به شبکه محاسباتی حاصل گردد. برای این منظور شبکه‌های مختلفی برای هندسه مورد مطالعه در نظر گرفته شده و پارامترهای عملکردی مختلف مانند عدد ناسلت و دمای از خروجی از مبدل به ازای این شبکه‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. همچنین برای افزایش دقت نتایج و کاهش تعداد شبکه محاسباتی و در نتیجه کاهش حجم محاسبات، شبکه محاسباتی در نزدیکی مرزهای صلب که گرادیان متغیرهای وابسته بسیار زیاد و با اهمیت است، متمرکز شده است. در شکل ۳ تمرکز شبکه در نزدیکی بالک‌ها و لوله‌ها بخوبی نشان داده شده است. شایان ذکر است که بر اساس مطالعه شبکه انجام شده، با استفاده از یک میلیون گره محاسباتی، نتایج علاوه بر اینکه از دقت خوبی برخوردار هستند مستقل از شبکه نیز بوده و این شبکه به عنوان شبکه بهینه در سایر محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۳: تمرکز شبکه محاسباتی در هندسه مورد مطالعه

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \nabla \cdot q_r \quad (3)$$

معادلات عمومی (۱) - (۳) که به ترتیب معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی می‌باشند، در شبیه‌سازی برای محاسبه انتقال گرما، جریان سیال و افت فشار استفاده می‌شوند. همچنین برای شبیه‌سازی رفتار تشعشعی گاز که به عنوان محیط شرکت کننده در تشعشع در نظر گرفته شده است، جمله آخر در معادله انتقال حرارت اضافه شده است. شایان ذکر است که معادلات فوق در نرم‌افزار ANSYS-FLUENT توسط الگوریتم سیمپل حل شده‌اند. همچنین برای شبیه‌سازی رفتار تشعشعی گاز، از روش طول‌های مجزا (DOM) استفاده شده است. همچنین برای اطمینان از دقت نتایج، معادلات فوق تا رسیدن به خطای نسبی 10^{-5} Relative Error حل شده‌اند.

همچنین در این مطالعه برای بررسی عملکرد حرارتی مبدل حرارتی از عدد ناسلت نیز استفاده شده است که طبق روابط زیر محاسبه می‌شود:

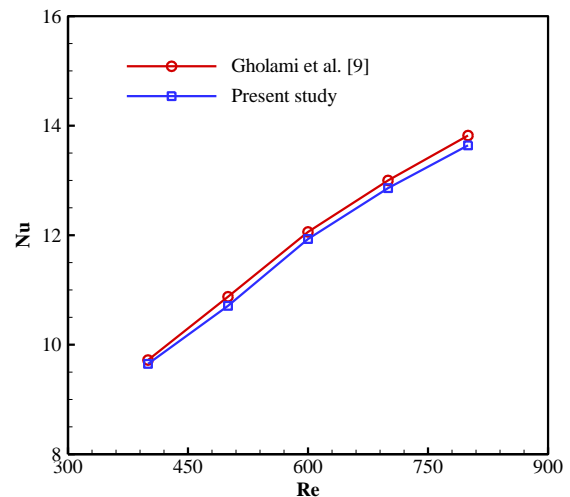
$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_w - T_{in}) - (T_w - T_{out})}{\ln((T_w - T_{in}) / (T_w - T_{out}))} \quad (4)$$

$$h = m_f C_p (T_{out} - T_{in}) / (A \Delta T_{lm}) \quad (5)$$

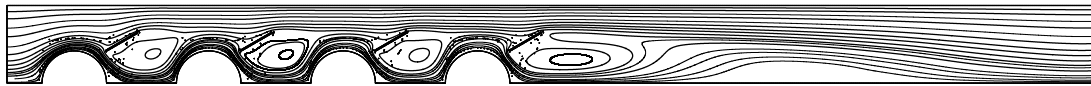
$$Nu = h D_h / k \quad (6)$$

اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل عددی ارائه شده در مطالعه حاضر، یک مبدل حرارتی لوله‌ای به همراه بالک‌های مستطیلی که پیش از این توسط غلامی و همکاران [۹] مورد مطالعه قرار گرفته بود، شبیه‌سازی شده و نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده در مرجع [۹] مقایسه شده است. در این مطالعه، رفتار حرارتی سیالاتی یک کانال مستطیلی شامل ۴ ردیف لوله داغ مورد مطالعه قرار گرفته است بطوریکه هوای سرد با دمای ۳۰۰ K وارد کانال شده و بعد از عبور از روی لوله‌ها، مقداری از حرارت لوله‌ها را جذب کرده و گرم می‌شود. همچنین اثر وجود بالک‌های مختلف نیز در میزان انتقال حرارت مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با توجه به نوع سیال عامل و دمای



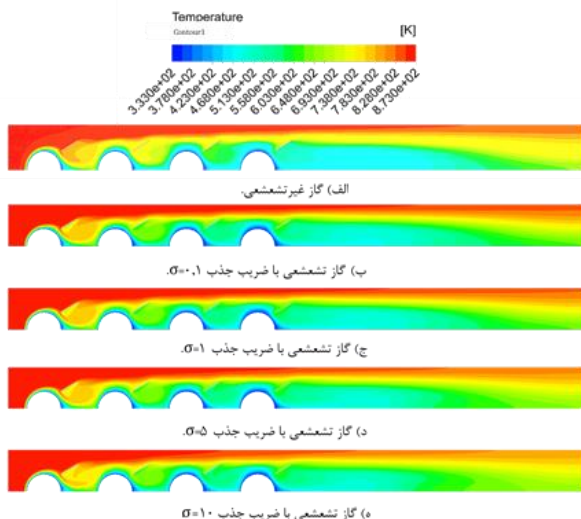
شکل ۲: مقایسه توزیع عدد ناسلت به ازای اعداد رینولدز مختلف



شکل ۴: کانتور خطوط جریان

که مشاهده می‌گردد، وجود گردابه‌های تولید شده توسط بالک‌ها باعث ایجاد گرادیان دمای بیشتر و در نتیجه افزایش میزان انتقال حرارت از لوله‌ها شده است. همچنین در شکل ۵ برای بررسی اثر پارامترهای تشعشعی جریان گاز داغ، تأثیر ضریب جذب گاز بر روی رفتار حرارتی مبدل مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور کانتورهای دما به ازای ضرایب جذب مختلف شامل ۰/۱، ۱، ۵ و ۱۰ ترسیم شده است. همچنین برای مقایسه بهتر، کانتور دما برای حالت بدون تشعشع نیز در شکل ۵-الف رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش ضریب جذب گاز داغ، حرارت بیشتری توسط لوله‌ها جذب شده و دمای خروجی کانال کاهش بیشتری دارد که نشان می‌دهد مکانیزم تشعشع تأثیر زیادی در میزان انتقال حرارت در این از مبدل‌ها دارد.

برای درک بهتر از تأثیر خواص تشعشعی گاز بر روی عملکرد مبدل حرارتی، میزان افت دمای گاز داغ به ازای ضرایب جذب مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش ضریب جذب، افت دمای بیشتری در گاز داغ رخ می‌دهد، بطوریکه افت دما با ضریب جذب رابطه مستقیم داشته و بیشترین افت دما برای ضریب جذب $(\sigma=1)$ است. به عبارتی دیگر با افزایش خواص تشعشعی محیط گازی، جذب حرارت بیشتری در گاز صورت گرفته و در نتیجه حرارت بیشتری به لوله‌های سرد منتقل می‌گردد و در نتیجه با افزایش میزان انتقال حرارت در ضرایب جذب بالا، افت دمای بیشتری نیز در جریان گاز اتفاق می‌افتد. در واقع این نمودار نشان می‌دهد که برای داشتن نتایج دقیق‌تر در کاربردهای صنعتی،

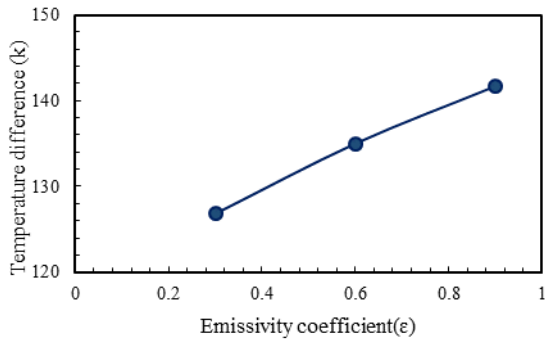


شکل ۵: کانتور دما گاز تشعشعی با ضریب جذب‌های متفاوت

نتایج

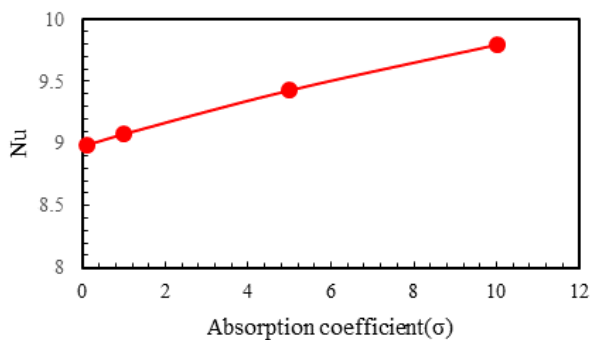
در این مطالعه نتایج حاصل از شبیه‌سازی دوبعدی مبدل حرارتی لوله‌ای جهت بازیافت حرارتی از گازهای احتراقی خروجی از کوره‌ها با دمای بالا ارائه شده است. با توجه به اینکه بسته به نوع احتراق (کامل یا ناقص) و همچنین میزان نسبت هوا به سوخت می‌تواند تأثیر بسزایی در خواص تشعشعی گازهای خروجی از کوره‌ها داشته باشد، لذا تأثیر پارامترهای تشعشعی مختلفی مانند ضرایب جذب مختلف برای گاز داغ در نظر گرفته شده و تأثیر آن در میزان انتقال حرارت و عملکرد مبدل حرارتی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. همچنین ضریب صدور دیوارها نیز یکی از پارامترهای تأثیر گذار بر میزان انتقال حرارت تشعشعی و در نتیجه راندمان مبدل حرارتی است که تأثیر آن نیز بر عملکرد مدل حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در بیان مساله نیز گفته شد، رژیم جریان، آرام با عدد رینولدز ۴۰۰ در نظر گرفته شده و همچنین از بالک‌هایی برای تولید گردابه و افزایش میزان انتقال حرارت استفاده شده است. برای درک بهتر از نحوه جریان سیال در مبدل، نحوه تغییرات خطوط جریان در داخل دامنه محاسباتی در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌گردد، جریان از روی لوله‌ها جدا شده و پشت هر لوله یک گردابه بزرگ ایجاد شده است. همچنین وجود بالک‌ها در میان لوله‌ها باعث شده که بخش بیشتری از جریان گازهای داغ به سمت لوله‌ها هدایت شده و در نتیجه گردابه بزرگتری را ایجاد کند. این گردابه به لوله بعدی منتقل شده و همین روال برای سایر لوله‌ها نیز اتفاق می‌افتد. همچنین در زیر بالک‌ها نیز گردابه‌هایی ایجاد شده که باعث تشدید اغتشاش در جریان گاز بر روی لوله‌های پایین دست می‌گردد. وجود این گردابه‌ها باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه افزایش میزان انتقال حرارت و بهبود عملکرد مبدل حرارتی می‌گردد.

برای آنالیز رفتار حرارتی مبدل حرارتی، در شکل ۵ نحوه توزیع دما در داخل دامنه محاسباتی شامل جریان گازهای داغ، نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌گردد، پس از عبور جریان گازهای داغ از روی لوله‌های سرد، دمای گاز به شدت افت می‌کند. با توجه به اینکه در لوله بالادست جریان (اولین لوله در سمت چپ) گرادیان دمای بسیار بیشتری بین گاز داغ و سطح سرد لوله وجود دارد، بخش زیادی از حرارت توسط این لوله جذب می‌گردد. به همین ترتیب با عبور جریان از روی سایر لوله‌ها نیز دمای گاز کاهش می‌یابد و سپس در انتهای کانال به اتمسفر تخلیه می‌گردد. همچنین همانطور

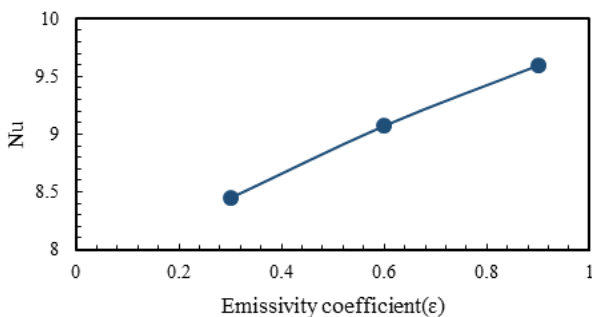


شکل ۸: اختلاف دمای ورودی و خروجی به ازای ضرایب صدور مختلف

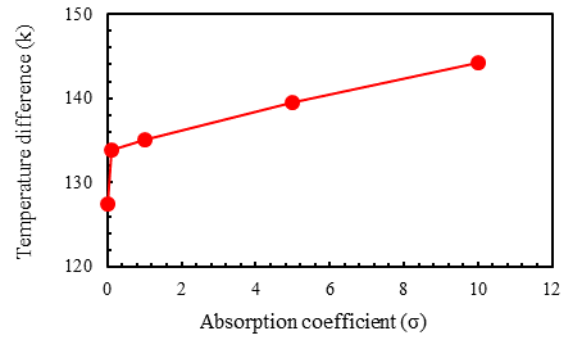
یکی دیگر از پارامترهای مهم در سیستم‌های حرارتی مانند رکوپوراتورها و مبدل‌های حرارتی، عدد ناسلت است. این عدد که بدون بعد است در واقع نشان‌دهنده شیب بی‌بعد دما در سطحی است که سیالی با دمای متفاوت روی آن جریان دارد. هرچه عدد ناسلت بیشتر باشد، گرادیان دما بین سطح و سیال بیشتر بوده و در نتیجه میزان انتقال حرارت بیشتری صورت می‌گیرد. برای بررسی تأثیر پارامترهای تشعشعی گاز داغ بر روی عدد ناسلت، تغییرات آن به ازای ضرایب جذب و همچنین ضرایب صدور مختلف در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل‌ها مشاهده می‌گردد، با افزایش ضریب جذب و ضریب صدور میزان عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود عملکرد مبدل حرارتی است. همچنین همانطور مشاهده می‌گردد، با مقایسه حالت تشعشعی و حالت بدون تشعشع، اختلاف نسبتاً زیادی وجود دارد که نشان‌دهنده اهمیت میزان مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی در این مبدل حرارتی است.



شکل ۹: نمودار عدد ناسلت به ازای ضرایب جذب‌های مختلف



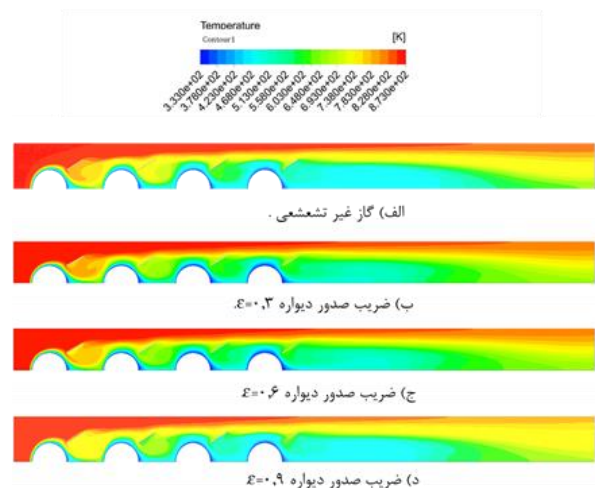
شکل ۱۰: نمودار عدد ناسلت به ازای ضرایب صدورهای مختلف



شکل ۶: اختلاف دمای ورودی و خروجی به ازای ضرایب جذب مختلف

نیاز به آنالیز دقیق ترکیب گازهای احتراقی یا به عبارتی محاسبه دقیق ضریب جذب گاز است. یکی دیگر از نتایجی که از این نمودار می‌توان مشاهده کرد، مقایسه بین گاز تشعشعی و گاز غیر تشعشعی است که مقدار آن با ضریب جذب صفر مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد حدود ۱۱٪ خطا بین دو حالت با ضرایب جذب صفر و ۱۰ وجود دارد که مقدار قابل توجهی است.

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد حرارتی مبدل‌ها با جریان گازهای داغ تشعشعی ضریب صدور سطوح دیواره‌ها است. برای این منظور رفتار حرارتی مبدل حرارتی با رسم کانتورهای دما به ازای سه ضریب صدور مختلف ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین برای مقایسه بهتر نتایج، کانتور دما برای حالت بدون تشعشع نیز در شکل ۷-الف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش ضریب صدور دیواره‌ها، میزان انتقال حرارت افزایش یافته و میانگین دما در مقطع خروجی کانال کاهش می‌یابد. به عبارتی دیگر با افزایش ضریب صدور، عملکرد مبدل بهبود یافته و حرارت بیشتری از گاز داغ جذب می‌گردد. برای نشان دادن میزان حرارت جذب شده بصورت کمی، اختلاف دمای گاز داغ در ورود و خروج کانال در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش ضریب صدور اختلاف دما افزایش یافته که نشان‌دهنده افزایش میزان انتقال حرارت از گاز داغ به لوله‌های سرد حاوی سیال سرد است.



شکل ۷: کانتور دما گاز تشعشعی با ضرایب صدورهای مختلف دیواره‌ها



exchangers". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(14), 3057-3066.

- [5] Suárez, F., Keegan, S. D., Mariani, N. J., & Barreto, G. F. (2019). "A novel one-dimensional model to predict fin efficiency of continuous fin-tube heat exchangers". *Applied Thermal Engineering*, 149, 1192-1202.
- [6] Hatami, M., Ganji, D. D., & Gorji-Bandpy, M. (2015). "Experimental and numerical analysis of the optimized finned-tube heat exchanger for OM314 diesel exhaust exergy recovery". *Energy Conversion and Management*, 97, 26-41.
- [7] Fiebig, M., & Chen, Y. (1999). "Heat transfer enhancement by wing-type longitudinal vortex generators and their application to finned oval tube heat exchanger elements". In *Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers* (pp. 79-105). Springer, Dordrecht.
- [8] Gong, J., Min, C., Qi, C., Wang, E., & Tian, L. (2013). "Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics in wavy fin-and-tube heat exchanger with combined longitudinal vortex generators". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 43, 53-56.
- [9] Gholami, A. A., Wahid, M. A., & Mohammed, H. A. (2014). "Heat transfer enhancement and pressure drop for fin-and-tube compact heat exchangers with wavy rectangular winglet-type vortex generators". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 54, 132-140.
- [10] Ali, S., Habchi, C., Menanteau, S., Lemenand, T., & Harion, J. L. (2017). "Three-dimensional numerical study of heat transfer and mixing enhancement in a circular pipe using self-sustained oscillating flexible vorticity generators". *Chemical Engineering Science*, 162, 152-174.
- [11] Dengqing, Z., Suolong, Z., & Yi, L. (2005). "Study on properties of heat transfer and scaling for induced flow vibration in tube". *CHEMICAL INDUSTRY AND ENGINEERING PROGRESS*, 24(7), 773.
- [12] Han, Z., Xu, Z., & Qu, H. (2020). "Parametric study of the particulate fouling characteristics of vortex generators in a heat exchanger". *Applied Thermal Engineering*, 167, 114735.
- [13] Nia, M. F., Nassab, S. A. G., & Ansari, A. B. (2021). "Numerical simulation of air heating by the recovered waste heat from the radiating exhaust gas flows in a plate heat exchanger". *International Journal of Thermal Sciences*, 161, 106728.
- [14] Yu, M. J., Baek, S. W., & Kang, S. J. (2001). "Modeling of pulverized coal combustion with non-gray gas radiation effects". *Combustion science and technology*, 166(1), 151-174.

فهرست علائم

| | |
|------------------|---------------------------------------|
| A | مساحت، m ² |
| C _p | ظرفیت گرمایی ویژه، J/kg K |
| D | قطر خارجی لوله، m |
| f | ضریب اصطکاک |
| h | ضریب انتقال حرارت، w/m ² K |
| k | رسانش حرارتی، w/m ² K |
| l | طول بالک، m |
| N | تعداد ریف لوله |
| Nu | عدد ناسلت |
| ΔP | اختلاف فشار، Pa |
| P _l | گام طولی لوله، m |
| P _t | گام عرضی لوله، m |
| Re | عدد رینولدز |
| T | دما، K |
| ΔT _{lm} | میانگین اختلاف دمای لگاریتمی |

علائم یونانی

| | |
|---|--------------------------|
| α | زاویه حمله بالک، ° |
| δ | عرض بالک، m |
| ε | ضریب صدور |
| μ | ویسکوزیته، kg/m.s |
| ρ | چگالی، kg/m ³ |
| σ | ضریب جذب |

زیرنویس

| | |
|-----|-------|
| in | ورودی |
| out | خروجی |
| w | دیوار |

مراجع

- [1] Taborek, J., Hewitt, G. F., & Afgan, N. (1983). *Heat exchangers: Theory and practice*. Washington.
- [2] Kraus, A. D., Aziz, A., Welty, J., & Sekulic, D. P. (2001). Extended surface heat transfer. *Appl. Mech. Rev.*, 54(5), B92-B92.
- [3] Hewitt, G. F., Shires, G. L., & Bott, T. (1994). *Process heat transfer*. Begell house.
- [4] Jang, J. Y., Wu, M. C., & Chang, W. J. (1996). "Numerical and experimental studies of three dimensional plate-fin and tube heat

ACEC2021-64228

تبدیل فتوکاتالیستی کربن دی اکسید هوا به سوخت مایع و مواد شیمیایی با ارزش

رضوانه امراللهی بیوکی^۱، مهتاب خاکباز^۲

^۱ استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت، Amrollahir@iust.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک گرایش ماده چگال، دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت، mahtab_khakbaz@physics.iust.ac.ir

چکیده

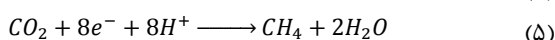
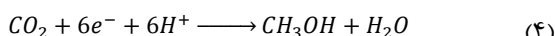
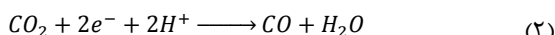
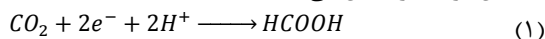
رشد فناوری و جمعیت در هزاره سوم میلادی غیر قابل چشم پوشی است. این موضوع باعث تخریب محیط زیست و افزایش گاز آلاینده کربن دی اکسید شده است. برای کاهش سرعت گرمایش زمین، آلودگی های محیط زیست و حل بحران انرژی، پژوهشگران به دنبال توسعه روش های کاهش فتوکاتالیستی کربن دی اکسید هستند. در این مقاله شرح فرآیند این تبدیل به سوخت مایع و مواد شیمیایی با ارزش و سازوکارهای مختلف آن شرح داده شده است، و سپس به بررسی مطالعاتی که در سطح جهانی و ایران صورت گرفته است پرداخته شده است. در انتها قابلیت ها و مشکلات صنعتی شدن این روش در کشور بررسی شده است.

واژگان کلیدی: تبدیل فتوکاتالیستی، کربن دی اکسید، سوخت مایع و انرژی پاک

مقدمه

مصرف انرژی در چند دهه اخیر از ۲.۸ تراوات در سال به ۱۵ تراوات در سال رسیده است. تصور می شود، به دلیل رشد فناوری و توسعه وسایل الکتریکی تا سال ۲۰۵۰ به ۲۷ تراوات در سال برسد. با وجود پیشرفت هایی که در حوزه های مختلف دانش صورت گرفته است، همچنان سوخت های فسیلی منبع اصلی تولید انرژی هستند. که باعث افزایش گازهای گلخانه ایی مانند دی اکسید کربن شده است. تاثیر گاز کربن دی اکسید بر محیط زیست و گرم شدن کره زمین غیر قابل انکار است. برای حل این مشکل باید به دنبال حذف کربن دی اکسید اضافی موجود در اتمسفر بود. اولین پژوهش برای کاهش فتوکاتالیستی کربن دی اکسید موجود در اتمسفر به وسیله نیمه هادی ها، توسط اینوی و همکاران وی صورت گرفته است. که نتایج پژوهش وی تولید متانول، فرمالدهید، فرمیک اسید و مقدار بسیار اندکی متان با استفاده از نیمه هادی هایی نظیر TiO_2 ، WO_3 ، GaP ، CdS ، ZnO و SiC به عنوان فتوکاتالیست گزارش شده است. تولید متان و آب از گاز کربن دی اکسید یک فرآیند گرماگیر است. انجام این فرآیند، به انرژی و هیدروژن نیاز دارد، که برای تامین

آن ها می توان از انرژی خورشیدی و آب استفاده کرد. کاهش فتوکاتالیستی کربن دی اکسید و تبدیل آن به سوخت و آب به عنوان بهترین راهکار برای حل مشکلات زیست محیطی ناشی از افزایش غلظت گاز کربن دی اکسید در اتمسفر است. روابط (۱) تا (۵) این فرآیند را نشان می دهد [۱]:



به بیان دیگر این فرآیند شامل سه مرحله است:

۱. جذب نور توسط نیمه هادی و تولید زوج الکترون-حفره^۱

۲. جدا شدن زوج الکترون ها و انتقال به سطح نیمه هادی

۳. واکنش سطحی اکسایش H_2O و کاهش CO_2

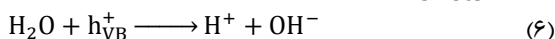
پژوهش های بسیار زیادی جهت افزایش بازدهی و سرعت بخشی به سه مرحله ی گفته شده، صورت گرفته است. کمک کاتالیزورها^۲ که به بهبود این فرآیند کمک می کند، به سه دسته ی تقسیم می گردد: پایه فلزی، پایه غیرفلزی و بیولوژیکی.

انجام این فرآیند توسط دو نوع راکتور پیوسته و ناپیوسته صورت می پذیرد. کنترل واکنش ها در راکتورهای ناپیوسته به دلیل جذب محصولات میانی توسط فتوکاتالیست ها، بسیار دشوار است. در راکتورهای پیوسته این مشکل، حل شده است. میزان تولید فرآورده ها در این نوع از راکتورها نسبت به راکتورهای ناپیوسته بیشتر است. با ایجاد شرایط مناسب، گزینش پذیری فرآورده ها افزایش یافته، و استفاده مجدد از کاتالیزورها امکان پذیر می شود. جذب کربن دی اکسید از نظر زیست محیطی و امکان سنجی فرآیند یاد شده از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله به شرح فرآیند و بررسی مسیرهای مختلف کاهش فتوکاتالیستی CO_2 و

^۱ Electron-hole pairs

^۲ Cocatalysts

نشان‌دهنده‌ی یک حفره در لایه‌ی ظرفیت و e_{CB}^- نشان‌دهنده‌ی یک الکترون در لایه‌ی هدایت است.



محصول اکسیداسیون کاهنده‌های H_2 و $H \cdot$ است. به طور کلی، سه سازوکار برای کاهش کربن دی‌اکسید ارائه شده است (جدول ۱). اولین و مهمترین سازوکار مربوط به آپنو و همکارانش است (سازوکار ۱). سازوکاری برای تولید CO ، CH_4 و CH_3OH بر روی فتوکاتالیست TiO_2 است. TiO_2 خالص تنها CO تولید می‌کند و اضافه کردن Cu باعث افزایش گزینش‌پذیری برای دیگر فراورده‌ها است. در ابتدا کربن دی‌اکسید به رادیکال خود $CO_2 \cdot^-$ که فراورده میانی است، تبدیل شده، و سپس به CO و $C \cdot$ کاهیده می‌گردد [۳].

تلاش بعدی مربوط به سوبراهمانیام و همکارانش است (سازوکار ۲). در این سازوکار CO_2 به $HCCOH$ که منجر به تولید $HCHO$ ، CH_4 و CH_3OH شده است. سازوکار بعدی توسط شکروب و همکارانش ارائه شده است (سازوکار ۳). فراورده میانی دی‌اکسیدکربن که همان رادیکال‌های $CO_2 \cdot^-$ است، نخست به گلیوکسال^۴ و سپس به آلدهیدها تبدیل شده است. فراورده‌های CH_3OH و CH_4 به شکست آلدهیدها وابسته است. مطالعات بعدی نشان داد، نبود آلدهید، سازوکار ۲ و ۳ را دچار مشکل می‌کند. بنابراین، تبدیل کربن دی‌اکسید به رادیکال خود و تولید CO و پس از آن تبدیل رادیکال $C \cdot$ به فراورده‌های مختلف، بهترین سازوکار ارائه شده است.

جدول ۱- سازوکارهای برای واکنش کاهش فتوکاتالیستی CO_2

| سازوکار ۱ | سازوکار ۲ | سازوکار ۳ |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2$ | $2CO_2 + 4H \rightarrow 2HCOOH + O_2$ | $CO_2 + e^- \rightarrow CO_2 \cdot^-$ |
| $2CO \rightarrow 2C \cdot + O_2$ | $HCOOH + 2H \cdot \rightarrow HCOH + H_2O$ | $CO_2 \cdot^- + H \cdot \rightarrow OC \cdot H + OH^-$ |
| $C \cdot + H \cdot \rightarrow CH_3OH$ | $HCOH + 2H \cdot \rightarrow CH_3OH$ | $OC \cdot H + OC \cdot H \rightarrow HOCCOH$ |
| $CH \cdot + H \cdot \rightarrow CH_2 \cdot$ | $CH_3OH + H \cdot \rightarrow CH_3 \cdot$ | $HOCCOH + 4H \cdot \rightarrow CH_3COH$ |
| $CH_2 \cdot + H \cdot \rightarrow CH_3 \cdot$ | $CH_3 \cdot + H \cdot \rightarrow CH_4$ | $CH_3COH + H \cdot \rightarrow CH_3 \cdot + CO$ |
| $CH_3 \cdot + H \cdot \rightarrow CH_4$ | $CH_3 \cdot + CH_3 \cdot \rightarrow C_2H_6$ | $CH_3 \cdot + H \cdot \rightarrow CH_4$ |
| $CH_3 \cdot + OH \cdot \rightarrow CH_3OH$ | | |

سیستم و شرایط عملیاتی واکنش کاهش فتوکاتالیستی CO_2

سیستم فاز آبی

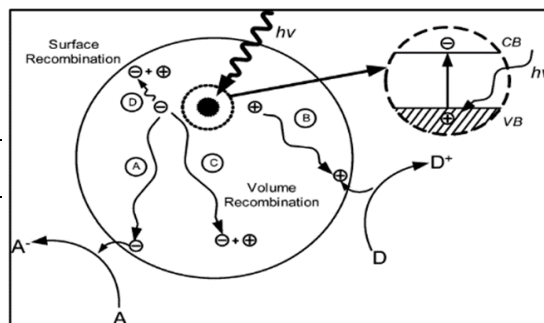
در سیستم‌های فاز آبی تولید CH_3OH گزارش شده است. همچنین فراورده‌هایی، چون $HCOOH$ ، C_2H_5OH ، CH_4 ، CO و یا مخلوطی از آن‌ها به مقدار کمی تولید می‌گردد [۴]. واکنش کاهش فتوکاتالیستی کربن دی‌اکسید به دو عامل اصلی بستگی دارد: جذب کربن دی‌اکسید روی سطح فتوکاتالیست و انتقال الکترون ناشی از تابش به سمت کربن دی‌اکسید است. مشکل عمده سیستم آبی، جذب الکترون‌های فتوژنیزه از نیمه‌هادی برای تولید H_2 است، که

مطالعاتی که سطح بین الملل و ایران در این زمینه شده، پرداخته شده است.

شرح فرآیند واکنش‌های فتوکاتالیستی

فتوکاتالیست‌ها نیمه‌هادی‌هایی هستند که در آن الکترون‌ها از لایه‌ی ظرفیت به لایه‌ی هدایت انتقال می‌یابد، به فاصله‌ی که الکترون‌ها بین دو سطح حرکت می‌کنند، شکاف انرژی گفته می‌شود. اگر سطح فتوکاتالیست در معرض تابش نوری با انرژی بیشتر از شکاف انرژی قرار گیرد، زوج‌های الکترون-حفره تشکیل می‌گردد، که این حفره‌ها و الکترون‌ها، محل شکل‌گیری انواع گوناگون واکنش‌های شیمیایی اکسایش-کاهش است. فتوکاتالیست باید از الکترون و حفره خالی شود، چون ترکیب مجدد آن‌ها با یکدیگر منجر به از دست دادن انرژی‌شان می‌شود. این ترکیب شدن با توجه به نوع نیمه‌هادی در سطح یا درون آن اتفاق می‌افتد، اگر شکاف انرژی به اندازه کافی کوچک باشد، الکترون‌ها و حفره‌ها به آسانی با یکدیگر جفت شده و واکنش یاد شده تنها چند نانو ثانیه پایدار است [۲]. واکنش‌های فتوکاتالیستی طی مراحل زیر صورت می‌گیرد: (شکل ۱)

- ۱- تشکیل زوج الکترون-حفره
- ۲- انتقال الکترون‌ها و حفره‌ها به سطح فتوکاتالیست
- ۳- افزایش جذب سطحی واکنش‌دهنده‌ها بر روی فتوکاتالیست
- ۴- واکنش کاهش و تولید فراورده‌های جدید
- ۵- دفع فراورده‌های تولید شده، از سطح فتوکاتالیست



شکل ۱- شماتیک فرآیندهای فتوکاتالیستی

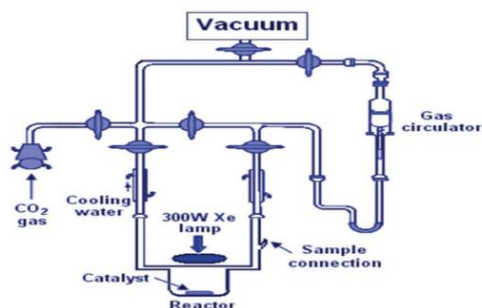
سازوکار^۲ کاهش فتوکاتالیستی دی‌کسیدکربن CO_2

کاهش فتوکاتالیستی کربن دی‌اکسید یک فرآیند اکسایش-کاهش است، که شامل اکسایش کاهنده‌ها و کاهش کربن دی‌اکسید است. این واکنش با شکستن پیوند $C=O=C$ و ایجاد پیوندهای جدید کربن با دیگر عناصر به صورت دسته‌ای از واکنش‌ها است. تجمع الکترون‌ها در سطح فتوکاتالیست، امکان تولید فراورده‌های جدید را فراهم می‌کند. H_2O به عنوان کاهنده، در اولین گام برای فرآیند اکسایش باید به H^+ و OH^- شکسته شود، سپس H^+ به رادیکال خود $H \cdot$ تبدیل گردد (فرآیند ۶ تا ۸). در این واکنش‌ها $h\nu_{VB}^+$

^۴ Glyoxal

^۲ Mechanism

شده است. با ایجاد محیط خلأ در سیستم، گاز CO₂ به راکتور وارد می‌شود. برای عملکرد بهتر مقداری آب دیونیزه به راکتور تزریق می‌گردد. مزیت این سیستم راه‌اندازی آسان در آزمایشگاه است، و از معایب آن می‌توان به عدم تشخیص نوع گاز خروجی از سیستم اشاره کرد.

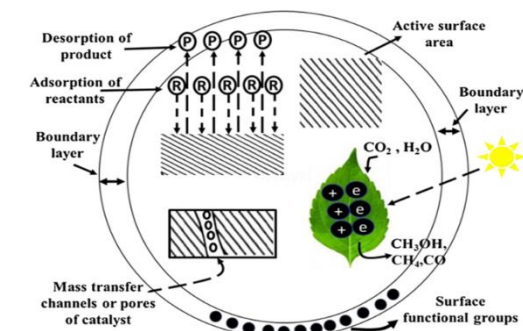


شکل ۳- سیستم گازی کاهش فتوکاتالیستی CO₂ با راکتور بسته

انتقال جرم واکنش کاهش فتوکاتالیستی دی اکسید کربن

انتقال جرم واکنش‌دهنده از روی سطح فتوکاتالیست، در میزان بازدهی و عملکرد سیستم، کاهش CO₂ نقش دارد. انتقال جرم در سیستم کاهش CO₂ در فاز مایع، شامل مراحل زیر است [۵]:

۱. جذب CO₂ در سطح مایع
 ۲. نفوذ گاز به درون مایع
 ۳. جذب روی سطح فتوکاتالیست
 ۴. نفوذ داخلی در حفره‌های فتوکاتالیست
 ۵. واکنش‌ها و دفع فرآورده‌های جانبی و میانی
- انتقال جرم فاز گازی (به جز مراحل ۱ و ۲) مشابه فاز مایع است. فاز مایع مقاومت بیشتری در برابر انتقال جرم نسبت به سیستم فاز گازی از خود نشان می‌دهد. مقاومت‌های انتقال جرم در فاز مایع شامل: سطحی، خود مایع، لایه‌های ایجاد شده توسط واکنش‌های فتوکاتالیستی، حفره‌های ایجاد شده در فتوکاتالیست و ذرات جدا شده است، و مقاومت‌های انتقال جرم در فاز گازی نیز عبارت است از: جذب سطحی در واکنش‌دهنده‌ها، نفوذ به حفره‌های ایجاد شده در فتوکاتالیست و دفع فرآورده‌ها است. (شکل ۴ نمایشی ساده در فرایند انتقال جرم نشان می‌دهد).



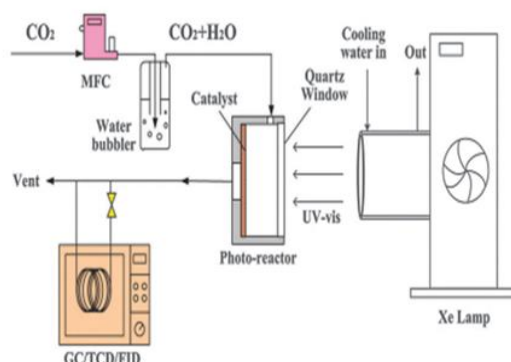
شکل ۴- طرح‌واره انتقال جرم فرآیند کاهش فتوکاتالیستی CO₂

محصولات و گزینش پذیری فرآیند

در آن آب و دی‌کسیدکربن همزمان وارد عمل می‌شود و در ترکیب شدن از آن سبقت می‌گیرد، این موضوع باعث کاهش فعالیت سیستم شده است. آرای و همکارانش برای حل این مشکل، فتوکاتد ترکیبی پلیمری InP-Ru-Complex را با SrTiO₃ کاهش‌یافته ترکیب کردند، و به یک سیستم کاهش CO₂ به HCOOH دست یافتند. این سیستم بازدهی ۰.۱۴٪ در تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی داراست، سیستم نسبت به زمانی که از نانوذرات TiO₂ تحت نور مصنوعی (۰.۳٪) استفاده می‌گردید، حدود ۳۶۷٪ بهبود یافته است.

سیستم فاز گازی

در سیستم‌های فاز گازی CH₄ و فرآورده‌های دیگر هم‌چون HCOOH, C₂H₅OH, CO, CH₃OH و یا مخلوطی از آن‌ها تولید شده است. در سیستم فاز گازی غلظت گازهای CO₂ / H₂O ریزساختارهای فتوکاتالیست‌ها نقش بسیار مهمی دارند. جذب H₂O روی کاتالیست بر فعالیت سیستم گازی تأثیر گذار است، زیرا باعث جذب ریزساختارها بر روی ملکول‌های CO₂ و H₂O شده است. که این امر منجر به شکل‌گیری فرآیندهای مختلف فتوکاتالیستی و تولید فرآورده‌ها جدید شده است. دو سیستم برای واکنش کاهش فتوکاتالیستی CO₂ در فاز گاز وجود دارد: راکتور پیوسته و راکتور بسته. در راکتور پیوسته (شکل ۲) گاز CO₂ فشرده شده است، و با اسپارجر گازی به محیط آبی نفوذ کرده است، تا مخلوطی از بخار CO₂ و H₂O، تولید گردد. گاز CO₂/H₂O وارد راکتور پیوسته استوانه‌ای می‌شود. پشم شیشه در راکتور به عنوان پایه‌ای برای فیلتر فیبر شیشه‌ای که با یک فیلم ضخیم فتوکاتالیست پر شده است، قرار گرفته است. پشم شیشه با آب دیونیزه مرطوب می‌گردد، تا میزان بخار H₂O در راکتور پایدار بماند. غلظت گازهای خروجی (CO, CH₄ و CO₂) به طور مداوم با استفاده از کروماتوگرافی گازی (GC) اندازه‌گیری می‌شود. از مزایای این سیستم می‌توان به تشخیص فرآورده‌ها، تنظیم شرایط واکنش (به خصوص نسبت CO₂/H₂O) و جذب یکنواخت واکنش‌دهنده‌ها بر روی فتوکاتالیست‌ها اشاره کرد.



شماره ۲- سیستم گازی کاهش فتوکاتالیستی CO₂ با راکتور پیوسته

سیستم دوم یک راکتور بسته است (شکل ۳). در این سیستم، فتوکاتالیست‌ها به صورت یکنواخت روی راکتور شیشه‌ای پخش

فرایندهای هیدروژنه کردن و اکسیداسیون است. از بین مسیرهای گوناگون برای تبدیل CO_2 به CH_4 دو مسیر، فرمالدهید و کربن مؤثرتر و مهم‌تر است.

مسیر فرمالدهید

تبدیل CO_2 به CH_4 در مسیر فرمالدهید، فرآورده‌های میانی زیادی تولید می‌شود. این فرآورده‌ها ۲، ۴، ۶ و ۸ الکترونی هستند. خلاصه فرآیند فرمالدهید به شکل زیر است:

$\text{CO}_2 \rightarrow \text{HCCOH} \rightarrow \text{H}_2\text{CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_4$

دو ویژگی مهم در مسیر فرمالدهید عبارت است از: ۱. فرآورده میانی H_2CO و CH_3OH در این مسیر تولید می‌شود، که تصور بر جانبی بودن فرآورده‌هاست. تفاوت فرآورده‌های جانبی با میانی به نحوه اتصال H_2CO و CH_3OH بر روی فتوکاتالیست است. پیوند ضعیف H_2CO و CH_3OH سرعت دفع آن را بیشتر کرده است، و در نتیجه CH_4 به مقدار کم تولید می‌گردد در این حالت H_2CO و CH_3OH فرآورده جانبی است. و زمانی فرآورده میانی است که، پیوند بین اتمی قوی و آزادسازی H_2CO و CH_3OH از سطح فتوکاتالیست مشکل باشد. چرخه تولید CH_4 با استفاده از هیدروژنه کردن و اکسیداسیون تکرار می‌گردد. ۲. همزمانی اکسیداسیون (شکستن C-O) هیدروژنه کردن (ایجاد C-H) است.

مسیر کربن

مراحل تبدیل CO_2 به CH_4 در این مسیر ابتدا اکسیداسیون و بعد هیدروژنه کردن است. چرخه مسیر کربن به شکل زیر است:

$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{C} \rightarrow \text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}/\text{CH}_4$

دو مسئله مهم در مسیر کربن وجود دارد: ۱. با توجه به شیوه اتصال فتوکاتالیست، CO یک فرآورده میانی یا جانبی است. ۲. آخرین مراحل تبدیل CH_4 فرایندی رقابتی است، به این منظور که: $\text{CH}_3 \cdot$ با رادیکال هیدروکسیل واکنش می‌دهد تا به $\text{OH} \cdot$ تبدیل گردد، و سپس CH_3OH تولید شود، از طرفی هم با $\text{H} \cdot$ برای تولید CH_4 ترکیب می‌شود.

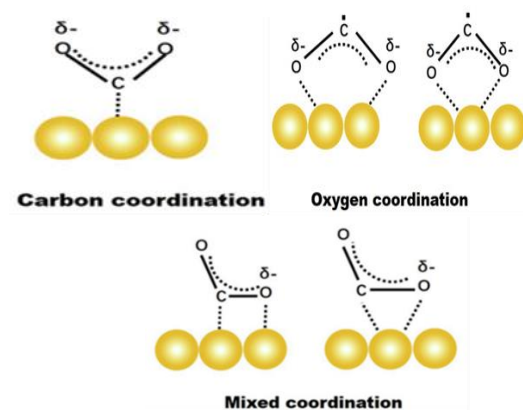
گزینش پذیری فرآورده‌ها

برای درک سازوکار مسیرهای واکنش محاسبه گزینش پذیری مهم است. محاسبه گزینش پذیری اندازه‌گیری دقیق ترکیب و فرآورده‌ها است. سیستم فاز گازی به کروماتوگرافی گازی (GC) مجهز است، با آشکارساز هدایت حرارتی (TCD)، آشکارساز یونیزاسیون شعله هیدروژن (FID) و به کمک روش‌های استاندارد خارجی یا داخلی، گزینش پذیری ترکیبات و فرآورده‌ها قابل اندازه‌گیری است [۹]. الکل فرآورده‌ای است، که در شرایط اتاق همانند فاز مایع رفتار می‌کند، برای اندازه‌گیری آن با استفاده از کروماتوگرافی گازی با بهره‌گیری از گاز کاتیونی گرم‌کننده درون آن و یا تزریق مستقیم مایع به درون دستگاه قابل تشخیص است. با طیف‌سنجی جرمی می‌توان یک تجزیه و تحلیل کیفی از فرآورده‌ها داشت. طیف‌سنجی جرمی ایزوتوپ‌های C و H در CO_2 و H_2O که به‌عنوان فرآورده واکنش

همان‌طور که گفته شد، واکنش کاهش فتوکاتالیستی دی‌اکسیدکربن، یک واکنش چند مرحله‌ای و پیچیده است. مهم‌ترین عاملی که بر روی گزینش‌پذیری فرآورده نقش دارد، شدت تابش نور فرودی بر روی فتوکاتالیست نیمه‌هادی است. شدت نور فرودی بر تولید الکترون-حفره‌ها تاثیر گذار است، که باعث تغییر انرژی جنبشی فرآیند واکنش، کاهش کربن دی‌اکسید و گزینش‌پذیری فرآورده‌ها می‌شود. تعداد الکترون‌های جدا شده از سطح فتوکاتالیست نیمه‌هادی به لایه هدایت آن وابسته است. اگر شدت نور تابشی به اندازه کافی مناسب باشد، باعث تفکیک الکترون‌ها و حفره‌ها و در ادامه باعث تراکم الکترون بر روی سطح می‌گردد، که به واکنش کاهش و گزینش‌پذیری فرآورده‌ها سرعت می‌بخشد. دیگر عواملی که بر گزینش‌پذیری فرآورده تاثیر گذار است می‌توان به سطح ویژه کاتالیزور اشاره کرد [۶]. برای تسریع واکنش کاهش می‌توان از کمک کاتالیزورها که سطح ویژه فعال متفاوتی دارا هستند، استفاده کرد تا گزینش‌پذیری واکنش کاهش فتوکاتالیستی دی‌اکسیدکربن را افزایش دهند. علاوه بر موارد ذکر شده، ویژگی‌های جذب و دفع واکنش‌دهنده‌ها و واسطه‌ها از دیگر عوامل گزینش‌پذیری فرآورده در واکنش کاهش فتوکاتالیستی دی‌اکسیدکربن است [۷].

تاثیر نوع جذب بر مسیر واکنش

واکنش، کاهش فتوکاتالیستی کربن دی‌اکسید، با جذب کربن دی‌اکسید بر روی سطح فتوکاتالیست آغاز می‌گردد. جذب کربن دی‌اکسید به جهت‌گیری کربن و اکسیژن و یا جهت‌گیری ترکیبی این دو با، اتم‌های سطح فتوکاتالیست وابسته است (شکل ۵ هر سه جهت‌گیری را نمایش داده است). واکنش کاهش کربن دی‌اکسید فرآورده میانی $\text{CO}_2^{\delta-}$ تولید می‌کند. اتصال‌های کوتاهی که $\text{CO}_2^{\delta-}$ با اکسیژن و کربن ایجاد کرده است باعث تغییر جذب و در نتیجه در گزینش‌پذیری فرآورده تاثیر گذار است [۸].



شکل ۵- ساختارهای مختلف CO_2 در جذب روی سطح فتوکاتالیست

مسیرهای تبدیل CO_2 به CH_4

گزینش‌پذیری و ایجاد فرایندهای جدید به ویژگی‌های سه عنصر کربن، اکسیژن و هیدروژن در فتوکاتالیست‌ها وابسته است. جذب و دفع واکنش‌دهنده‌ها و واسطه‌ها باعث سرعت بخشیدن به

مرئی هستند تا موانع استفاده از انرژی خورشیدی و حل معضلات زیست‌محیطی برطرف شود.

مطالعات انجام شده در ایران

در ایران چند سالی است با توجه به اهمیت انرژی های پاک و توجه به کاهش میزان آلودگی هوا پژوهش هایی در این زمینه آغاز شده است. به طور مثال پژوهشی توسط ترابی و همکارانش در دانشگاه رازی کرمانشاه انجام شده است [۱۴]. آن‌ها از نانوذرات WO_3 که با یون‌های Fe لایه‌نشانی شده است، برای تبدیل فتوکاتالیستی CO_2 و CH_4 تحت تابش نور مرئی استفاده کردند. در این پژوهش فتوکاتالیست‌ها با XRD, FESEM, EDX, Raman, UV-vis و PL مورد بررسی قرار گرفته است. با طیف‌سنجی‌های XRD و Raman ساختار مونوکلینیکی نانوذرات WO_3 و ترکیب یون‌های Fe در شبکه WO_3 مشاهده شده است. الگوهای رامان بدست آمده از نمونه‌های WO_3 که با آهن با لایه‌نشانی شده است، که نشان دهنده جایگزینی جزئی W با یون‌های Fe و اشکال ساختاری بلورهای WO_3 پس از لایه‌نشانی است. سیگنال‌های PL ضبط شده نشان دهنده این است که با لایه‌نشانی WO_3 با یون‌های Fe، ترکیب دارای حامل‌های بار را مهار می‌کند. به این ترتیب بهترین کاهش فتوکاتالیستی CO_2 توسط WO_3 (۳۸,۷٪) گزارش شده است که دارای ۴/۱۸٪ Fe تحت تابش نور مرئی است. همچنین فرآورده‌های جانبی مانند: اتان، فرمات و استات به عنوان اصلی‌ترین فرآورده‌های کاهش CO_2 تولید شده است.

پژوهش بعدی توسط صادقی و همکارانش بر روی فلزات آلی با ساختار پیچیده پورفیرین (M/PMOF) برای تبدیل فتوکاتالیستی CO_2 با استفاده از تابش اشعه UV-Vis صورت گرفته است [۱۵]. برای سنتز M/PMOF از فلزات Zn, Al و Co استفاده شده است. هر سه فتوکاتالیست‌های توسط XRD, BET, SEM, EDX, FTIR، و UV-Vis بررسی شده است. نتایج Al / PMOF نشان دهنده کارآمدی مناسب (۴,۳٪) برای کاهش فتوکاتالیستی CO_2 است. جدول ۲ نشان دهنده فعالیت‌هایی که در ایران انجام شده است.

جدول ۲- پژوهش‌هایی که در ایران برای کاهش فتوکاتالیستی CO_2 در ایران

| مرجع | بازده (%) | فرآورده‌های شناسایی شده | فتوکاتالیست استفاده شده | دانشگاه |
|------|-----------|-----------------------------|-----------------------------------------------|---------|
| [۱۶] | ۷-۱۵ | - | TiO_2 سولفات یا همراه با یون‌های فلزی | رازی |
| [۱۷] | ۲۲ | $CO-C_2H_6O-H_2O$ | $BaTiO_3 \cdot Fe_2O_3$ | رازی |
| [۱۸] | ۲۱ | $CO-CH_4-HCOOH-HCHO-CH_3OH$ | $BiFeO_3-ZnO$ | رازی |

است، بررسی می‌شود تا منبع تولید آن مشخص گردد. استفاده هم‌زمان از کروماتوگرافی گازی و طیف‌سنجی جرمی از نظر کیفی و کمی امکان بررسی فرآورده‌های مختلف را فراهم کرده است.

مرور مطالعات انجام شده در زمینه کاهش فتوکاتالیستی CO_2

مطالعات بین‌المللی

اولین و مهمترین گام برای فرآیند کاهش CO_2 انتخاب فتوکاتالیست مناسب است. با انتخاب مناسب فتوکاتالیست دید مناسبی از سازوکار فرآیند فراهم می‌شود. فتوکاتالیست‌ها براساس ساختارشان به دو دسته همگن و ناهمگن تقسیم می‌گردد [۱۰]. اساسی‌ترین پژوهش در این زمینه توسط لهن و همکارانش صورت گرفته است. وی با بررسی ساختار Re(I) در کاهش گزینش‌پذیر CO_2 را به CO پدراخته است، این پژوهش سر منشأ استفاده از ساختارهای پیچیده فلزی برای کاهش CO_2 و اکسیداسیون H_2O است. زمانی که از فتوکاتالیست همگنی مانند کمپلکس‌های Re در حضور الکترون دهنده مانند تری‌اتانول آمین استفاده گردید، فرآیند کاهش CO_2 به CO به شکل بهتری انجام شده است. فرآیند کاهش CO_2 و اکسیداسیون H_2O با یک کاتالیزور فلزی به صورت هم‌زمان بسیار مشکل است.

اکسیداسیون معکوس کاهش CO_2 و کاهش معکوس اکسیداسیون H_2O باعث ادامه چرخه فتوکاتالیستی می‌گردد. برای انجام این فرآیند نیاز به حل چند مشکل است، که مهم‌ترین آن جلوگیری انتقال بی‌مورد الکترون بین کاتالیزورها و اکسیداسیون است. مشکل دیگر طول عمر کوتاه فرآورده‌های کاهش‌یافته دارای یک الکترون است، که برانگیختگی در اثر شدت تابش نور در حضور O_2 حاصل فرآیند اکسیداسیون H_2O است.

در پژوهش دیگری که توسط فوجیشیما، هوندا و همکارانش انجام شده است. کاهش فتوکاتالیستی CO_2 ترکیبات آلی، مانند HCOOH, CH_3OH و HCHO، با استفاده از فتوکاتالیست‌های نیمه‌هادی چون، TiO_2 , ZnO, CdS, SiC, WO_3 ، و نیمه هادی ناهمگنی مانند، اکسیدهای فلزی، اکسی‌نیتريد‌ها، سولفیدها و فسفیدها، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. فتوکاتالیست نیمه‌هادی ناهمگن مناسب دارای سطح ویژه بالا، جذب نور، تفکیک الکترون کارآمد و طولانی و گزینش‌پذیری فرآورده است. پرکاربردترین فتوکاتالیست نیمه هادی TiO_2 است، مزایای آن ارزان و غیر سمی بودن و همچنین پایداری نوری و الکترونی است، اما به دلیل ترکیب مجدد الکترون‌ها و حفره‌ها در حین فرآیند امکان استفاده از آن محدود شده است [۱۲]. از طرفی به دلیل گاف انرژی زیاد، تنها ناحیه UV نور خورشید را در جذب می‌کند این موضوع باعث می‌گردد در کنار فتوکاتالیست‌هایی مانند CdS و Fe_2O_3 ، که گاف انرژی کمی دارند، پایداری نباشد [۱۳]. پژوهشگران برای غلبه بر این مشکلات به دنبال فتوکاتالیست‌هایی کارآمد و فعال در نور



منابع

- [1]. Nahar, S., et al., Advances in photocatalytic CO₂ reduction with water: a review. *Materials*, 2017. 10(6): p. 629.
- [2]. Cao, S., et al., Enhanced photochemical CO₂ reduction in the gas phase by graphdiyne. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020. 8(16): p. 7671-7676.
- [3]. Dong, L., et al., Photocatalytic CO₂ reduction over postcalcinated atomically thin TiO₂ nanosheets: Residual carbon removal and structure transformation. *Journal of CO₂ Utilization*, 2020. 41: p. 101262.
- [4]. Mao, J., K. Li, and T. Peng, Recent advances in the photocatalytic CO₂ reduction over semiconductors. *Catalysis Science & Technology*, 2013. 3(10): p. 2481-2498.
- [5]. Shehzad, N., et al., A critical review on TiO₂ based photocatalytic CO₂ reduction system: Strategies to improve efficiency. *Journal of CO₂ Utilization*, 2018. 26: p. 98-122.
- [6]. Aggarwal, M., et al., Photocatalytic conversion of CO₂ into valuable products using emerging two-dimensional graphene-based nanomaterials: A step towards sustainability. *Chemical Engineering Journal*, 20 :p. 131-140.
- [7]. Fu, J., et al., Product selectivity of photocatalytic CO₂ reduction reactions. *Materials Today*, 2020. 32: p. 222-243.
- [8]. Chang, X., T. Wang, and J. Gong, CO₂ photo-reduction: insights into CO₂ activation and reaction on surfaces of photocatalysts. *Energy & Environmental Science*, 2016. 9(7): p. 2177-2196.
- [9]. Mgolombane, M., et al., Influence of surface modification of zinc oxide-based nanomaterials on the photocatalytic reduction of carbon dioxide. *Materials Today Chemistry*, 2021. 20: p. 1-11.
- [10]. Luévano-Hipólito, E. and L.M. Torres-Martínez, Earth-abundant ZnS/ZnO/CuFeS₂ films for air purification and solar fuels production. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021. 134: p. 106029.
- [11]. Acharya, R. and K. Parida, A review on TiO₂/g-C₃N₄ visible light responsive photocatalysts for sustainable energy generation and environmental remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020. 8(4): p. 103896.
- [12]. Ku, Y., P.-C. Lee, and G.K. Luong, Photocatalytic reduction of gaseous carbon dioxide over NiO/TiO₂ under UV light illumination. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021. 125: p. 291-296.
- [13]. Xiao, J., et al., Insight into the significantly enhanced photocatalytic CO₂

| | | | | |
|------|--------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------|
| [۱۹] | ۹۰.۱ (چهار بار بازیابی) | متانول | Fe ₃ O ₄ @N-C/Cu ₂ O | شهید بهشتی |
| [۲۰] | - | CO-CH ₄ | CdS-TiO ₂ | تهران |
| [۲۱] | ۱۰۰ | - | MWCNT-TiO ₂ | الزهره |
| [۲۲] | ۱۱.۳ μmol/g _{cat.} ·h | CH ₃ OH-CH ₄ -HCOOH-HCHO | g-C ₃ N ₄ @TiO ₂ | تهران |

نتیجه گیری

واکنش و گزینش‌پذیری CO₂ با توجه به رشد پژوهش و توسعه که در این زمینه شده است، همچنان پایین است. نتایج نشان دهنده آن است که هنوز برآوردهای اقتصادی جهت استفاده از سوخت‌های شیمیایی حاصل از کاهش CO₂ صورت نگرفته است.

استفاده از انرژی خورشیدی برای کاهش گاز CO₂ در اتمسفر خیلی کم بوده است. نوکرا و همکارانش با ترکیب یک سلول فتوولتائیک با کاتالیزورهای غیر آلی در خاک و باکتری *Ralstonia eutropha* به یک فرآیند فتوسنتز مصنوعی برای کنترل کربن محیط‌زیست و تولید سوخت‌های مایع با بازده حدود ۱۰٪ دست پیدا کردند. گراتزل و همکارانش با لایه‌نشانی SnO₂ بر روی نانوسیم‌های CuO به عنوان یک الکتروکاتالیست بازده تبدیل انرژی خورشیدی به CO را به ۱۳.۴٪ رسانده است. دو پژوهش نشان‌دهنده توانایی رشد فناوری کاهش CO₂ است.

برای بهبود عملکرد کاهش CO₂ دو راهکار وجود دارد. یکی یافتن ترکیبات و ساختارهای جدید و دیگری درک بهتر مسیر و سازوکارها واکنش است. با محاسبات تئوری به بررسی ساختار مواد جدید و مقایسه لایه‌های ظرفیت و هدایت به شناخت کاتالیزورهای جدید کمک می‌کند. همچنین توسعه و بررسی سازوکار واکنش به در طراحی کاتالیزورهای کاهش CO₂ کمک خواهد کرد.

متأسفانه اطلاعات کاملی از نحوه جذب و دفع CO₂ در دست نیست. استفاده از تجهیزاتی مانند میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، طیفسنجی جذب اشعه X، رزونانس چرخش الکترون و طیفسنجی فلورسانس این امکان را فراهم می‌کند، تا اطلاعات دقیقی در مورد ساختار کاتالیزورها بدست آید که به کشف و یا ساخت فتوکاتالیست‌های جدید کمک خواهد کرد.

در نتیجه می‌توان گفت اجرای این طرح در کشور در حال حاضر از نظر صنعتی مقرون به صرفه نخواهد بود، اما بهره‌برداری از آن در آزمایشگاه‌ها دور از انتظار نیست. البته راه‌اندازی تجهیزات آزمایشگاهی این فرآیند هزینه‌بر است، که شامل دستگاه‌هایی نظیر GC یا FTIR است. در ایران پژوهش‌هایی موفقیت‌آمیزی در این زمینه صورت گرفته است.



- [18]. Karamian, E. and S. Sharifnia, Enhanced visible light photocatalytic activity of BiFeO₃-ZnO pn heterojunction for CO₂ reduction. *Materials Science and Engineering: B*, 2018. 238: p. 142-148.
- [19]. Movahed, S.K., et al., Visible light assisted photocatalytic reduction of CO₂ to methanol using Fe₃O₄@ NC/Cu₂O nanostructure photocatalyst. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2020. 401: p. 112763.
- [20]. Beigi, A.A., S. Fatemi, and Z. Salehi, Synthesis of nanocomposite CdS/TiO₂ and investigation of its photocatalytic activity for CO₂ reduction to CO and CH₄ under visible light irradiation. *Journal of CO₂ Utilization*, 2014. 7: p. 23-29.
- [21]. Darvish, S.M., A.M. Ali, and S.R. Sani, Designed air purifier reactor for photocatalytic degradation of CO₂ and NO₂ gases using MWCNT/TiO₂ thin films under visible light irradiation. *Materials Chemistry and Physics*, 2020. 248: p. 122872.
- [22]. Dehkordi, A.B., et al., Preparation of hierarchical g-C₃N₄@ TiO₂ hollow spheres for enhanced visible-light induced catalytic CO₂ reduction. *Solar Energy*, 2020. 205: p. 465-473.
- reduction performance of Pt/MnO_x dual cocatalysts on sea-urchin-like anatase TiO₂ microspheres. *Chemical Engineering Journal*, 2021. 425: p. 131627.
- [14]. Abedini, E. and S. Sharifnia, Efficient photocatalytic CO₂ reduction by visible-light responsive Fe-doped WO₃ nanostructures. *Indian Journal of Chemical Technology (IJCT)*, 2020. 27(2): p. 126-134.
- [15]. Sadeghi, N., S. Sharifnia, and D. Trong-On, Optimization and modeling of CO₂ photoconversion using a response surface methodology with porphyrin-based metal organic framework. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2018. 125(1): p. 411-431.
- [16]. Ayeini, T., A. Shokrollahi, and S. Sharifnia, The synergetic effect of grafted hetero bimetallic ions/sulfated-TiO₂ on the conversion of greenhouse gases under UV-Vis irradiation. *Materials Research Bulletin*, 2020. 127: p. 110852.
- [17]. Zangeneh, N.P., S. Sharifnia, and E. Karamian, Modification of photocatalytic property of BaTiO₃ perovskite structure by Fe₂O₃ nanoparticles for CO₂ reduction in gas phase. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020. 27(6): p. 5912-5921.

ACEC2021-64488

تأثیر حضور منابع تولید پراکنده بر کیفیت توان شبکه‌ی توزیع جنوب استان کرمان

سعید هاشمی نژاد^۱، احمد کریمی افشار^۲

استادیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، s.hasheminejad@kgut.ac.ir،
آکارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، akf845@yahoo.com

چکیده

امروزه، توجه به تولید انرژی توسط نیروگاه‌های تولید پراکنده به طور روزافزونی گسترش یافته است. حضور این منابع پیک مصرف را در فصول گرم سال کاهش می‌دهد، تلفات را کاهش می‌دهد و پروفیل ولتاژ شبکه را بهبود می‌بخشد. با وجود مزایای ذکر شده، تاکنون در شرکت‌های توزیع استان کرمان، تأثیر منابع تولید پراکنده بر کیفیت توان شبکه بررسی نشده است. در این مقاله، تأثیر حضور منابع تولید پراکنده در طیف هارمونیک سیگنال‌های شبکه توزیع و نیز حالات گذرای ناشی از کلیدزنی این منابع به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. شبکه‌ی مورد بررسی، شبکه توزیع منطقه‌ی دهکدهان واقع در شهرستان کهنوچ در استان کرمان است. سیگنال‌های شبکه در شرایط مختلف با استفاده از دستگاه آنالیز کیفیت توان MAVOWATT70 در نقطه‌ی مورد نظر، در شبکه‌ی توزیع شهرستان دهکدهان ثبت و از تبدیل S برای تحلیل زمانی و فرکانسی سیگنال‌ها در نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تولیدات پراکنده، کیفیت توان، تبدیل S، طیف هارمونیک، دستگاه آنالیز کیفیت توان MAVOWATT70

مقدمه

امروزه نیاز به سیستم‌های انرژی الکتریکی انعطاف‌پذیرتر، ذخیره‌سازی انرژی و اثرات محیطی، انگیزه‌ی کافی را برای استفاده و توسعه تولیدات پراکنده را فراهم کرده است. پیش‌بینی می‌شود که در آینده این تجهیزات، نقش اساسی را در سیستم‌های قدرت خواهند داشت. نصب DG تلفات سیستم قدرت را کاهش می‌دهد و لزوم سرمایه‌گذاری در شبکه‌ی قدرت را به تأخیر می‌اندازد. از سوی دیگر، DG ممکن است بر روی کیفیت توان سیستم توزیع تأثیر بگذارد. در واقع، DG می‌تواند باعث بروز اغتشاشاتی شود که سطح کیفیت توان شبکه را کاهش دهد. از جمله‌ی این اغتشاشات، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- گذراها، به دلیل تغییرات بزرگ جریان هنگام قطع و یا وصل کردن ژنراتورها

- نوسانات ولتاژ، به دلیل تغییرات تناوبی در قدرت خروجی ژنراتورها
- تغییرات بلندمدت ولتاژ، به دلیل تغییرات در قدرت اکتیو و راکتیو ژنراتورها
- عدم تعادل ولتاژ به دلیل وجود تولیدکننده‌های تک‌فاز

تاکنون تحقیقات متعددی در مورد تأثیرات منابع تولید پراکنده بر روی کیفیت توان شبکه انجام شده است. در [۱] کیفیت ولتاژ سیستم‌های PV و خصوصیات عملکردی آنها آنالیز شده است. مطالعه انجام شده بر روی یک شبکه واقعی دارای PV در دانشگاه کوئینزلند صورت گرفته است. در [۲] اثر عوامل طبیعی مانند وضعیت جوی در تولید منابع تولید پراکنده و پارامترهای کیفیت توان از طریق مدلسازی تابش و درجه حرارت واقعی بر سطح PV و جمع‌آوری اطلاعات آن در روز ۲۲ می ۲۰۱۵ بررسی شده است. در [۳] بر اساس بهینه‌سازی در حوزه فرکانس گسترده، یک روش فراگیر برای طراحی نوع خاصی از اینورتر ولتاژ PWM همراه با فیلتر LCL پیشنهاد شده است تا محدودیت‌های کیفیت توان هم‌هنگام کارکرد DG در نظر گرفته شود.

مقاله‌ی نیز به بررسی اغتشاشات کیفیت توان پرداخته‌اند. در [۴] به طور کلی مسئله‌ی کمبود ولتاژ در شبکه توزیع به کمک منطق فازی مورد بررسی قرار گرفته است، به این صورت که دلیل وقوع این اغتشاش را پیدا می‌کند. در [۵] از فلیکر ولتاژ به عنوان یکی از اغتشاشات ایجاد شده توسط سلول‌های خورشیدی PV یاد شده است. در این مقاله روشی برای تخمین فلیکر ارائه شده است که از تبدیل موجک برای استخراج اطلاعات از سیگنال حاوی فلیکر استفاده می‌شود. اغتشاشات کیفیت توان در یک ریزشبکه بر پایه DG در [۶] مورد بحث قرار گرفته است. در این مرجع، از فیلتر گرادبان ساختاری چندحالتی و نیز تبدیل هیلبرت زمان کوتاه برای شناسایی و دسته‌بندی اغتشاشات کیفیت توان برای شبکه‌ی مذکور استفاده شده است. در [۷] روشی بر اساس منطق فازی همراه با روش همبستگی عرضی ارائه شده است تا در مجموع ۱۷ اغتشاش را مورد دسته‌بندی قرار دهد. ۸ نوع از این اغتشاشات منفرد و بقیه

$$w(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} \cdot e^{-j2\pi ft} \quad (3)$$

باید توجه نمود که در رابطه (۲) پارامتر d معکوس فرکانس (f) است. در نتیجه به طور صریح تبدیل S را می‌توان به صورت معادله (۴) تعریف نمود.

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (4)$$

تبدیل S به عنوان یک عملگر مطابق معادله (۵) روی طیف فوریه^۲ $h(f)$ هم نوشته می‌شود.

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha, f) e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} \cdot e^{j2\pi \alpha t} d\alpha \quad (5)$$

از آنجا که تبدیل S یک نماینده از طیف‌های محلی است، طیف فوریه یا متوسط زمانی می‌تواند مستقیماً با متوسط‌گیری از طیف محلی به دست آید.

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f, \tau) d\tau \quad (6)$$

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} S(f, \tau) d\tau \right\} e^{j2\pi ft} df \quad (7)$$

سیگنال اغتشاش سیستم قدرت که با تابع $h(t)$ در اینجا مشخص می‌شود می‌تواند به فرم ناپیوسته به فرم $h(kt)$ هم نوشته شود، که k از ۱ تا $N-1$ متغیر است. پارامتر T فاصله زمانی نمونه‌برداری و N مجموع تعداد نمونه‌هاست. تبدیل فوریه^۳ $h(kt)$ بصورت رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$H\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} h(kt) e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (8)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

با استفاده از معادله (۵) تبدیل S سری‌های گسسته $h(kt)$ بصورت رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$S\left[kT, \frac{n}{kT}\right] = \sum_{m=0}^{n-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{j\frac{2\pi mk}{N}} \quad n \neq 0 \quad (9)$$

$$S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left(\frac{m}{NT}\right) \quad n = 0 \quad (10)$$

با کمک گرفتن از FFT و تئوری کانولوشن تبدیل S گسسته به سرعت می‌تواند محاسبه شود. تبدیل S طیف فاز و هم‌چنین طیف دامنه را مکان‌یابی می‌کند. در این مقاله، ماتریس دامنه تبدیل S (STA)^۴ که فرمول آن طبق رابطه (۱۱) است برای تحلیل اغتشاشات کیفیت توان استفاده می‌شود که سطرها دامنه مؤلفه‌های فرکانسی و ستون‌ها مقادیر زمانی هستند. هر سطر، دامنه تبدیل S را در همه فرکانس‌ها به طور همزمان نشان می‌دهد و هر ستون دامنه تبدیل S را با تغییر زمان از صفر تا $N-1$ در همان فرکانس نشان می‌دهد که دهد که n از صفر تا $\frac{N}{2} - 1$ متغیر است.

اغتشاشات ترکیبی هستند. در [۸] از نوعی از تبدیل S برای استخراج مشخصات سیگنال‌های شبکه توزیع استفاده شده و نوعی از بردار ماشین پشتیبان هم برای دسته‌بندی اغتشاشات به کار گرفته شده است. در مرجع [۹]، اغتشاشات کمبود و بیشبود ولتاژ به طور خاص مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای شناسایی این دو اغتشاش از دو الگوریتم احتمالاتی و قطعی استفاده شده است. الگوریتم ذکر شده در این مرجع می‌تواند به عنوان یک پیش پردازنده، برای استخراج مشخصات گذرا از سیگنال قدرت و آشکارسازی اغتشاشات استفاده شود. در [۱۰] روشی پیشنهاد شده است که از نویز تأثیر نپذیرفته و با دقت مناسبی مشخصات واقعی سیگنال حاوی اغتشاش را استخراج می‌کند. تبدیل به کار رفته تبدیل مقیاس زمان-فرکانس نام دارد. در واقع برای استخراج مشخصات زمانی و فرکانسی، از تبدیلات زمان-فرکانس استفاده می‌شود که پر استفاده‌ترین آن‌ها تبدیل ویولت [۵]، تبدیل S [۱۱] و تبدیل زمان-زمان (TT) [۱۲] است.

در این مقاله، با مطالعه بر روی شبکه‌ی توزیع جنوب استان کرمان، تأثیر حضور DGهای خورشیدی بر روی کیفیت توان شبکه‌ی توزیع جنوب استان کرمان به صورت عملی مورد بررسی قرار گرفته است. به طور دقیقتر می‌توان گفت که از نزدیکی DGی نصب شده بر روی فیدر روستای دهکهان از شهرستان کهنوج از سیگنال‌های شبکه نمونه‌برداری شده است. برای ثبت کردن سیگنال‌های شبکه‌ی توزیع هنگام کلیدزنی DGی خورشیدی به شبکه و نیز در شرایط ماندگار اتصال داشتن DG به شبکه، از دستگاه آنالیز کیفیت توان MAVOWATT70 استفاده شده است. سپس، سیگنال‌های ثبت شده برای تحلیل مشخصات زمانی و فرکانسی آن، به نرم‌افزار MATLAB انتقال داده می‌شود. در این مقاله، برای استخراج مشخصات زمانی و فرکانسی از سیگنال‌های ولتاژ و جریان از تبدیل S استفاده شده است. تبدیل S از دقیقترین تبدیلات زمان-فرکانس است که کمترین تأثیر را نیز از نویز موجود در شبکه‌ی توزیع می‌پذیرد.

تبدیل S

تبدیل S می‌تواند به عنوان یک تحلیلگر فاز برای تبدیل موجک پیوسته در نظر گرفته شود. تبدیل موجک پیوسته^۱ برای تابع $h(t)$ به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود [۱۳].

$$w(\tau, d) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \cdot w(d, t - \tau) dt \quad (1)$$

در این رابطه پارامتر d پهنای موجک $W(d, t)$ را مشخص می‌کند بنابراین میزان دقت تبدیل را تحت کنترل خود دارد. تبدیل S تابع $h(t)$ به صورت یک تبدیل موجک پیوسته (CWT) با یک موج مادر مشخص ضربدر فاکتور فازی تعریف می‌گردد.

$$s(\tau, f) = e^{-j2\pi ft} \cdot w(d, \tau) \quad (2)$$

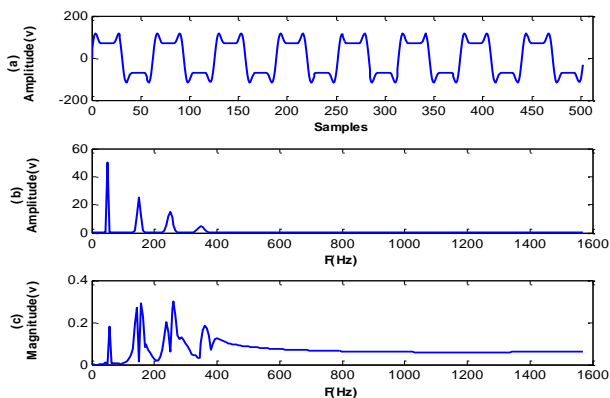
که در آن موجک مادر به وسیله‌ی رابطه‌ی (۳) تعریف می‌شود.

^۲ ST Amplitude

^۱ Continuous WT

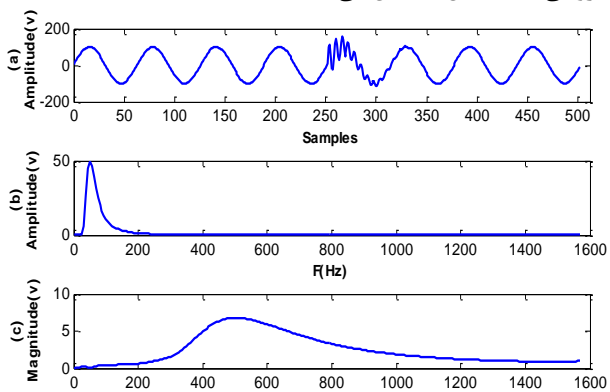
دامنه است که طیف فرکانسی سیگنال را نشان می‌دهد. از آنجا که در سیگنال نرمال فقط یک فرکانس 50 Hz که همان فرکانس اساسی سیستم قدرت است وجود دارد، در شکل ۲(b) هم فقط یک پیک دیده می‌شود. اگر مؤلفه‌های فرکانسی دیگری هم در شکل موج وجود داشت، این مؤلفه‌ها در این شکل به صورت پیک‌هایی خود را نشان می‌دادند. شکل ۲(c) همان منحنی انحراف استاندارد است. اگر سیگنال گذرایی در موج اصلی وجود داشته باشد، منحنی انحراف استاندارد در همان فرکانسی که سیگنال گذرا داشته پیکی را به خود می‌بیند.

شکل ۳ (۳) یک موج هارمونیکی را همراه با خروجی‌های تبدیل S نشان می‌دهد.



شکل ۳. خروجی تبدیل S برای یک سیگنال حاوی هارمونیکی همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، در منحنی ماکزیمم دامنه چهار پیک وجود دارد که نشان دهنده‌ی چهار مؤلفه هارمونیکی در سیگنال اصلی است. هر چند که اعوجاجاتی در شکل ۳(c) هم دیده می‌شود. اما این اعوجاجات کم دامنه هستند و می‌توان گفت که سیگنال گذرایی در موج اصلی وجود ندارد.

شکل ۴ (۴)، یک سیگنال حاوی مؤلفه‌ی گذرای نوسانی را همراه با خروجی‌های تبدیل S نشان می‌دهد.

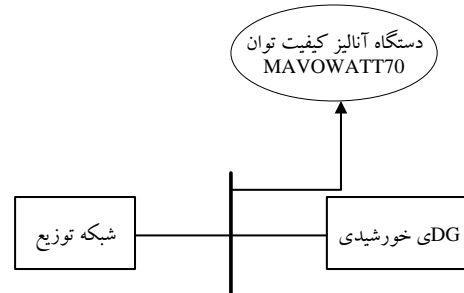


شکل ۴. سیگنال حاوی مؤلفه گذرای نوسانی و خروجی تبدیل S در سیگنال اصلی فقط یک مؤلفه هارمونیکی گذرا وجود دارد و تنها مؤلفه‌ی فرکانسی دائمی همان مؤلفه‌ی فرکانس اساسی 50 Hz است. این موضوع در شکل ۴(b) هم به وضوح دیده می‌شود. شکل ۴(c) نشان می‌دهد که سیگنال گذرای نوسانی هم در موج اصلی وجود دارد و فرکانس این موج گذرا در حدود 50 Hz است.

$$A(kT, f) = \left| S \left[kT, \frac{n}{NT} \right] \right| \quad (11)$$

روش تحلیل تأثیر DG بر کیفیت توان شبکه توزیع

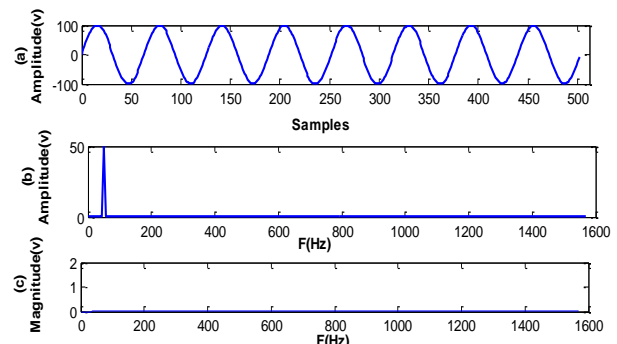
در این مقاله، با استفاده از تبدیل S اطلاعات موجود در سیگنال‌های مورد بررسی استخراج می‌شود. سیگنال‌های مورد بررسی همان سیگنال‌های ولتاژی هستند که در نقطه‌ای که DG خورشیدی به شبکه متصل است استخراج شده‌اند. شبکه‌ی توزیع مورد بحث یکی از فیدرهای تغذیه کننده منطقه‌ی دهکپان در شهرستان کهنوج در نظر گرفته شده است و سیگنال‌های شبکه توسط دستگاه آنالیز کیفیت توان MAVOWATT70 استخراج می‌شوند. شکل (۱) نحوه اندازه‌گیری سیگنال‌های موجود در شبکه‌ی توزیع را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نحوه‌ی استخراج سیگنال‌های ولتاژ و جریان

شرایط مورد بررسی طیف هارمونیکی تزریقی در شرایط کارکرد DG خورشیدی، وجود شرایط گذرای نوسانی هنگام شروع به کار DG خورشیدی و نیز بررسی بروز سیگنال گذرای ضربه‌ای هنگام کلیدزنی DG هستند.

نحوه‌ی تحلیل سیگنال‌های شبکه که به صورت شکل (۱) استخراج شده‌اند به این صورت است که ابتدا تبدیل S به این سیگنال‌ها اعمال می‌شود. خروجی تبدیل S یک ماتریس دوبعدی است که ماتریس دامنه‌ی تبدیل S از آن و مطابق رابطه‌ی (۱۱) به دست می‌آید. اطلاعات استخراج شده از ماتریس دامنه‌ی تبدیل S به صورت دو منحنی هستند. در منحنی اول که منحنی ماکزیمم دامنه نام دارد، طیف فرکانسی سیگنال استخراج شده است. منحنی دوم منحنی انحراف معیار نام دارد و از آن، فرکانس‌های گذرای احتمالی موجود در سیگنال استخراج می‌شوند. به عنوان مثال، شکل (۲) خروجی تبدیل S برای یک سیگنال نرمال که هیچ اغتشاشی در آن وجود ندارد را نشان می‌دهد.

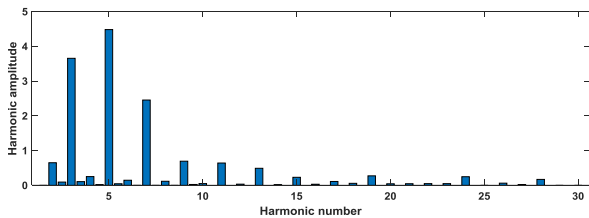


شکل ۲. خروجی تبدیل S برای سیگنال نرمال

شکل ۲(a) همان شکل سیگنال نرمال است. شکل‌های ۲(b) و ۲(c) خروجی‌های تبدیل S هستند. شکل ۲(b) همان منحنی ماکزیمم

دیده می‌شود که سیگنال ولتاژ ظاهراً سینوسی خالص است. هر چند که برای نتیجه‌گیری دقیقتر باید تحلیل زمانی و فرکانسی بر روی آن اعمال شود. از آنجا که DG متصل به شبکه نبوده است، جریان تقریباً صفر بوده است. به همین دلیل است که موج جریان نشان داده شده در شکل (۶) حالت سینوسی ندارد.

برای تحلیل بیشتر سیگنال ولتاژ، تبدیل S بر روی این سیگنال اعمال شده است. شکل (۷) طیف هارمونیک موجود در سیگنال جریان را نشان می‌دهد.

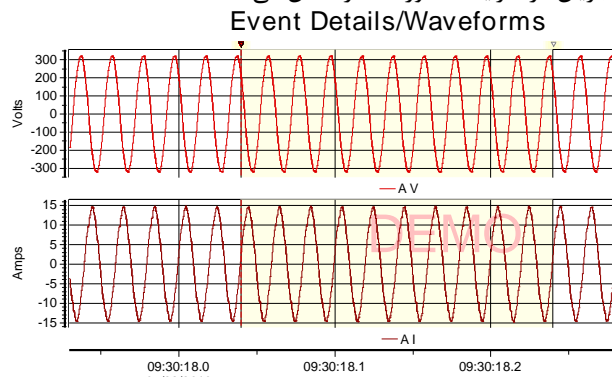


شکل ۷. طیف هارمونیک مؤلفه‌های غیر اساسی برای سیگنال ولتاژ در اینجا لازم به ذکر است که دامنه‌ی هارمونیک اصلی سیگنال ولتاژ برابر با ۳۲۰/۷ ولت بوده است. دامنه‌ی بزرگترین مؤلفه‌ی هارمونیک که همان هارمونیک پنجم بوده است کمی بیشتر از ۴ ولت است. بنابراین به نظر می‌آید که به لحاظ هارمونیک سیگنال ولتاژ شرایط قابل قبولی را دارد.

برای تحلیل بهتر موضوع، از پارامتر THD هارمونیک معرفی شده در رابطه‌ی (۱۲) استفاده می‌شود. در شرایطی که DG در شبکه حصار ندارد، مقدار THD هارمونیک برابر با ۱/۹۹ بوده است که باز هم قابل قبول بودن وضعیت هارمونیک شبکه را نشان می‌دهد.

تحلیل هارمونیک در شرایط حضور DG

پس از کلیدزنی DG خورشیدی به شبکه‌ی توزیع، دومرتبه سیگنال‌های ولتاژ و جریان شبکه، در نقطه‌ی اتصال ثبت شده است تا تحلیل‌های بعدی روی آن‌ها انجام گیرد. شکل (۸) امواج ولتاژ و جریان در شرایط حضور DG را نشان می‌دهد.



شکل ۸. امواج ولتاژ و جریان بعد از کلیدزنی DG در اینجا مشاهده می‌شود که جریان هم مقدار پیدا کرده است. به این دلیل که در این حالت، ژنراتورهای خورشیدی توان را به شبکه تحویل می‌دهند.

پارامتر اساسی که در این مقاله به عنوان تأثیر حضور DG بر کیفیت توان شبکه استفاده می‌شود، پارامتر اعوجاج هارمونیک کل (THD) است که با رابطه‌ی (۱۲) به دست می‌آید.

$$THD = \frac{\sqrt{m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + \dots + m_n^2}}{m_1} \quad (12)$$

این پارامتر قبل و بعد از نصب DG به دست می‌آید تا میزان تغییر آن در اثر اتصال DG به شبکه استخراج شود.

نتایج تحلیل

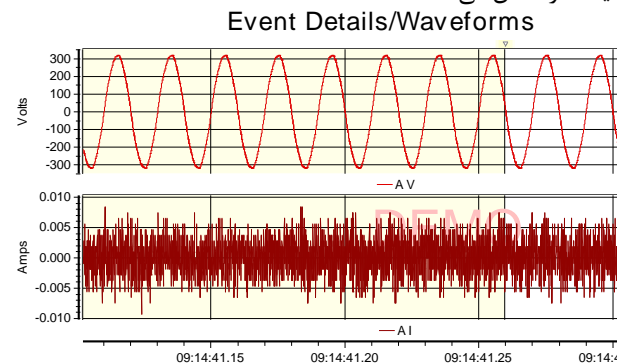
در این قسمت، یکی از نقاط موجود در منطقه‌ی دهکده‌ها از شهرستان کهنوج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. برای این کار یک DG ۵kW نصب شده در انتهای یکی از فیدرها انتخاب شده است. دستگاه آنالیز کیفیت توان MAVOWATT70 روی نقطه اتصال DG به شبکه متصل گردید. با تغییراتی در تنظیمات دستگاه، این امکان به وجود آمد که سیگنال‌های ولتاژ و جریان در یک مدت زمان خاص توسط دستگاه ثبت شوند. این کار در شرایطی که هیچ اغتشاشی در شبکه وجود ندارد هم قابل اجراء است. شکل (۶) منوی ابتدایی دستگاه آنالیز کیفیت توان MAVOWATT70 را نشان می‌دهد.



شکل ۵. دستگاه آنالیز کیفیت توان MAVOWATT70

تحلیل هارمونیک در شرایط عدم حضور DG

شکل (۶) امواج ولتاژ و جریان نقطه‌ی مورد مطالعه، ثبت شده با دستگاه MAVOWATT70، در شرایطی که DG به شبکه متصل نیست را نشان می‌دهد.



شکل ۶. امواج ولتاژ و جریان در شرایط عدم اتصال DG به شبکه

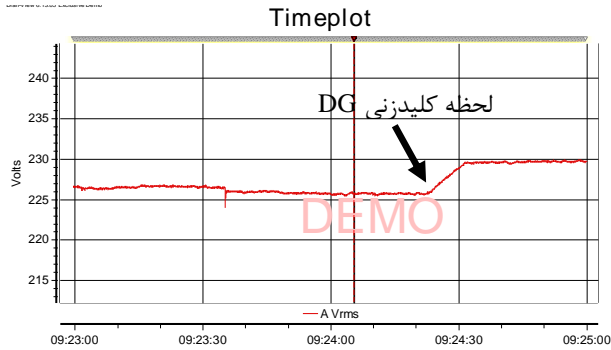
۳. Total harmonic distortion



گذاشته‌های ناشی از کلیدزنی

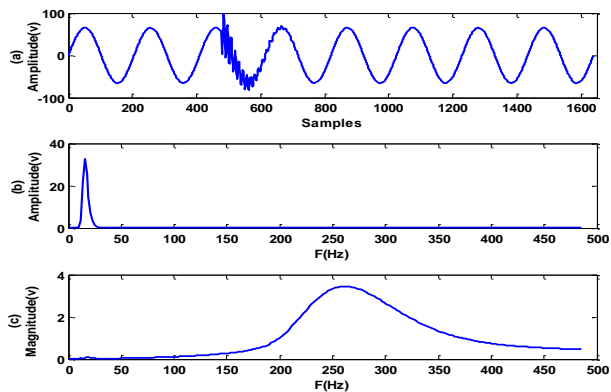
در این مقاله، برای تحلیل بهتر تأثیر حضور DG بر کیفیت توان شبکه‌ی توزیع منطقه‌ی دهکمان، علاوه بر بررسی تغییرات طیف هارمونیک، شرایط گذرای که در اثر کلیدزنی نیروگاه خورشیدی به شبکه به وجود می‌آید نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

اولین نکته‌ای که در نظر گرفته شده است، نحوه‌ی افزایش دامنه‌ی موج ولتاژ در اثر کلیدزنی DG است. شکل (۱۲) مقدار مؤثر ولتاژ نقطه اتصال DG را بر حسب زمان نشان می‌دهد که در یک لحظه‌ی خاص کلیدزنی DG انجام گرفته است.



شکل ۱۲، نحوه‌ی افزایش مقدار مؤثر ولتاژ پس از کلیدزنی DG (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که پس از کلیدزنی DG، ولتاژ بدون نوسانات قابل توجه افزایش یافته است. این یک حالت ایده‌آل برای شبکه توزیع است.

در این قسمت، حضور سیگنال گذرای نوسانی هم در لحظه‌ی کلیدزنی DG به شبکه مورد بحث قرار می‌گیرد. شکل (۱۳) موج گذرای نوسانی شکل گرفته روی موج ولتاژ را در لحظه‌ی کلیدزنی DG همراه با خروجی‌های تبدیل S را نشان می‌دهد.

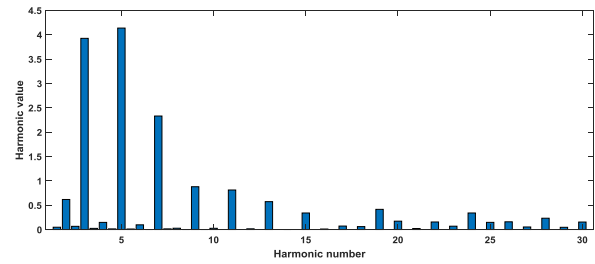


شکل ۱۳، سیگنال گذرای نوسانی شکل گرفته در اثر کلیدزنی DG و خروجی‌های تبدیل S

در شکل ۱۳ (a) دیده می‌شود که در اثر کلیدزنی DG، سیگنال گذرای قابل توجهی به موج ولتاژ اضافه شده است. شکل ۱۳ (c) نشان می‌دهد که فرکانس این موج گذرا در حدود ۲۵۰ Hz است.

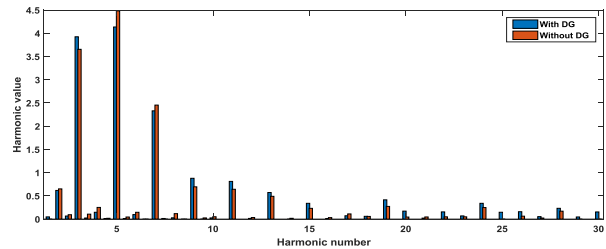
در لحظات ابتدایی کلیدزنی DG، موج جریان تزریقی به شبکه هم در شکل (۱۴) مورد بررسی قرار گرفته است.

حال باید دید که طیف هارمونیک ولتاژ در شرایط حضور DG چه تغییراتی را به خود دیده است. شکل (۹) طیف هارمونیک سیگنال ولتاژ را در شرایطی که DG در شبکه وجود دارد، نشان می‌دهد.



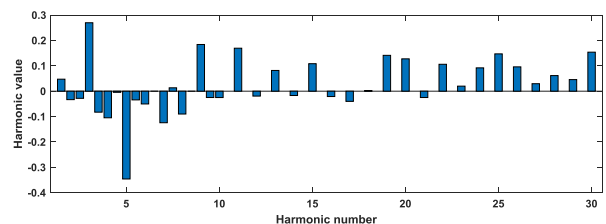
شکل ۹. طیف هارمونیک سیگنال ولتاژ در شرایط حضور DG

همانطور که در شکل (۹) دیده می‌شود، طیف هارمونیک با حضور DG کاملاً تغییر کرده است. هر چند که هنوز مشخص نیست که با وجود این تغییر، محتوای هارمونیک در محدوده مجاز باقی مانده است یا خیر. در ابتدا باید مقایسه بین طیف هارمونیک قبل و بعد از اتصال DG به شبکه انجام شود. شکل (۱۰) این مقایسه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰، مقایسه طیف هارمونیک ولتاژ قبل و بعد از اتصال DG به شبکه همانطور که دیده می‌شود، در بعضی از فرکانس‌ها، دامنه مؤلفه‌ی هارمونیک کم و در بعضی دیگر زیاد شده است. اما این تفاوت خیلی چشمگیر نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اتصال DG به شبکه تغییرات مشکل‌ساز را در طیف هارمونیک ولتاژ، در شبکه توزیع منطقه دهکمان ایجاد نکرده است. برای بررسی بهتر موضوع، مقدار THDی هارمونیک ولتاژ بعد از اتصال DG هم به دست آمده است که برابر است با ۱/۹۷. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که باز هم در محدوده‌ی مجاز باقی مانده است. البته بعد از اتصال DG به شبکه‌ی توزیع، دامنه ولتاژ به میزان ۳۲۴/۷ افزایش یافته است.

با توجه به دامنه‌ی مؤلفه‌های هارمونیک قبل و بعد از اتصال DG، می‌توان با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، میزان هارمونیک تزریقی توسط DG را محاسبه کرد. مقدار هارمونیک‌های تزریقی توسط DG در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

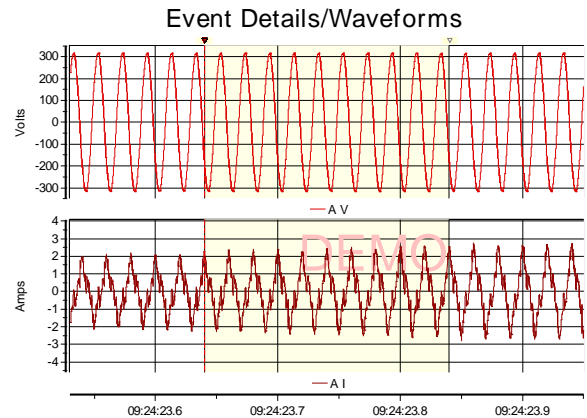


شکل ۱۱، هارمونیک‌های تزریقی به شبکه توسط DGی خورشیدی از شکل (۱۱) واضح است که حضور DG باعث کاهش دامنه‌ی برخی مؤلفه‌های هارمونیک و باعث افزایش برخی دیگر شده است اما این تغییرات جزئی است.

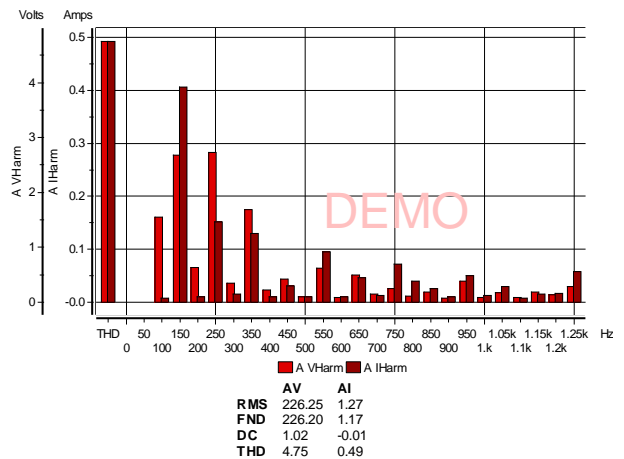
این کلیدزنی باعث تولید سیگنال گذرای نوسانی بر روی سیگنال ولتاژ می‌شود که پس از گذشت حدود یک سیکل به طور کامل از بین می‌شود.

مراجع

- [1] Chidurala, A., Saha, T., Mithulanathan, N., 2015. "Field Investigation of Voltage Quality Issues in Distribution Network with PV Penetration". *Power and energy engineering conference (APPEEC)*.
- [2] Oyegoke, S., Habtay, Y., skarvelis-Kazakos, S., 2015. "Contribution of inverter based photovoltaic generators to power quality at low voltage". *Power engineering conference (UPEC)*.
- [3] Esparza, M., Segundo, J., N'úñez, C., Wang, X., Blaabjerg, F., 2017. "A Comprehensive Design Approach of Power Electronic-Based Distributed Generation Units Focused on Power-Quality Improvement". *IEEE transactions on power delivery*, 32(2), pp. 942-950.
- [4] Li, C., Yang, J., Xu, Y., Wu, Y., Wei, P., 2017. "classification of voltage sag disturbance sources using fuzzy comprehensive evaluation method". *24th international conference on electricity distribution (CIRED)*, pp. 544-548.
- [5] Elvira-ortiz, D. A., Morinigo-Sotelo, D., Jaen-Cuellar, A. Y., Romero-Troncoso, R. J., 2018. "Methodology for flicker estimation and its correlation to environmental factors in photovoltaic generation". *IEEE Access*, vol. 6, pp. 24035-24047.
- [6] Chakravorti, T., Patnaik, R. K., Dash, P. K., 2018. "Detection and classification of islanding and power quality disturbances in microgrid using hybrid signal processing and data mining techniques". *IET Signal Process.*, 12(1), pp. 82-94.
- [7] De, S., Debnath, S., 2018. "Real-time cross-correlation-based technique for detection and classification of power quality disturbances". *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12(3), pp. 688-695.
- [8] Li, J., Teng, Z., Tang, Q., Song, J., 2016. "Detection and classification of power quality disturbances using double resolution S-Transform and DAG-SVMs". *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 65(10), pp. 2302-2312.
- [9] Oubrahim, Z., Choqueuse, V., Amirat, Y., Benbouzid, M., 2017. "Disturbance classification based on a model order selection method for power quality monitoring". *IEEE trans. On industrial electronics*, 64(12), pp. 9421-9432.
- [10] Singh, U., Singh, S. N., 2017. "Detection and classification of power quality disturbances based on time-frequency-scale transform". *IET Sci. Meas. Technol.*, 11(6), pp. 802-810.
- [11] hasheminejad, S., Esmaeili, S., Jazebi, S., 2012. "Power quality disturbance classification using S-transform and hidden Markov model". *Elect. Power Comp. Syst.*, 40, pp. 1160-1182.
- [12] Zhao, L., Liu, X., Fu, G., 2016. "Identification of power quality disturbances based on improved TT transform and support vector classifier". *8th*



شکل ۱۴. امواج ولتاژ و جریان چند لحظه بعد از کلیدزنی DG
شکل (۱۴) اعوجاج قابل توجه جریان را در لحظات ابتدایی کلیدزنی DG نشان می‌دهد. قبلاً این نتیجه به دست آمد که در شرایط ماندگار، مقدار THD_T هارمونیک ولتاژ در حضور DG مقدار کمی دارد. در این قسمت، طیف هارمونیک سیگنال‌ها در لحظات ابتدایی کلیدزنی DG هم بررسی شده‌اند. شکل (۱۵) این طیف هارمونیک را همراه با مقدار THD نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. طیف هارمونیک سیگنال‌های ولتاژ و جریان در لحظات اولیه کلیدزنی DG

نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر حضور و کلیدزنی DG‌های خورشیدی بر کیفیت توان شبکه‌ی توزیع به صورت کامل مورد بحث قرار گرفته است. برای تست، شبکه‌ی واقعی مربوط به منطقه‌ی دهکده‌ها در شهرستان کهنوج انتخاب شده و سیگنال‌های شبکه‌ی توزیع با استفاده از دستگاه آنالیز کیفیت توان MAVOWATT70 ثبت شده‌اند. از آنجا که تست‌های موجود در این مقاله کاملاً عملی هستند، نتایج قابلیت اطمینان بالایی داشته و برای بهره‌بردار شبکه‌ی توزیع قابل استفاده می‌باشند.

نتایج به این صورت بود که حضور DG‌های خورشیدی هر چند که موجب تغییر در طیف هارمونیک سیگنال‌های ولتاژ شبکه‌ی توزیع می‌شود، اما باعث خروج پارامتر اعوجاج هارمونیک کل از محدوده‌ی مجاز نمی‌شود. کلیدزنی DG به شبکه باعث شده است که ولتاژ نقطه اتصال DG به شبکه بعد از چند ثانیه به طور تدریجی افزایش یابد.



[13]Zhao, F., Yang, R., 2007. “power quality disturbance recognition using s-transform” *IEEE trans. On power deliv.*, 22(2), pp. 944-950.

international power electronics and motion control conference.

ACEC2021-65226

بررسی انرژی و انرژی ذخیره ساز انرژی هوا فشرده نوین با کلکتور خورشیدی LFR

رسول شکوه سلجوقی^۱، مهران عامری مهابادی^۲

^۱ کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ rasoul.saljooghi@gmail.com

^۲ استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ ameri_mm@uk.ac.ir

چکیده

افزایش پیدا کرده است. پیش بینی می شود که انرژی به یکی از چالش برانگیزترین و مهم ترین مسائل جهان در آینده تبدیل شود. در چند دهه گذشته، بیشترین مشارکت در تولید انرژی مربوط به سوخت فسیلی می باشد. با توجه به اینکه تقاضا برای سوخت های فسیلی زیاد است و منابع سوخت های فسیلی رو به اتمام است. از سوی دیگر، سوختن سوخت های فسیلی منجر به انتشار کنترل نشده کربن دی اکسید (CO₂) و گازهای گلخانه ای دیگر و همچنین گرم شدن کره زمین می شود. محدودیت منابع سوخت های فسیلی، نوسانات قیمت سوخت های فسیلی، دائمی نبودن منابع فسیلی و بحران روزافزون آلاینده های ناشی از آنها برای محیط زیست توجه بسیاری از کشورها و نهادهای فعال در بخش انرژی را به استفاده از انرژی های تجدیدپذیر معطوف نموده است. انرژی های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشید، باد، امواج اقیانوس، جزر و مد، گرمای زمین و ... است. از مهم ترین منابع انرژی تجدید پذیر انرژی خورشید و باد است که غیر قابل پیش بینی و اغلب به رویدادهای هواشناسی وابسته هستند و بنابراین قابلیت اطمینان کمی دارند. الگوی وزش باد و ساعات تابش خورشید در طول ساعات شبانه روز با الگوی تقاضا انرژی برق مطابقت ندارد که باعث شده است صنعت برق برای متعادل کردن شبکه و پیک سایه شبکه برق به دنبال راهکاری برای ذخیره سازی انرژی الکتریکی باشد.

برای ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا برای انرژی برق و هموار کردن نوسانات شبکه باید از سیستم ذخیره سازی انرژی (ESS)^۲ استفاده کرد.

در این تحقیق یک مدل ترمودینامیکی، جهت آنالیز انرژی، انرژی، انرژی سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده آدیباتیک به کمک انرژی حرارتی خورشیدی^۱ (ST-CAES) که با فشرده سازی چهار مرحله ای و انبساط سه مرحله ای است توسعه داده شده است. برای آنالیز انرژی و انرژی سیستم (ST-CAES) و انجام محاسبات ترمودینامیکی، از نرم افزار Matlab استفاده شده است. نتایج نشان می دهد ماکزیمم ظرفیت توربین و کمپرسور به ترتیب ۲۴۷ kw و ۳۴۷ kw است و در شرایط طراحی، زمان شارژ و تخلیه ۴ ساعت است در طی این زمان سیستم ۱۳۴۲ kwh برق مصرف کرده و قدرت خروجی توربین ۹۸۷ kwh است. همچنین قادر به تولید ۴/۳ تن آب شیرین و ۹/۴ تن آب گرم در یک روز طراحی است. کلکتور خورشیدی از عوامل مهم تخریب انرژی است. سیستم دارای بازده ذخیره انرژی الکتریکی و بازده رفت و برگشت به ترتیب ۷۳٪/۵، ۵۱٪/۸ است. سیستم پیشنهادی به دلیل کارایی و توانایی تامین مشترک نیاز های چندگانه انرژی چشم اندازی امیدوارکننده در شهرهای با منابع انرژی خورشیدی دارد.

واژه های کلیدی: سیستم ذخیره ساز انرژی هوای فشرده، انرژی، انرژی، کلکتور خورشیدی LFR، آب شیرین کن

مقدمه

انرژی نقش کلیدی در تمام فعالیت های زندگی انسان دارد. توسعه یک کشور با مصرف انرژی آن اندازه گیری می شود. با افزایش جمعیت جهان، رفاه اجتماعی و گسترش صنایع جدید مصرف انرژی

² Energy storage system

¹ Solar thermal assisted Adiabatic compressed air energy storage

سیستم انرژی هوای فشرده دارای سابقه‌ای اثبات شده در مقیاس انبوه است که شامل موتور، کمپرسور، محفظه ذخیره هوا، محفظه احتراق، توربین و ژنراتور است. این سیستم در طول ساعات غیر پیک و زمانی که برق کافی وجود دارد و قیمت آن پایین تر است، برق را از شبکه می‌گیرد و به وسیله کمپرسور که توسط موتوری چرخانده می‌شود، هوا را فشرده می‌کند و هوا در مخازن زیرزمینی، روزمینی و یا مخازن زیر آب ذخیره می‌شود، هوا پیش از ورود به مخازن ذخیره خنک می‌شود تا از فضا بهترین استفاده صورت گیرد و در ساعات پیک و مورد نیاز برق هوای ذخیره شده از مخازن خارج و در محفظه احتراق با مقداری سوخت مخلوط و پس از احتراق وارد توربین می‌شود، در نهایت با استفاده از ژنراتور برق تولید می‌کند [2].

گرمای ناشی از فشرده‌سازی هوا با خنک کردن هوای فشرده به محیط هدر می‌رود؛ برای مرحله تخلیه، نیروگاه‌های سیستم‌های ذخیره سازی انرژی هوا فشرده به گرمای اضافی نیاز دارند که معمولاً با احتراق گاز طبیعی یا نفت سبک تامین می‌شود. در سیستم⁵ (A-CAES) گرمای مرحله فشرده‌سازی هوا در وسایل اضافی ذخیره می‌شود و قبل از مرحله تخلیه برای جلوگیری از نیاز به منابع گرمایی دیگر در طول فاز تخلیه استفاده می‌شود این کار نیاز به احتراق را کاهش یا به کلی حذف می‌کند [3].

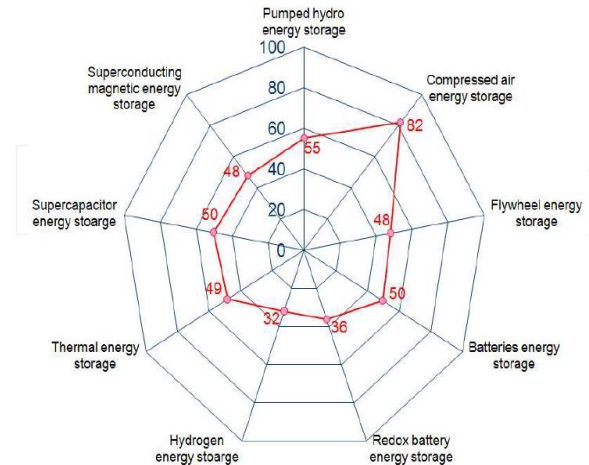
باگدانایسیوس و جنکینز [4] دو سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده و ذخیره انرژی هوای فشرده همراه با ذخیره سازی حرارتی که پتانسیل استفاده از حرارت تولید شده در طول مرحله فشرده‌سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده را دارد با استفاده از تحلیل انرژی و اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌های آنها نشان داده است که سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده همراه با ذخیره سازی حرارتی دارای راندمان انرژی بیشتر و هزینه برق تولید شده کمتر است.

سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده معمولی ریشه در فن‌آوری توربین گاز دارند. ویژگی اصلی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده معمولی، سوزاندن سوخت‌های فسیلی از طریق توربین گازی و در نتیجه انتشار دی‌اکسید کربن است. اگرچه تکنولوژی ذخیره-سازی انرژی هوای فشرده به طور جامع بهینه سازی شده است ولی وابستگی به سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای هنوز

سیستم‌های مختلفی برای ذخیره سازی انرژی وجود دارد که عبارتند از:

۱. روش‌های مکانیکی مانند: ذخیره ساز هوای فشرده³ (CAES)، پمپ‌های هیدرو الکتریکی⁴ (PHS)، ذخیره سازی چرخ طیار
۲. روش‌های الکتریکی مانند: ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا، ذخیره ساز ابر خازن
۳. روش‌های الکترو شیمیایی مانند: باتری‌های متداول، باتری‌های جریان، باتری‌های آلی، باتری دما بالا
۴. سایر سیستم‌های شیمیایی

در این میان شاخصی به نام شاخص عملکرد سیستم ذخیره سازی انرژی مطرح شده که طبق شکل ۱ سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده (CAES) برتری قابل توجهی در به کارگیری با سیستم‌های ترکیبی و تجدیدپذیر تولید انرژی نسبت به سایر سیستم‌ها حتی پمپ‌های هیدرو الکتریکی (PHS) دارد. این شاخص بر اساس تجزیه و تحلیل از همه ویژگی‌های فنی و اقتصادی از فن‌آوری ذخیره سازی انرژی موجود (برای مثال، هزینه، راندمان، سادگی، عمر مفید، تخلیه خودبخودی انرژی، قابلیت اطمینان، اثرات زیست محیطی، محدودیت‌های عملکرد، ظرفیت انرژی و توان، کمک به کاهش مصرف سوخت و غیره) تهیه شده است.



شکل ۱. شاخص عملکرد سیستم‌های ذخیره سازی انرژی مختلف [1]
فناوری ذخیره سازی انرژی به سرعت در حال توسعه است تا نیاز به انعطاف پذیری شبکه را تامین کند. از سوی دیگر نوسانات قیمت برق در حال تبدیل شدن به یک استراتژی برای مدیریت انرژی است. فن‌آوری ذخیره‌سازی

⁵ Adiabatic compressed air energy storage

³ Compressed air energy storage

⁴ Pumped hydroelectric Storage



چهار مرحله ای فشرده سازی هوا است، کمپرسور (AC-1) هوا را از محیط می‌گیرد و آن را برای فشرده سازی بیشتر به کمپرسور (AC-2, AC-3, AC-4) انتقال می‌دهد، در این واحد مقدار زیادی گرما از طریق فشرده سازی تولید می‌شود، برای بازیابی این گرما و همچنین خنک کردن هوا قبل از ورود به فاز فشرده سازی بعدی، مبدل های حرارتی (HEX1, HEX2, HEX3, HEX4) بعد از مرحله تراکم نصب شده اند. مبدل های حرارتی با آب ورودی از مخزن سرد¹² (CWT) تغذیه می‌شوند، حرارت فشرده سازی در تانک دما بالا آب¹¹ (HWT) جذب می‌شود و از آن در مبدل حرارتی (HEX10) برای تامین انرژی های حرارتی ساکنین و پیش گرم کردن آب تغذیه آب شیرین کن استفاده می‌شود. هوای فشرده به مخزن¹² (SPT) منتقل می‌شود و در مرحله تخلیه هوای فشرده به سیستم بازمی‌گردد. در تحقیق حاضر از متمرکزکننده خورشیدی فرسnel¹³ (LFR) و یک مخزن دما پایین و یک مخزن دما بالا روغن در قسمت (STC) استفاده شده است، روغن با دما پایین از تانک (LOT) توسط کلکتور خورشیدی (LFR) گرم می‌شود تا روغن با دما بالا در تانک¹⁴ (HOT) داشته باشیم. زیر سیستم توربین شامل (AT1-AT2-AT3) است. به طور پیوسته، هوا خروجی از مخزن (SPT) توسط روغن خروجی از تانک دما بالا (HOT) در مبدل های حرارتی (HEX5-HEX6-HEX7) برای بهبود کارایی سیستم گرم می‌شود. سپس در توربین برای تولید برق هوای فشرده منبسط می‌شود. قبل از ورود هوا به توربین، هوای فشرده توسط گاز خروجی توربین در مبدل حرارتی (HEX8) پیش گرم می‌شود تا از گرمای اتلافی آن استفاده شود. همچنین از باقی مانده انرژی گاز خروجی توربین بعد از پیش گرم کردن هوا برای پیش گرم کردن آب تغذیه، آب شیرین کن در مبدل حرارتی (HEX9) استفاده می‌شود.

از معایب اصلی آنها است یک سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده شده همراه با سیستم کلکتور خورشیدی که هوای خروجی از مخزن را قبل از ورود به محفظه احتراق پیش گرم می‌کند، انرژی حرارتی خورشید به عنوان یک منبع حرارتی خارجی می‌تواند دمای ناکافی ذخیره سازی انرژی حرارتی را افزایش دهد و موجب کاهش سوخت می‌شود [5].

علاوه بر این سیستم جدید ذخیره انرژی بادی-خورشیدی هم استفاده می‌شود، انرژی بادی و انرژی خورشیدی به ترتیب به شکل انرژی لازم برای فشرده سازی هوا توسط کمپرسور و انرژی حرارتی توسط کلکتور خورشیدی، هوا فشرده شده را قبل از ورود به توربین گرم می‌کند [6].

شیائو تو چن و همکاران [7] یک سیستم جدید ذخیره انرژی هوای فشرده شده آدیباتیک با کمک انرژی خورشیدی ارائه دادند که موجب حذف سوخت در مرحله تخلیه شد.

حذف سوخت های فسیلی از یک سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده با کمک انرژی خورشیدی یکی از شاخه های پژوهش های محققان را در بر گرفته اند که هدف این پژوهش نیز حذف سوخت فسیلی از سیستم ذخیره سازی هوای فشرده است. از میان کلکتورهای خورشیدی، سه نوع کلکتور خورشیدی سهموی خطی، فرسnel و برج خورشیدی بیشترین استفاده را دارند که در این میان به دلیل هزینه کمتر کلکتور فرسnel نسبت به سایر کلکتورها، از این نوع کلکتور برای پژوهش حاضر استفاده شد. همچنین در این پژوهش با توجه به اینکه سیستم ذخیره سازی هوای فشرده در تمام مدت روز از انرژی حرارتی خورشید استفاده نمی‌کند برای بهره برداری از حداکثر انرژی خورشید یک سیستم آب شیرین کن چنداثره در نظر گرفته شده است.

شرح سیستم

سیستم مورد بررسی در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است، این سیستم شامل چهار زیر سیستم اصلی از جمله فشرده سازی⁶ (COM)، ذخیره سازی انرژی حرارتی خورشیدی⁷ (STC)، زیر سیستم توربین⁸ (TUR) و آب شیرین کن چند اثره⁹ (MED) می‌باشد که زیر سیستم آب شیرین کن برای بهره برداری از حداکثر انرژی خورشید استفاده شده است. زیر سیستم کمپرسور شامل یک فرآیند

¹² steel pipeline tank

¹³ linear fresnel reflector

¹⁴ high-temperature oil tank

⁶ air compressor stage

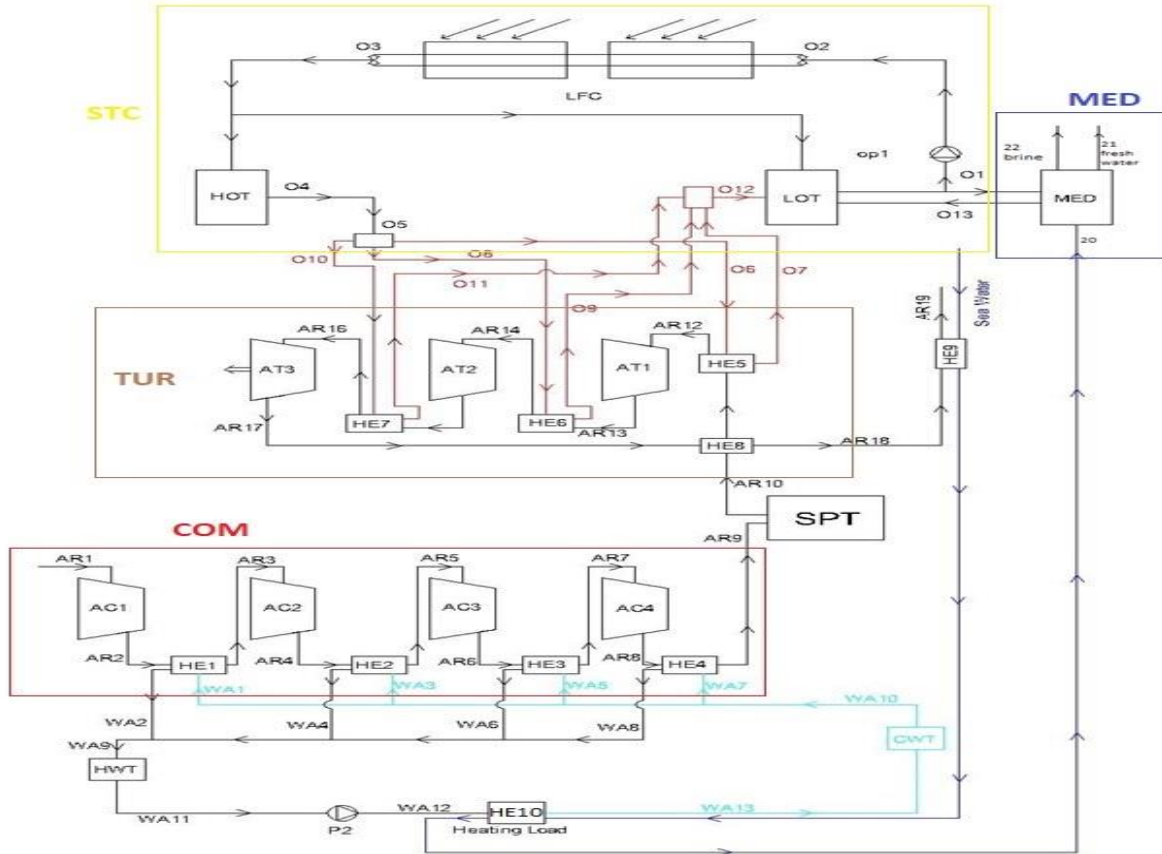
⁷ solar thermal collection and storage

⁸ air turbine stage

⁹ Multi Effect Desalination

¹⁰ cold water tank

¹¹ hot water tank



شکل ۲ شماتیک سیستم CAES مورد بررسی در تحقیق حاضر

تجزیه و تحلیل انرژی

دمای خروجی کمپرسور به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:
رابطه ۱:

$$T_{out}^{c.i} = T_{in}^{c.i} \left[1 + \frac{1}{\eta_{isen.com}} \left((r_p)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \quad (7-3)$$

توان مورد نیاز کمپرسور برابر است با اختلاف آنتالپی بین جریان خروجی و ورودی ضربدر نرخ جریان جرمی آن و با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید:
رابطه ۲:

$$\dot{W}_{com} = \dot{m}_{AR} (h_{out} - h_{in}) \quad (8-3)$$

مقدار آب گرم تولید شده در (HEX1-HEX4) توسط یک موازنه انرژی محاسبه می‌شود:

رابطه ۳:

$$Q_{heat} = \dot{m}_{hot} C_{p.hot} (T_{hot.in} - T_{hot.out}) = \dot{m}_{cold} C_{p.cold} (T_{cold.out} - T_{cold.in})$$

عملکرد یک مبدل حرارتی معمولاً از نظر اثر بخشی ارزیابی می‌شود که نسبت نرخ واقعی انتقال گرما با توجه به نرخ حداکثری است و با استفاده از رابطه (۴) بدست می‌آید:
رابطه ۴:

$$\varepsilon = \frac{Q_{actul}}{Q_{max}} = \frac{(\dot{m} C_p \Delta T)_{cold \text{ or } hot}}{(\dot{m} C_p)_{min} (T_{hot.in} - T_{cold.in})}$$

دمای خروجی توربین به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:
رابطه ۵:

$$T_{out}^{e.i} = T_{in}^{e.i} \left[1 - \eta_{isen.exp} \left(1 - (\beta_i)^{\frac{1-k}{k}} \right) \right]$$

قدرت خروجی توربین برابر است با:
رابطه ۶:

$$\dot{W}_{TUR} = \dot{m}_{AR} (h_{in} - h_{out})$$

کلکتور فرسنگ خطی از چند ردیف آینه تخت بلند با پهنای کم تشکیل شده است که روی یک پایه تخت قرار گرفته‌اند. این آینه



خلا جاذب کلکتور

| مقدار | ضرایب افت حرارتی |
|--------------|------------------|
| ۴/۰۵ | A_0 |
| ۰/۲۴۷ | A_1 |
| -۰/۰۰۱۴۶ | A_2 |
| ۰/۰۰۰۰۰۵۶۵ | A_3 |
| ۰/۰۰۰۰۰۰۰۷۶۲ | A_4 |
| -۱/۷ | A_5 |
| ۰/۰۱۲۵ | A_6 |

$Q_{hl\text{piping}}$ نیز حرارت اتلافی از لوله های سیستم است که برابر با ۱۰ وات بر متر مربع در نظر گرفته می شود.

در سیستم آب شیرین کن خورشیدی چنداثره حرارت از یک منبع خارجی وارد لوله های افکت اول می شود و باعث گرم کردن آب پاشیده شده بر سر افکت می شود. بخار تولیدی افکت اول به عنوان منبع محرک حرارتی افکت دوم قرار می گیرد و این روند تا آخرین مرحله ادامه می یابد. با توجه به اختلاف درجه حرارت یکسان بین افکت های آب شیرین کن بسته به تعداد افکت (n) این مقدار از رابطه (۱۲) محاسبه می شود [10]:

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_n}{n - 1}$$

دمای هر افکت به اندازه ΔT از افکت قبل کمتر است. بنابراین دما در افکت $1 + z$ از رابطه ۱۳ محاسبه می شود:

$$T_{j+1} = T_j - \Delta T$$

دبی آب تغذیه (M_f) به طور مساوی با دبی F_i بین تمامی تأثیرها تقسیم می شود.

رابطه ۱۴:

$$F_n = \frac{F}{n}$$

روابط زیر مقدار دبی پساب و مقدار شوری پساب را در افکت اول و افکت j ام نشان می دهند:

رابطه ۱۵:

$$B_1 = f_1 - D_1$$

رابطه ۱۶:

$$B_j = F_j - D_j + B_{j-1}$$

رابطه ۱۷:

ها نور خورشید را به روی لوله جاذب حرارت منعکس می کنند و دمای سیال عبوری از آن را به 150°C تا 520°C می رسانند. این کلکتورها به دلیل ثابت بودن لوله جاذب بر خلاف کلکتورهای سهموی خطی با مشکلات آبندی لوله های جاذب روبه رو نیستند و می توانند برای تولید مستقیم بخار مافوق گرم استفاده شوند. میزان حرارت مفید جذب شده توسط این کلکتورها را می توان با رابطه (۷) نشان داد:

رابطه ۷:

$$Q_{LFR} = Q_{in} - Q_{hl\text{HTF}} - Q_{hl\text{piping}}$$

Q_{in} تشعشع حرارتی خورشیدی جذب شده توسط کلکتور خورشیدی است و توسط مشخصات نوری میدان خورشیدی و مشخصات مدل راندمان مشخص می شود.

رابطه ۸:

$$Q_{in} = \eta_{opt} \eta_{endloss} A_{field} DNI$$

η_{opt} و $\eta_{endloss}$ راندمانهای نوری و اتلافات انتهایی کلکتور هستند که توسط روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می شوند [8].

رابطه ۹:

$$\eta_{endloss} = 1 - \tan \theta_i \frac{L_f}{L}$$

θ_i زاویه اشعه خورشید با بردار نرمال سطح کلکتور، L طول دریافت کننده و L_f فاصله آینه ها تا لوله جاذب است. راندمان نوری کلکتور توسط رابطه (۱۰) محاسبه می شود:

رابطه (۱۰-۱۲):

$$\eta_{opt} = \eta_{opt,0} IAM_t IAM_L$$

$\eta_{opt,0}$ معرف بازده نوری در زاویه برخورد تابش خورشیدی صفر است و از زاویه اصلاحی برخورد طولی و عرضی ($IAM_t IAM_L$) برای محاسبه اتلافات نوری استفاده می شود.

$Q_{hl\text{HTF}}$ حرارت اتلافی از دریافت کننده خطی در خط کانونی کلکتور است. مقادیر $Q_{hl\text{HTF}}$ توسط رابطه (۱۱) محاسبه می شود که توسط آزمایشگاه انرژیهای تجدیدپذیر (NREL) ارائه شده است [9]:

رابطه ۱۱:

$$Q_{hl\text{HTF}} = A_0 + A_1(T_{\text{HTF}} - T_{\text{amb}}) + A_2 \cdot T_{\text{HTF}}^2 + A_3 \cdot T_{\text{HTF}}^3 + A_4 \cdot IAM_t \cdot IAM_L \cdot T_{\text{HTF}}^4 + \sqrt{V_w}(A_5 + A_6 \cdot (T_{\text{HTF}} - T_{\text{amb}}))$$

مقادیر ضرایب ثابت A_0, A_1, \dots, A_6 برای دریافت کننده مورد بررسی ارائه شدند (جدول ۱).

جدول ۱: ثابت های مربوط به رابطه افت های انتقال حرارتی لوله



$$\dot{E}_{X_{D.STC}} = \dot{E}_{X_{in}} - \dot{E}_{X_{out}} + \dot{E}_{X_{sun}}$$

تخریب انرژی آب شیرین کن چند اثره:
رابطه ۲۷:

$$\dot{E}_{X_{D.MED}} = \dot{E}_{X_{1}} - \dot{E}_{X_{13}} + \dot{E}_{X_{freshwa}} + \dot{E}_{X_{20}} - \dot{E}_{X_{21}} - \dot{E}_{X_{22}}$$

انرژی تابش خورشیدی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [11]:
رابطه ۲۸:

$$\dot{E}_{X_{sun}} = A_{field} DNI \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right) \right)$$

برای ارزیابی عملکرد سیستم بازده رفت و برگشت^{۱۵} و بازده ذخیره انرژی الکتریکی^{۱۶} به صورت زیر تعریف می‌شود [12]:
رابطه ۲۹:

$$\eta_{RTE} = \frac{\dot{W}_{TUR} + Q_{heat}}{\dot{W}_{com} + Q_U}$$

رابطه ۳۰:

$$\eta_{ESE} = \frac{\dot{W}_{TUR}}{\dot{W}_{com}}$$

در این تحقیق بازده توربین ۸۰ درصد و بازده کمپرسور ۹۰ درصد انتخاب شد و سایر پارامترهای اصلی طراحی سیستم در جدول شماره ۲ آورده شده است.
جدول ۲: فرضیات طراحی سیستم

| مقدار | واحد | مؤلفه |
|-------|------|-----------------------------------|
| ۴ | - | تعداد مرحله فشرده سازی |
| ۳ | - | تعداد مرحله انبساط |
| ۶/۹ | MPa | فشار ورودی توربین هوا |
| ۱۰ | MPa | بیشینه فشار خروجی کمپرسور |
| ۰/۵۴ | Kg/s | دبی هوا ورودی کمپرسور |
| ۳۰۲ | □ | دمای تانک دما بالا HOT |
| ۸۰ | □ | دمای آب گرم |
| ۹۰ | % | اثر بخشی مبدل حرارتی (بازده مبدل) |
| ۱۲ | - | تعداد افکت ها MED |

$$X_{B1} = \frac{X_{f1} F_1}{(F_1 - D_1)}$$

رابطه ۱۸:

$$X_{Bj} = \frac{X_{fj} F_j + B_{j-1} X_{Bj-1}}{(F_j - D_j)}$$

بخار آب تولید شده در هر افکت از رابطه ۱۹ محاسبه شده است:
رابطه ۱۹:

$$D_1 = \frac{1}{\lambda_1} [\dot{Q}_{MED} - F_1 C_p (T_1 - T_F)]$$

از رابطه ۲۰ برای بدست آوردن آنتالپی نهان استفاده شده است:
رابطه ۲۰:

$$\lambda = 2501.897149 - 2.407064037 \times T + 1.192217 \times 10^{-3} \times T^2 - 1.5863 \times 10^{-5} \times T^3$$

تجزیه و تحلیل انرژی

انرژی یک سیستم بخشی از انرژی است که می‌تواند در طول یک فرآیند به کار مفید تبدیل شود، انرژی کل جریان را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:
انرژی خاص را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:
رابطه ۲۱:

$$e_x = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$

که در آن دمای محیط و هم چنین آنتالپی خالص و آنتروپی خالص در شرایط محیطی محیط است.
برای تجزیه و تحلیل انرژی معمولی متغیرهای زیر تعریف شده است:

نرخ تخریب انرژی برای جز K:
رابطه ۲۲:

$$\dot{E}_{X_{D.K}} = \dot{E}_{X_{F.K}} - \dot{E}_{X_{P.K}}$$

رابطه هایی برای تخریب انرژی هر زیر سیستم در ادامه آمده است.
تخریب انرژی کمپرسور:
رابطه ۲۳:

$$\dot{E}_{X_{D.com}} = \dot{E}_{X_{in}} - \dot{E}_{X_{out}} + \dot{W}_{com}$$

تخریب انرژی مبدل حرارتی:
رابطه ۲۴:

$$\dot{E}_{X_{D.HEX}} = \sum \dot{E}_{X_{in}} - \sum \dot{E}_{X_{out}}$$

تخریب انرژی توربین:
رابطه ۲۵:

$$\dot{E}_{X_{D.TUR}} = \dot{E}_{X_{in}} - \dot{E}_{X_{out}} - \dot{W}_{TUR}$$

تخریب انرژی متمرکزکننده خورشیدی فرسول:
رابطه ۲۶:

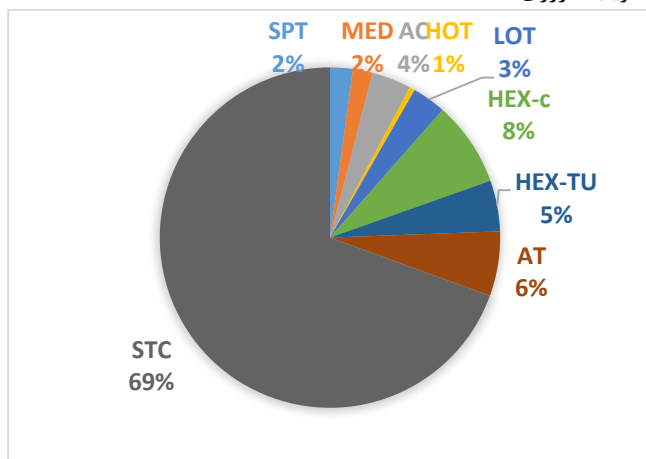
¹⁶ Electricity storage efficiency

¹⁵ Round-trip efficiency



| | | |
|-----------------------------------|---------------------------|--------|
| ظرفیت حرارتی (<i>kWh</i>) | $\dot{Q}_{heating\ load}$ | ۴۶۵ |
| آب گرم تولیدی (<i>ton</i>) | $m_{hot\ water}$ | ۹/۴ |
| آب شیرین تولیدی (<i>ton</i>) | $m_{fresh\ water}$ | ۴/۳ |
| بازده ذخیره انرژی الکتریکی (%) | η_{ESE} | ٪ ۷۳/۵ |
| بازده رفت و برگشت (%) | η_{RTE} | ٪ ۵۱/۸ |

اگرچه تحلیل انرژی می تواند جریان انرژی در سیستم را به تصویر بکشد، اما نمی توان کیفیت انواع مختلف انرژی را تعیین کرد. بنابراین تحلیل انرژی بر اساس قانون دوم ترمودینامیک نیز انجام می شود که به ما تخریب انرژی و بازگشت ناپذیری هر جز را می گوید. طبق شکل ۳ بیشترین تخریب انرژی در کلکتور های خورشیدی که این تخریب انرژی اجتناب ناپذیر است و سپس مبدل های حرارتی کمپرسور ها رخ می دهد. توربین، مبدل های حرارتی توربین و کمپرسور به ترتیب دارای بیشترین میزان تخریب انرژی بعد از مبدل های کمپرسور هستند. تخریب انرژی بالا در مبدل های حرارتی ناشی از اختلاف دمای زیاد بین جریان های سرد و گرم است. تخریب انرژی توربین بیشتر است زیرا بازده آیزنتروپیک آن کمتر از کمپرسور است. پمپ ها دارای کمترین تخریب انرژی هستند.



شکل ۳ تخریب انرژی اجزا سیستم

فهرست علائم

| | | |
|--------------------------------|--------------------------|-----|
| اختلاف دما بین افکت های MED | <input type="checkbox"/> | ۲/۲ |
| دما اولین افکت MED | <input type="checkbox"/> | ۶۵ |

نتایج و بحث

در جدول ۳ نتایج شبیه سازی سیستم تحت شرایط عملیاتی نشان می دهد. ماکزیمم ظرفیت توربین و کمپرسور به ترتیب 247 kW و 347 kW است. مدت زمان شارژ و تخلیه ۴ ساعت است کل توان مصرفی کمپرسور 1342 kWh و توان خروجی توربین 987 kWh است. قدرت خروجی توربین به شدت تحت تاثیر دمای روغن داغ تامین شده توسط کلکتور خورشیدی فرسند است. در این سیستم با کمک انرژی حرارتی خورشید که در یک مخزن روغن داغ (HOT) ذخیره و پایداری توان خروجی و انعطاف پذیری سیستم را بهبود می بخشد بنابراین دیگر نیازی به سوخت فسیلی نیست و مشکلات ناشی از سوخت های فسیلی در این سیستم وجود ندارد. از آب با دمای محیط برای بازیابی گرمای مرحله فشرده سازی استفاده می شود که باعث ایجاد آب گرم $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ می شود که در مخزن (HWT) ذخیره و برای مصرف آب گرم ساکنین مورد استفاده قرار می گیرد. مقدار ظرفیت حرارتی سیستم 465 kWh است. از روغن مخزن (LOT) به عنوان حرارت محرک آب شیرین کن استفاده که در یک روز $4/3$ تن آب شیرین تولید می شود. نتایج نشان می دهد که بازده ذخیره انرژی الکتریکی سیستم $73/5\%$ و بازده رفت و برگشت $51/8\%$ است. افزایش دمای ورودی به توربین و کاهش دمای ورودی به کمپرسور که موجب کاهش مصرف کمپرسور برای بهبود عملکرد سیستم ضروری است.

جدول ۳ نتایج حاصل از تحلیل انرژی

| مشخصات | نماد | مقادیر |
|----------------------------------------|-----------------|--------|
| ماکزیمم ظرفیت کمپرسور (<i>kW</i>) | \dot{W}_{COM} | ۳۴۷ |
| ماکزیمم ظرفیت توربین (<i>kW</i>) | \dot{W}_{TUR} | ۲۴۷ |
| توان مصرفی کمپرسور (<i>kWh</i>) | \dot{W}_{COM} | ۱۳۴۲ |
| توان خروجی توربین (<i>kWh</i>) | \dot{W}_{TUR} | ۹۸۷ |



- [4] Bagdanavicius Audrius, Jenkins Nick. Exergy and exergoeconomic analysis of a Compressed Air Energy Storage combined with a district energy system. *Energy Conversion and Management*. 2014;77:432-440.
- [5] Mohammadi Amin, Mehrpooya Mehdi . Exergy analysis and optimization of an integrated micro gas turbine, compressed air energy storage and solar dish collector process. *Cleaner Production*.2016.oi:10.1016/j.jclepro.2016.08.057
- [6] Ji Wei , Zhou Yuan, Yu Sun , Zhang Wu, Baolin An, Wang Junjie,. Thermodynamic analysis of a novel hybrid wind-solar-compressed air energy storage system. *Energy Conversion and Management*. 2017;142: 176-187.
- [7] Xiaotao Chen , Tong Zhang , Xiaodai Xue. A Solar–Thermal–Assisted Adiabatic Compressed Air, Energy Storage System and Its Efficiency Analysis. *Applied sciences*. 2018.
- [8] Rady M, Amin A, Ahmed M. Conceptual design of small scale multi-generation concentrated solar plant for a medical center in Egypt. *Energy Procedia*. 2015;83:289- 298.
- [9] Achour L, Bouharkat M, Behar O. Performance assessment of an integrated solar combined cycle in the southern of Algeria. *Energy Reports*. 2018;4:207-217.
- [10] Baniasad Askari Ighball, Ameri Mehran. The application of Linear Fresnel and Parabolic Trough solar fields as thermal source to produce electricity and fresh water. *Desalination*.2017;415: 90-103.
- [11] Hashemian Nasim, Noorpoor Alireza, Heidarnejad Parisa. Thermodynamic diagnosis of a novel solar-biomass based multi-generation system including potable water and hydrogen production. *Energy Equipment and Systems*.2019; 81-98.
- [12] Javidmehr Mohammad, Joda Fatemeh, Mohammadi Amin. Thermodynamic and economic analyses and optimization of a multi generation system composed by a compressed air storage, solar dish collector, micro gas turbine, organic Rankine cycle, and desalination system. *Energy Conversion and Management*.2018;168, 467–481.

| | |
|------|----------------------|
| CAES | ذخیره ساز هوا فشرده |
| TUR | توربین |
| HWT | تانک آب گرم |
| CWT | تانک آب سرد |
| HOT | تانک دما بالا روغن |
| LOT | تانک دما پایین روغن |
| MED | آب شیرین کن چند اثره |
| SPT | مخزن لوله فولادی |
| HEX | مبدل حرارتی |
| O | روغن |
| WA | آب |
| AR | هوا |
| In | ورودی |
| Out | خروجی |
| Isen | آیزنتروپیک |
| EX | آگزازی |
| Max | بیشترین |
| Min | کم ترین |

مراجع

- [1] Ibrahim H, Ilinc A. Contribution of the Compressed Air Energy Storage in the Reduction of GHG - Case Study: Application on the Remote Area Power Supply System. *InTech*. 2012; 337–364.
- [2] Jidai Wang , Kunpeng Lu , Lan Ma 1 , Jihong Wang ID , Mark Dooner , Shihong Miao , Jian Li and Dan Wang. Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development. *energies*.2017.
- [3] Budt Marcus, Wolf Daniel, Span Roland, Yan Jinyue, A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments, *Applied Energy*. 2016;170:250-268.

ACEC2021-69556

Optimum Results of Consumption of Energy in Plate Fin Heat Exchanger with Similar (SF) and Different (DF) Fin for Various Cold and Hot Mass Flow Rate

Zahra Hosseini¹, Hassan Hajabdollahi², Moharram Jafari³

¹ Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Iran; z.sadat.hosseini89@gmail.com

² Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran; H.Hajabdollahi@vru.ac.ir

³ Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Iran; mjafari@tabriz.ac.ir

Abstract

Thermoeconomic optimization of plate fin heat exchanger with similar (SF) and different (DF) or non-similar fin in each side are presented in this work. For this purpose, both heat exchanger effectiveness and total annual cost (TAC) are optimized simultaneously using multi-objective particle swarm optimization algorithm. The above procedure are performed for various mass flow rate in each side. The optimum results reveal that no thermoeconomic improvement is observed in the case of same mass flow rate in each side while both effectiveness and TAC are improved in the case of different mass flow rate. For example, effectiveness and TAC are improved 0.95% and 10.17% respectively, for the DF compared with SF. In fact, the fin configuration should be selected more compact in a side with lower mass flow rate compared with the other side in the thermoeconomic viewpoint. Furthermore, for the thermodynamic optimization viewpoint both SF and DF have the same optimum result while for the economic (or thermoeconomic) optimization viewpoint, the significant decrease in TAC is accessible in the case of DF compared with SF.

Keywords: Plate fin heat exchanger; Effectiveness; Total annual cost; Thermoeconomic optimization; Similar fin; Different fin

Introduction

Heat exchanger is a device that is used to transfer thermal energy between two or more fluids, between a solid surface and a fluid at different temperatures in thermal contact [1]. One of the common heat exchanger type is compact heat exchangers which are characterized by a large heat transfer surface area per unit volume of the exchanger, resulting in reduced space, weight, support structure and footprint, energy requirements and

cost, as well as improved process design and plant layout and processing conditions, together with low fluid inventory. Plate fin heat exchanger (PFHE) as shown in Fig. 1, is a typical compact heat exchanger which is widely used in many industrial plants, chemical, petrochemical, and petroleum industries. To increase the heat transfer area, secondary surface is connected to the primary surface. These extended surface elements are referred to as fins. There are many types of fins such as corrugated, louver, perforated, offset strip and pin fins [2]. Rectangular offset strip fins with high compactness, high heat transfer efficiency and high reliability as shown in Fig. 1 are used in this study. There are a lot of efforts for optimization of different types of heat exchangers with various objectives and various decision variables using the various methods. For example, Hajabdollahi et al. performed the optimization of different types of heat exchangers including the shell and tube [3-5], condenser [6], plate fin [7-9], fin tube [10-11], rotary regenerator [12] as well as gasket plate [13] by using different algorithms including the Genetic Algorithm [3-6, 6-13], Particle Swarm Algorithm [6], Firefly Algorithm [5] and by considering the different objective functions including total annual cost [3-8, 10-11,13], effectiveness [4-5, 7, 9-10, 12-13], pressure drop [9, 12], exergy efficiency [3, 8], entropy generation [8] and temperature approach [11].

2. Thermal modeling

In heat exchangers, there are usually no external heat and work interactions and the first law of thermodynamic in steady state yields:

$$\Delta H_c = \Delta H_h \quad (1)$$

where subscripts *c* and *h* represent the cold and hot stream. In this study, effectiveness-NTU (number of



transfer unit) method is used to estimate the heat exchanger thermal performance. The best heat exchanger flow arrangement is counterflow with the highest effectiveness. But in the PFHE, there are manufacturing difficulties with counterflow arrangement and as a result the cross flow arrangement is used. Effectiveness for the cross flow arrangement with both fluids unmixed is estimated as [2]:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left\{(1/C^*)NTU^{0.22} \times \left(\exp\left\{-C^*(NTU)^{0.78}\right\} - 1\right)\right\} \quad (2)$$

in which C^* and NTU are the number of transfer units and total heat capacity ratio defined as follows [1]:

$$NTU_{\max} = \frac{UA_{tot}}{C_{\min}} \quad (3)$$

$$C^* = C_{\min} / C_{\max} \quad (4)$$

where A_{tot} is total heat transfer area and U is the overall heat transfer coefficient. The overall heat transfer coefficient is a function of convection heat transfer resistance in each side (cold and hot) as well as conduction heat transfer resistance. Usually the very thin plate is used between the fins in each side and as a result the conduction resistance is negligible compared with the convection resistance. Based on the above assumption, the overall heat transfer coefficient is estimated as [2]:

$$U = \frac{1}{1/(h\eta_s)_c + \beta/(h\eta_s)_h} \quad (5)$$

where η_s is overall fins efficiency which is not necessarily same for each side. Moreover, β is hot and cold heat transfer surface area ratio and h is the convection heat transfer coefficient and defined as [2]:

$$h = StGc_p \quad (6)$$

where G is mass flux and St is Stanton number defined as:

$$St = j / Pr^{2/3} \quad (7)$$

in which Pr is the Prandtl number and j is Colburn factor. In this study rectangular offset strip fin with the following Colburn and Fanning friction factor correlations are used [25]:

$$j = 0.6522(Re)^{-0.5403} (\alpha)^{-0.1541} (\delta)^{0.1499} (\gamma)^{-0.0678} \times \left[\frac{1 + 5.269 \times 10^{-5} (Re)^{1.34}}{(\alpha)^{0.504} (\delta)^{0.456} (\gamma)^{-1.055}} \right]^{0.1} \quad (8)$$

$$f = 9.6243(Re)^{-0.7422} (\alpha)^{-0.1856} (\delta)^{0.3053} (\gamma)^{-0.2659} \times [1 + 7.669 \times 10^{-8} (Re)^{4.429} (\alpha)^{0.920} (\delta)^{3.767} (\gamma)^{0.236}]^{0.1} \quad (9)$$

the above correlations are accurate within $\pm 20\%$ and are valid for $120 < Re < 10^4$, $0.134 < \alpha < 0.997$, $0.012 < \delta < 0.048$ and $0.041 < \gamma < 0.121$ where:

$$\alpha = c/b \quad \delta = t_f/x \quad \gamma = t_f/c \quad (10-a-c)$$

where c , b , t_f , x are fin pitch, fin height, fin thickness and fin length, respectively. In addition, Re is Reynolds number as a function of mass flux, hydraulic diameter and viscosity defined as [2]:

$$Re = D_h G / \mu \quad (11)$$

Finally, the pressure drop by neglecting the inlet and outlet pressure drop in each side is estimated as [2]:

$$\Delta p = G^2 v_{in} / 2 \left[(1 + \sigma^2) (v_{out} / v_{in} - 1) + f \frac{A_{tot}}{A_{flow}} \frac{v_{ave}}{v_{in}} \right] \quad (12)$$

where A_{flow} , v and σ are the free flow cross-sectional area, specific volume and ratio of minimum free-flow area to frontal area.

Details of computing heat transfer surface area, free flow cross-sectional area, overall fins efficiency, and reduction of heat exchanger effectiveness due to longitudinal wall heat conduction as well as mass flux are referred to reference [7].

3- Economic modeling

Total annual cost (TAC) of compact heat exchangers is in term of initial cost (annual cost of total heat transfer surface area) and operational cost for electricity consumption by compressor to overcome the friction as follows [7]:



$$TAC = afC_{in} + C_{op} \quad (13)$$

$$C_{in} = c_1 \times A_{tot}^{c_2} \quad (14)$$

$$C_{op} = \left\{ \left(\frac{\Delta p V}{\eta} \right)_c + \left(\frac{\Delta p V}{\eta} \right)_h \right\} \phi_e N \quad (15)$$

where C_{in} , C_{op} , η , V , ϕ_e and N are investment cost, operational cost, compressor efficiency, volume flow rate, electricity unit price and operation hours in a year, respectively. Furthermore, c_1 and c_2 are constants and af is annual cost coefficient defined as:

$$af = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-y}} \quad (16)$$

where i and y are interest rate and life time, respectively.

4- Objective functions, design parameters and constraints

In this paper, both effectiveness and TAC are considered as two simultaneous objective functions to cover both thermal and economic aspects. Furthermore, both fin geometry, including fin pitch (c), fin height (b), fin offset length (x), and heat exchanger geometry, including cold stream flow length (L_c), no-flow length (L_n) and hot stream flow length (L_h) are considered as six design parameters.

The constraints are also introduced as follows:

$$\alpha - 0.997 < 0 \quad (17)$$

$$-\alpha + 0.134 < 0 \quad (18)$$

$$\delta - 0.048 < 0 \quad (19)$$

$$-\delta + 0.012 < 0 \quad (20)$$

$$\gamma - 0.121 < 0 \quad (21)$$

$$-\gamma + 0.041 < 0 \quad (22)$$

5. Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) Algorithm

In the multi objective optimization problem, several objectives are optimized simultaneously. Traditionally,

the sum of objectives with different weighting coefficients are considered but the best way is obtaining the optimal Pareto front which is a set of non dominated points. In this study, the MOPSO algorithm is used to get the optimal Pareto front. This algorithm is inspired from the bird migration and finding the best place using the swarm intelligence [12]. The design parameters (decision variables) represent the position of each bird which are produced randomly in the first iteration. Then the position of each bird is updated based on the best global solution and the best position of each particle over time as follows [26]:

$$v_{j+1}^i = wv_j^i + c_1 rand(p^i - x_j^i) + c_2 rand(p_j^g - x_j^i) \quad (23)$$

$$x_{j+1}^i = x_j^i + v_{j+1}^i \quad (24)$$

where i represents the i th particle in the swarm and j represents the each iteration. The terms p_k^g and p^i show the best global solution in the swarm and the best position of each particle over time. Furthermore w , c_1 and c_2 are the inertia weight, self confidence factor and swarm confidence factor, respectively and $rand$ is the random number generated uniformly in the range of [0-1]. Details of MOPSO algorithm are referred to references [13-15].

6- Case study

The PFHE optimum design parameters are obtained for a gas furnace in a tile factory located in northwest of Kerman city, the biggest province in Iran. Furnace temperature is about $380K$ in initial stages and about $1200K$ in the last stages. The hot gas (hot stream) exits from middle stages of furnace and passes through the heat exchanger at $550K$. The fresh air (cold stream) passes through the exchanger at $300K$. Operating conditions and the other constants used in the thermoeconomic modeling are listed in Table. 1 [7]. The thermophysical properties of air such as Prandtl number, viscosity and specific heat are considered as a function of temperature.

Table.1. The operating conditions and constants

| Parameter | Value |
|----------------------------|-------|
| Inlet hot temperature (K) | 550 |
| Inlet cold temperature (K) | 300 |



| | |
|-----------------------------------|------|
| Inlet pressure (hot side) (kPa) | 200 |
| Inlet pressure (cold side) (kPa) | 150 |
| c_1 (\$/m ²) | 90 |
| c_2 (-) | 0.6 |
| Hours of operation (hour/year) | 5000 |
| Unit price of electrical (\$/MWh) | 20 |
| Compressor efficiency (-) | 0.6 |
| Interest rate (-) | 0.1 |
| Life time (year) | 10 |

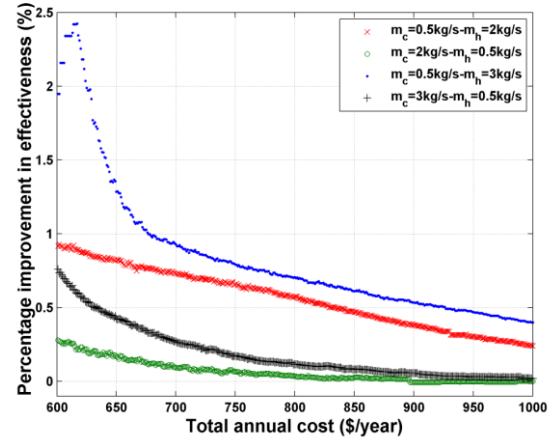


Fig. 4. Percentage improvement in effectiveness in DF compared with SF for various cold and hot mass flow rate

7. Results and discussion

To maximize the effectiveness and minimize the TAC, MOPSO algorithm is used for 300 iterations, using 100 particles, inertia weight of $w = 0.5$, self confidence factor of $c_1 = 1.80$ and swarm confidence factor $c_2 = 1.80$ for each study. Two cases including the similar fin (SF) for both hot and cold sides and different fin (DF) in each side are investigated. To generalize the results, the optimization is performed for six different set of cold and hot mass flow rates including 0.5-0.5, 1-1, 0.5-2, 2-0.5, 0.5-3 and 3-0.5 kg/s. Six design parameters (three of them for heat exchanger geometry and three of them for the same fins in each side) are selected in SF while nine design parameters (three for heat exchanger geometry and six of them for the different fins in each side) are selected in DF. To have a good insight for the improvement in each fixed TAC, percentage improvement in effectiveness and for DF compared with SF for optimum design point in Figs. 2c-f, are calculated and shown in Fig. 4. As it is shown, the improvement in effectiveness is proportional with lower values of C^* . It is worth mentioning that the C^* for the $m_c=0.5$ and $m_h=3$ kg/s is lower than that in $m_c=3$ and $m_h=0.5$ kg/s because of higher specific heat in the higher temperature.

7.1. Optimum fin parameters

In this study, two kinds of design parameters including the fin related parameters (pitch, height, length) and heat exchanger parameters (hold steam length, cold stream length, no flow length) are selected. The optimum selected values of fin parameters versus effectiveness in the case of $C^*=1$ ($m_c=m_h=0.5$ kg/s) and for both SF and DF situation are shown in Fig. 5. The effectiveness of heat exchanger increases by increase of heat exchanger compactness (by decrease of fin pitch and fin height) while the TAC increases. In fact, by decrease of fin pitch and height, the flow passage decreases and as a result the Reynolds number, convection heat transfer coefficient, overall heat transfer coefficient, Nusselt number and finally effectiveness increase. The mentioned increases is limited to the constraints introduced in the end of section 4 and fin pitch remain constant and effectiveness vary by variation of other design parameters. Furthermore, by increase of compactness, both investment and operational cost (higher pressure drop in result of higher Reynolds number) increase. As it is shown in Fig. 5, the trend of optimum fin parameters for both SF and DF are the same. The results demonstrate that the optimum selected fin parameters in the DF (for each side) are around of optimum selected fin parameters in the SF.

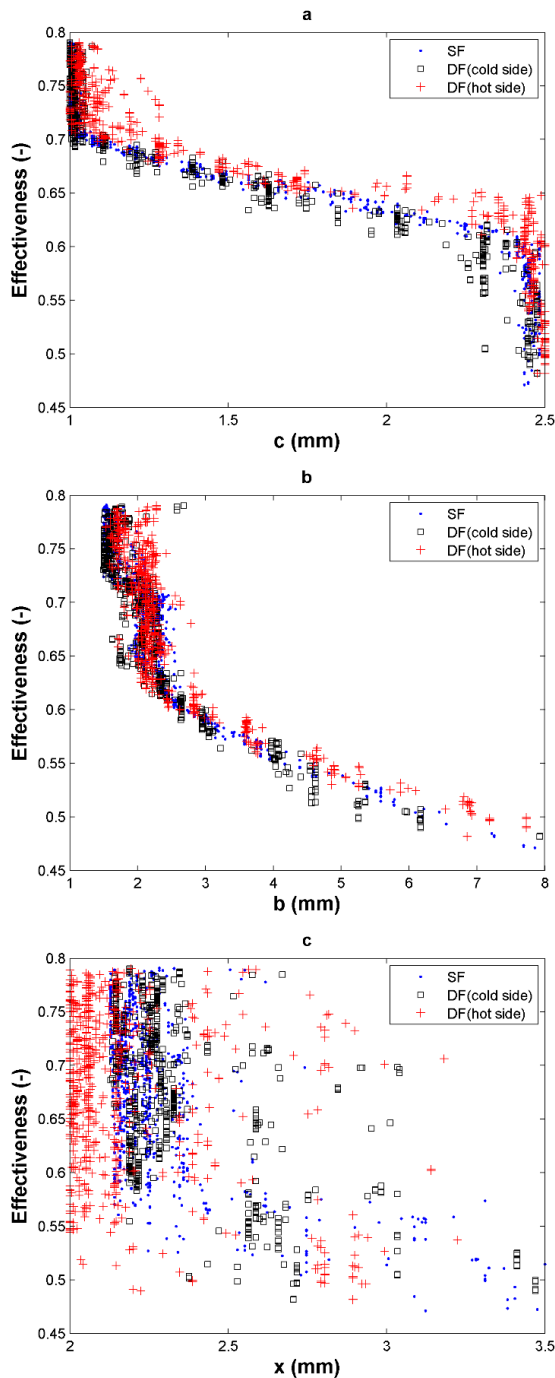


Fig. 5. Values of fin parameters in the optimum points presented in Fig. 2 for the case of $m_c=m_h=0.5\text{kg/s}$
a: fin pitch, **b:** fin height, **c:** fin length

7.2. Selection of final optimum solution

To finalize the multi objective optimization problem, it is desirable to introduce the final optimum point among the set of non dominated points in the Pareto front. In

this study, the concept of ideal point as shown in Fig. 2a and LINMAP method is used to select the final optimum solution [15-16]. The final optimum values of effectiveness as well as the TAC for the Pareto front presented in Figs. 2c-f and for both DF and SF cases are listed in Table. 3. In addition the percent of improvement in objective functions in DF compared with SF are also listed in Table. 4. The effectiveness is relatively improved for 0.69, 0.40, 0.95 and 0.62% in DF compared with SF for the various mass flow rates listed in Table. 4. The above percentages for TAC are obtained 9.70, 8.51, 9.75 and 10.17%, respectively which verify the thermoeconomically improvement in DF compared with SF.

Table.3. The final optimum values of objective functions for different mass flow rate in each side

| Case | SF | | DF | |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Effectiveness | TAC (\$/year) | Effectiveness | TAC (\$/year) |
| $m_c=0.5$ $m_h=2\text{kg/s}$ | 0.8429 | 493.3701 | 0.8487 | 445.5113 |
| $m_c=2$ $m_h=0.5\text{kg/s}$ | 0.8280 | 442.9747 | 0.8313 | 405.2704 |
| $m_c=0.5$ $m_h=3\text{kg/s}$ | 0.8714 | 629.7828 | 0.8797 | 568.3766 |
| $m_c=3$ $m_h=0.5\text{kg/s}$ | 0.8641 | 548.0870 | 0.8695 | 492.3691 |

Table.4. The percent of improvement in the objective functions for DF compared with SF

| | Values of effectiveness improvement in DF compared with SF (%) | Values of TAC improvement in DF compared with SF (%) |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| $m_c=0.5$ $m_h=2\text{kg/s}$ | 0.69 | 9.70 |
| $m_c=2$ $m_h=0.5\text{kg/s}$ | 0.40 | 8.51 |
| $m_c=0.5$ $m_h=3\text{kg/s}$ | 0.95 | 9.75 |
| $m_c=3$ $m_h=0.5\text{kg/s}$ | 0.62 | 10.17 |

8. Conclusions

Thermoeconomic optimization of plate fin heat exchanger with similar (SF) and different (DF) fins in each side were presented in this work. For this purpose, both heat exchanger effectiveness and TAC were optimized simultaneously by considering the fin pitch, fin height, fin offset length, cold stream flow length, no-



flow length and hot stream flow length as design parameters. To generalize the optimization results, the above procedure was performed for various hot and cold mass flow rate in each side.

The following points were inferred:

- The heat exchanger was not thermoeconomically improved in the case of same mass flow rate in each side.
- Significant thermoeconomic improvement was observed in the case of different mass flow rate in each side.
- The fin configuration was selected lower (more compact) in a side with lower mass flow rate compared with the other side in the thermoeconomic optimum point.
- As well as the thermoeconomic improvement, the heat exchanger volume was also improved in DF compared with SF in the case of different mass flow rate in each side.
- Finally, for the thermodynamic optimization viewpoint both SF and DF had the same optimum result while for the economic (or thermoeconomic) optimization viewpoint, the significant decreases in TAC was possible in the case of DF compared with SF and for the case of different mass flow rate.

Nomenclature

A_{flow} free flow cross-sectional area (m^2)

A_{tot} total heat transfer area (m^2)

af annualized factor (-)

b fin height (m)

c specific heat (J/kgK)

c fin pitch (m)

C_{min} minimum of Ch and Cc (W/K)

C_{max} maximum of Ch and Cc (W/K)

C^* heat capacity rate ratio (C_{min}/C_{max})

C_{in} investment cost (\$/year)

C_{op} operational cost (\$/year)

D_h hydraulic diameter (m)

f friction factor (-)

G mass flux (kg/m^2s)

h heat transfer coefficient (W/m^2K)

j Colburn number (-)

k_f fin conductivity ($W/m.K$)

L_c cold stream flow length (m)

L_h hot stream flow length (m)

L_n no-flow length (m)

N operational hours in a year

NTU number of transfer units (-)

Pr Prandtl number (-)

r interest rate (-)

Re Reynolds number (-)

St Stanton number (-)

TAC total annual cost (\$/year)

t_f fin thickness (m)

U overall heat transfer coefficient (W/m^2K)

V volumetric flow rate (m^3/s)

x fin length (m)

y life time (year)

Greek abbreviation

ε heat exchanger effectiveness (-)

η compressor efficiency (-)

β ratio of hot and cold surface area (-)

μ viscosity (Pa.s)

ν specific volume (m^3/kg)

ΔP pressure drop (Pa)

σ ratio between A_{flow} and A_{front} (A_{flow}/A_{front})



φ_e unit price of electrical ($\$/MWh^{-1}$)

Subscripts

c cold

h hot

References:

- [1] R.K. Shah, P. Sekulic, Fundamental of Heat Exchanger Design. John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [2] W.M. Kays, A.L. London, Compact Heat Exchangers, 3rd ed., Mc-Graw Hill, New York, 1984.
- [3] Hassan. Hajabdollahi, Pouria Ahmadi, Ibrahim Dincer. Exergetic optimization of shell-and-tube heat exchangers using NSGA-II. Heat Transfer Engineering 33 (2012) 618-628.
- [4] Sepehr. Sanaye, Hassan. Hajabdollahi, Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers, Applied Thermal Engineering 30 (2010) 1937-1945.
- [5] Rihanna Khosravi, Abbas Khosravi, Saeid Nahavandi, Hassan Hajabdollahi, Effectiveness of evolutionary algorithms for optimization of heat exchangers, Energy Conversion and Management, 89, (2015), 281-288
- [6] Hassan. Hajabdollahi, Pouria. Ahmadi , Ibrahim. Dincer. Thermo-economic optimization of a shell and tube condenser using evolutionary algorithm" International Journal of Refrigeration 34 (2011) 1066-1076.
- [7] Sepehr. Sanaye, Hassan. Hajabdollahi, Thermal-Economic Multi-objective Optimization of Plate Fin Heat Exchanger Using Genetic Algorithm, Applied Energy 87 (2010) 1893–1902.
- [8] Pouria. Ahmadi, Hassan. Hajabdollahi, Ibrahim. Dincer "Cost and Entropy generation minimization of a cross flow Plate-Fin Heat Exchanger (PFHE) using Multi-Objective genetic algorithm" ASME Transaction, Journal of Heat Transfer 133 (2010) 021801.
- [9] Hassan. Hajabdollahi, Mojtaba Tahani , M.H. shojaee fard. CFD modeling and multi-objective optimization of compact heat exchanger using CAN method, Applied Thermal Engineering 31 (2011) 2597-2604.
- [10] Hassan Hajabdollahi, Pouria Ahmadi, Ibrahim Dincer "Modeling and Multi-Objective Optimization of Plain Fin and Tube Heat Exchanger Using Evolutionary Algorithm" International Journal of Thermophysics and Heat Transfer 3 (2011) 424-431.
- [11] Amir hesan kashani nia, mohammad madahi, Hassan. Hajabdollahi, Thermo-economic optimization of Air cooler heat exchanger. Applied thermal engineering 54 (2013) 43-55.
- [12] Kennedy J, Eberhart R, Particle swarm optimization, in: IEEE International Conference Neural Networks, 1995, 1942–48.
- [13] Coello C.A.C, Pulido G.T, Lechuga M.S, Handling multiple objectives with particle swarm optimization, IEEE Transactions on Evolutionary Computation 2004; 8 (3): 256–79.
- [14] Sepehr. Sanaye, Hassan. Hajabdollahi, 4E analysis and Multi-objective Optimization of CCHP Using MOPSOA. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. (2013) doi: 0954408912471001.
- [15] Ehsan Khorasaninejad, Hassan Hajabdollahi, Thermo-Economic and Environmental Optimization of Solar assisted Heat Pump Plant by using Multi-Objective Particle Swarm Algorithm, Energy, 72 (2014) 680-690.
- [16] Zahra Hajabdollahi, Farzaneh Hajabdollahi, Mahdi Tehrani, Hassan Hajabdollahi. Thermo-economic environmental optimization of Organic Rankine Cycle for diesel waste heat recovery. Energy 63 (2013) 142-151.

ACEC2021-70382

بهره‌برداری بهینه از یک سیستم انرژی ترکیبی مبتنی بر نیروگاه آبی تلمبه ذخیره‌ای به کمک برنامه پاسخگویی بار

پیمان بخشایی^۱، علیرضا عسکرزاده^۲، رضا عرب‌آبادی^۳

^۱دانشجو، پژوهشگر انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، peymanbakhshaie@gmail.com

^۲دانشیار، پژوهشگر انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران - a.askarzadeh@kgut.ac.ir

^۳استادیار، پژوهشگر انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، reza.arababadi@gmail.com

چکیده

تمرکز اصلی این پژوهش، بهره‌برداری بهینه از یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز و برنامه پاسخگویی بار است. بدین منظور، در کنار سیستم فتوولتائیک، از سیستم تلمبه ذخیره‌ای به عنوان ذخیره‌ساز استفاده شده است. توان خریداری شده از شبکه در طول دوره بهره‌برداری و مقدار پاداش پرداخت شده به مشترکینی که در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا شرکت می‌کنند به عنوان متغیرهای تصمیم مسئله بهره‌برداری در نظر گرفته شده‌اند. کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری با در نظر گرفتن سطح قابلیت اطمینان مطلوب به کمک یک نسخه بهبود یافته از الگوریتم جستجوی کلاغ انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که استفاده بهینه از برنامه پاسخگویی بار به طور متوسط هزینه بهره‌برداری از سیستم را حدود ۱۳ درصد کاهش می‌دهد. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌های ارائه شده عملکرد بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: سیستم ترکیبی فتوولتائیک/تلمبه‌ذخیره‌ای متصل به شبکه - برنامه پاسخگویی بار - پاداش بهینه پرداختی به مشترکین - الگوریتم جستجوی کلاغ مبتنی بر انتخاب مسابقه‌ای

۱- مقدمه

سیستم‌های انرژی مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، پاک، پایدار و دارای هزینه بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری پایین در مقایسه با سوخت‌های فسیلی می‌باشند. در میان منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی به دلیل در دسترس بودن در اکثر نقاط دنیا، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. در یک سیستم مبتنی بر خورشید به دلیل تفاوت

میزان تابش در طول روز و به منظور بالا بردن قابلیت اطمینان، به تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی نیاز است. ذخیره‌ساز زمانی که تولید بیش از تقاضا باشد انرژی را ذخیره کرده و در شرایط کمبود تولید (به دلیل کاهش تابش) تامین تقاضا را بر عهده می‌گیرد. سیستم‌های سنتی، از بانک باتری به عنوان ذخیره‌ساز انرژی استفاده می‌کنند با وجود اینکه باتری‌ها نصب آسان و بازدهی بالایی دارند، طول عمر پایین (نیاز به جایگزینی دوره‌ای) و هزینه بالا استفاده از آنها را محدود می‌کند. علاوه بر این، باتری‌ها، به دلیل ماهیت شیمیایی موجب نگرانی‌های زیست محیطی می‌شوند. این اشکالات استفاده از باتری‌ها را محدود می‌نماید. سیستم تلمبه ذخیره‌ای (PHS)، نوعی ذخیره‌ساز انرژی است که از آب برای ذخیره انرژی استفاده می‌نماید. این تجهیز نیاز به دو منبع با دو ارتفاع متفاوت دارد. در بازه‌های غیر پیک، سیستم تلمبه ذخیره‌ای از مازاد انرژی برای پمپ کردن آب از مخزن با ارتفاع پایین‌تر به مخزن بالاتر استفاده می‌نماید. در زمان‌های پیک، آب ذخیره شده در مخزن بالاتر رها شده و با عبور از یک توربین، برق تولید می‌کند. سیستم تلمبه ذخیره‌ای از نوع تجدید پذیر با طول عمر بالا، هزینه بهره‌برداری پایین و آلودگی ناچیز است. استفاده همزمان از سیستم‌های فتوولتائیک و تلمبه ذخیره‌ای می‌تواند یک سیستم ترکیبی امیدوار کننده، در جهت کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و همچنین آلودگی باشد.

در سیستم‌های قدرت، مصرف‌کنندگان می‌توانند نقش چشمگیری در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ایفا نمایند. برنامه‌های پاسخگویی

^۱ . Pumped hydro storage (PHS)

مقایسه و برتری الگوریتم ارائه شده را در یافتن پاسخ بهینه نسبت به بقیه روشها نشان داده است.

پاسخگویی بار (DR) به اعمالی گفته می‌شود که در جهت تغییر الگوی مصرف برق توسط مشترکین در پاسخ به تغییرات قیمت و یا ارائه مشوق به آنها صورت می‌گیرد [۷]. به طور کلی برنامه‌های پاسخگویی بار به دو دسته مبتنی بر قیمت (PB)^۸ و مبتنی بر زمان (TB)^۹ تقسیم‌بندی می‌شوند. تحقیقات مختلفی در خصوص میزان تاثیر برنامه‌های پاسخگویی بار بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم‌های ترکیبی انجام شده است. در مرجع [۸]، آخرین تعریف و همچنین دسته‌بندی برنامه‌های پاسخگویی تقاضا ارائه شده است. همچنین، تاثیر اجرای این برنامه‌ها در سیستم‌های ترکیبی که از منابع تجدیدپذیر استفاده می‌کنند، مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۹]، روشی برای مدل‌سازی یک سیستم ترکیبی تجدیدپذیر، شامل خورشیدی، بادی، دیزل ژنراتور و همچنین باتری به عنوان پشتیبان، از مراحل ابتدایی طراحی تا بهره‌برداری بهینه به همراه جزئیات مدل‌سازی هریک از تجهیزات ارائه شده است. راهبرد مدیریت انرژی از دو دیدگاه سمت تقاضا و تولید با هدف تامین تقاضا و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و آلاینده‌گی برای یک واحد مسکونی در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی بر اساس بهینه سازی افق پسر و^{۱۰} برنامه‌های پاسخگویی بار و پیش بینی هوای روز بعد انجام شده است به طور کلی می‌توان اهداف این مقاله را این‌گونه برشمرد:

- تعیین مقدار بهینه مقدار پاداش برنامه پاسخگویی بار در یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک/تلمبه ذخیره‌ای متصل به شبکه
- تعیین مقدار بهینه توان خریداری شده از شبکه برای کمینه کردن هزینه بهره‌برداری

۲- معرفی سیستم

ساختار کلی یک سیستم ترکیبی شامل فتوولتائیک و تلمبه ذخیره‌ای متصل به شبکه در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم شامل پانل‌های فتوولتائیک، اینورتر، واحد تلمبه ذخیره‌ای و شبکه برق می‌باشد. PHS به تنهایی از تانک ذخیره با ارتفاع بالاتر، تانک برداشت آب با سطح ارتفاع پایین‌تر و دو مسیر لوله برای پر کردن و تخلیه آب از منبع بالا به سمت توربین تشکیل شده است. به طور کلی، عملکرد سیستم ترکیبی معرفی شده را می‌توان بر اساس قواعد ذیل شرح داد:

- در هر ساعت، اگر توان تولید شده توسط فتوولتائیک بیش از مقدار بار باشد، توان اضافی می‌تواند صرف پمپ کردن آب به مخزن بالا شود و یا به شبکه برق فروخته شود.

تقاضا (DRP)^۲ این فرصت را برای مصرف کنندگان به وجود می‌آورد تا در بهره‌برداری از شبکه، با جابجایی یا کاهش مصرف در زمان پیک در پاسخ به مشوق‌های اقتصادی، شرکت نمایند. این مشوق‌ها می‌توانند پرداخت مبلغی به مصرف‌کننده برای کاهش بار و یا تعیین جریمه برای عدم کاهش بار و یا هر دو باشند.

سیستم‌های ترکیبی شامل فتوولتائیک و تلمبه ذخیره‌ای در مقالات متعدد از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱] با استفاده از یک سیستم ترکیبی شامل فتوولتائیک، تلمبه ذخیره‌ای و دیزل ژنراتور، مدلی برای بهینه کردن هزینه برق روزانه یک مزرعه ارائه شده است. این مدل هزینه برق مصرفی توسط بار را به میزان ۷۱/۳٪ در مقایسه با حالتی که انرژی برق تنها توسط دیزل ژنراتور تامین می‌شد کاهش داده است. در مرجع [۲] یک مدل واقعی از یک واحد تلمبه ذخیره‌ای با در نظر گرفتن دبی آب، سطح آب در منابع، میزان تبخیر و تلفات لوله معرفی شده است و با استفاده از این مدل میزان خطا در تخمین میزان آب در منابع از ۱۳/۱۷٪ به ۰/۷۴٪ کاهش یافته است. در مرجع [۳]، مطالعه دقیقی بر سیستم‌های ترکیبی بر پایه خورشید و باد انجام داده است که از واحد تلمبه ذخیره‌ای به عنوان ذخیره‌کننده استفاده می‌کند. در این مرجع، نقش واحد تلمبه ذخیره‌ای و چالش‌های فنی استفاده از این ذخیره‌ساز در سیستم‌های ترکیبی مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر بررسی شده است. در مرجع [۴]، یک مدل برای مدیریت بهینه انرژی برای یک سیستم تلمبه ذخیره‌ای متصل به شبکه ارائه شده است. هدف این تحقیق، کاهش هزینه از طریق کاهش مصرف برق شبکه و افزایش سود از طریق فروش برق به شبکه بر اساس قیمت گذاری زمان مصرف در روزهای هفته و آخر هفته می‌باشد. در مرجع [۵]، ارزیابی فنی-اقتصادی یک سیستم ترکیبی تجدیدپذیر که از ذخیره‌سازهایی شامل باتری، تلمبه ذخیره‌ای و ذخیره‌ساز مبتنی بر هیدروژن استفاده می‌کند، در ۹ سناریو متفاوت از لحاظ هزینه خالص فعلی (NPC)^۳، هزینه انرژی سطح‌بندی شده (LCOE)^۴، دوره بازگشت سرمایه، آلودگی زیست محیطی و تجدیدپذیر بودن در کشور عربستان انجام شده است. در این مرجع ثابت شده است که استفاده از باتری و واحد تلمبه ذخیره‌ای بازدهی بهتری از لحاظ فنی و اقتصادی در مقایسه با ذخیره‌سازهای مبتنی بر هیدروژن دارد. در مرجع [۶] یک الگوریتم بهبود یافته از الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA)^۵ به منظور بهره‌برداری بهینه از یک سیستم ترکیبی شامل پانل‌های فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و تلمبه ذخیره‌ای ارائه شده است. سپس نتایج به دست آمده را با نتایج حاصل از الگوریتم‌های (GA)^۶ و (PSO)^۷ و (CSA)

۲ . Demand response program (DRP)

۳ . Net present cost (NPC)

۴ . Levelized cost of energy (LCOE)

۵ . Crow search algorithm (CSA)

۶ . genetic algorithm (GA)

۷ . Particle swarm optimization (PSO)

۸ . Price based (PB)

۹ . Time based (TB)

۱۰ . Receding horizon optimization



$$\frac{P_{p,2}}{P_{p,1}} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (6)$$

$$\frac{P_{p,2}}{P_{p,1}} = \left(\frac{Q_{p,2}}{Q_{p,1}}\right)^3 \quad (7)$$

$$P_p = \frac{\rho \times g \times H_{tot} \times Q_p}{\eta_p}; H_{tot} = L + H + H_f \quad (8)$$

$$H_f = \frac{8 \times f \times (L + H) \times Q^2}{\pi^2 \times g \times d^5} \quad (9)$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{RE^{0.9}}\right)\right]^2} \quad (10)$$

در حالت توربین، مجموع توان تولیدی توسط PHS و بازدهی توربین ژنراتور به ترتیب از طریق روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند. همچنین، تلفات ناشی از ارتفاع فشاری اصطکاکی و ضریب اصطکاک از طریق روابط (۱۳) و (۱۴) به دست می‌آیند.

$$P_{turbine} = \eta_t \times \rho \times Q_t \times g \times (H_{stat} - H_f) \quad (11)$$

$$H_{stat} = H + h$$

$$\eta_t = \eta_{max} \left(1 - \left(\frac{\rho \times g \times H_{stat} \times Q_t}{P_{turbine}^n} - 1\right)^2\right) \quad (12)$$

$$H_f = \frac{8 \times f \times (L + H) \times Q^2}{\pi^2 \times g \times d^5} \quad (13)$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{RE^{0.9}}\right)\right]^2} \quad (14)$$

پس از تعیین مقدار دبی، سطح آب موجود در منبع با ارتفاع بالاتر می‌بایست از طریق رابطه (۱۵) برورسانی شود.

$$h_{i+1} = h_i + \frac{Q_p - Q_t}{A} \times 3600 \quad (15)$$

در این تحقیق ویسکوزیته آب 10^{-3} و همچنین جنس لوله‌ها استیل و ضریب زبری آن 0.045 میلی متر در نظر گرفته شده است [۱۶].

۳-۲ شبکه برق

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، هدف اصلی این مقاله، کمینه کردن هزینه بهره‌برداری از یک سیستم ترکیبی شامل PV و PHS متصل به شبکه می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، توان خریداری شده از شبکه در هر ساعت به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. مقدار پاداش پرداختی به مصرف کنندگانی که در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا شرکت می‌کنند نیز به عنوان دیگر متغیر تصمیم این مسئله در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تغییرات قیمت برق در ساعات مختلف شبانه روز (برنامه‌های پاسخگویی بار بر اساس زمان

- در هر ساعت، اگر توان تولید شده توسط فتوولتائیک کمتر از میزان تقاضا باشد، کمبود توان از طریق PHS و یا خرید از شبکه برق اصلی تامین می‌شود.
- مصرف کنندگانی که در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا شرکت می‌کنند، مبلغی به عنوان پاداش دریافت می‌نمایند.

۱-۲ سیستم فتوولتائیک

انرژی خورشیدی یکی از در دسترس‌ترین و فراوان‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر است. میزان توان خروجی که توسط سیستم فتوولتائیک تولید می‌شود از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۱].

$$P_{pv}(t) = \begin{cases} N_{pv} \times p_{pvr} \times \left(\frac{R_a^2(t)}{R_s \times R_c}\right) & 0 \leq R_a(t) < R_c \\ N_{pv} \times p_{pvr} \times \left(\frac{R_a(t)}{R_s}\right) & R_c \leq R_a(t) < R_s \\ N_{pv} \times p_{pvr} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

۲-۲ سیستم تلمبه ذخیره‌ای

سیستم تلمبه ذخیره‌ای دارای دو حالت عملکرد پمپ و توربین است. در حالت پمپ، روابط (۲) و (۳) استفاده می‌شوند که بیانگر بازدهی و ارتفاع فشاری^{۱۱} در سرعت نامی و بر اساس تابعی از دبی پمپ هستند. ضرایب این معادلات بر اساس برازش منحنی‌های بازده و ارتفاع فشاری به دست آمده‌اند [۱۳]. معادلات (۴) تا (۷) قوانین همبستگی می‌باشند که روابط بین چندین متغیر موثر در عملکرد پمپ را نشان می‌دهند. این روابط به منظور پیش بینی اثر سرعت چرخش در بازدهی پمپ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴]. معادله (۸) رابطه ارتفاع فشاری کل (مجموع ارتفاع فشاری ایستا و اصطکاکی) و دیگر پارامترها را بیان می‌کند. برای محاسبه ارتفاع فشاری اصطکاکی (که در اثر اصطکاک در لوله‌ها پدید می‌آید) از رابطه (۹) استفاده شده است که به رابطه "دارسی ویسباخ"^{۱۲} معروف می‌باشد. ضریب اصطکاک نیز از رابطه (۱۰) به دست می‌آید [۱۵].

$$H_{tot@Nn} = -4.3101 \times 10^{-4} Q_p^2 + 8.2743 \times 10^{-3} Q_p + 80.1504 \quad (2)$$

$$\eta_{p@Nn} = -1.5916 \times 10^{-3} Q_p^2 + 6.2862 \times 10^{-1} Q_p + 15.0059 \quad (3)$$

$$\frac{Q_{p,2}}{Q_{p,1}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (4)$$

$$\frac{H_{tot,2}}{H_{tot,1}} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (5)$$

^{۱۱}. Head

^{۱۲}. Darcy-Weisbach

قطری که متناظر با ضرایب الاستیسیته متقابل می‌باشند، به صورت تغییرات بار در بازه زمانی \bar{t} به ازای تغییرات قیمت در بازه زمانی \bar{j} تعریف می‌شوند [۲۵]:

$$\begin{bmatrix} \Delta d(1) \\ \Delta d(2) \\ \Delta d(3) \\ \dots \\ \Delta d(24) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(1,1) & \dots & E(1,24) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E(24,1) & \dots & E(24,24) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \rho(1) \\ \Delta \rho(2) \\ \Delta \rho(3) \\ \dots \\ \Delta \rho(24) \end{bmatrix} \quad (17)$$

۱-۵-۲ مدل‌سازی بارهای الاستیک تک دوره‌ای

بر اساس طرح تشویقی، میزان تغییر در تقاضا از سوی مشتری (Δd) از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$\Delta d(i) = d_0(i) - d(i) \quad (18)$$

بنابراین، مجموع مبلغ پاداش پس از کاهش مصرف از رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$P(\Delta d(i)) = A(i) \times \Delta d(i) \quad (19)$$

در نهایت، مصرف مشترک در بازه i ام با توجه به قیمت در همان بازه از رابطه (۲۰) به دست خواهد آمد.

$$d(i) = d_0(i) \cdot \left\{ 1 + \frac{E(i,i) \cdot [\rho(i) - \rho_0(i) + A(i)]}{\rho_0(i)} \right\} \quad (20)$$

۲-۵-۲ مدل‌سازی بارهای الاستیک چند دوره‌ای

بر اساس تعریف الاستیسیته، با فرض خطی بودن مطابق رابطه (۲۱)، می‌توان عبارت $\frac{\partial d(i)}{\partial \rho(j)}$ را با عبارت $\frac{d(i) - d_0(i)}{\rho(j) - \rho_0(j)}$ جایگزین نمود.

$$\frac{\partial d(i)}{\partial \rho(j)} = \text{Constant}, \quad i, j = 1, 2, \dots, 24 \quad (21)$$

بنابراین، رابطه بین قیمت و تقاضا مطابق معادله (۲۲) تعریف خواهد شد. اگر مقدار پاداش در قیمت لحاظ شود، مدل چند بازه‌ای به دست خواهد آمد.

$$E(i,j) = \frac{\rho_0(j)}{d_0(j)} \times \frac{d(i) - d_0(i)}{\rho(j) - \rho_0(j)} \quad (22)$$

$$d(i) = d_0(i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{24} E(i,j) \cdot \frac{d_0(i)}{\rho_0(j)} \cdot [\rho(j) - \rho_0(j)] \quad (23)$$

$$d(i) = d_0(i) \cdot \left\{ 1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{24} E(i,j) \cdot \frac{\rho_0(i) - \rho_0(j) + A(j)}{\rho_0(j)} \right\} \quad (24)$$

۳-۵-۲ مدل کلی بار

با ترکیب روابط ذکر شده، مدل اقتصادی بار به صورت معادله (۲۵) به دست خواهد آمد.

مصرف، مصرف کنندگان قادر خواهند بود هزینه خود را از طریق جابجایی زمان مصرف از دوره پیک به دوره غیر پیک مدیریت نمایند.

۴-۲ پاسخگویی بار

در این مقاله، از روش پاسخگویی بار اضطراری (EDRP^{۱۳}) استفاده می‌شود. در این روش، مشترکین در زمان محدودیت‌های قابلیت اطمینان شبکه در ازای کاهش بار مبلغی به عنوان پاداش دریافت می‌کنند. البته این قطع بار اختیاری بوده و اگر توسط مشترک انجام نشود، جریمه‌ای به همراه نخواهد داشت. میزان نرخ پاداش در این روش توسط بهینه‌ساز تعیین می‌شود. همچنین، به منظور مدل‌سازی رفتار مشتریان، کشش تقاضا نسبت به قیمت مورد استفاده قرار گرفته است.

برای یک بازه زمانی ۲۴ ساعته، کشش تقاضا، به عنوان حساسیت تقاضا با توجه به تغییرات قیمت به شکل رابطه (۱۶) تعریف می‌شود [۱۷].

$$E = \frac{\partial d(i)}{\partial \rho(j)} \times \frac{\rho_0(j)}{d_0(i)} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, 24 \quad (16)$$

که E کشش تقاضا نسبت به تقاضا، $d(i)$ تقاضای مشتری در ساعت i ، $d_0(i)$ تقاضای اولیه در ساعت i ، $\rho(j)$ قیمت لحظه‌ای برق در ساعت j و $\rho_0(j)$ مقدار اولیه قیمت در ساعت j (در اینجا مقدار $\$ / kw$ ۰/۱۳) می‌باشد. در رابطه (۱۶) اگر $i=j$ مقدار $E(i,j) \leq 0$ و اگر $i \neq j$ مقدار $E(i,j) \geq 0$ است. رابطه (۱۶) نشان می‌دهد که به ازای تغییر قیمت در لحظه j ، بار در لحظه i به چه میزان تغییر می‌کند. با توجه به این رابطه، در صورتیکه قیمت در لحظه i افزایش یابد، تقاضا در لحظه i کاهش خواهد یافت و بالعکس اگر قیمت در لحظه i کاهش یابد، تقاضا افزایش خواهد داشت. به طور کلی بعد از تغییر قیمت حالات ذیل اتفاق خواهد افتاد [۱۸]:

- بعضی از بارها (مانند بارهای روشنایی) قابلیت جابجایی از دوره‌ای به دوره دیگر را ندارند و تنها می‌توانند خاموش و یا روشن باشند. این بارها با الاستیسیته خودی^{۱۴} ارزش گذاری می‌شوند و همیشه مقدار منفی دارند.
- بعضی دیگر از بارها قابلیت جابجایی از بازه پیک به بازه‌های غیر پیک را دارند. این بارها با الاستیسیته متقابل^{۱۵} ارزش گذاری شده و همواره مقداری مثبت دارند.

برای ۲۴ ساعت با روش قیمت‌گذاری زمان مصرف (TOU)، ضرایب الاستیسیته خودی و متقابل در یک ماتریس مربعی ۲۴ در ۲۴ طبق رابطه (۱۷) مرتب می‌شوند. عناصر قطری در این ماتریس معرف ضرایب الاستیسیته خودی هستند که به صورت تغییرات بار در دوره \bar{t} به ازای تغییرات قیمت در همان دوره تعریف می‌شوند. عناصر غیر

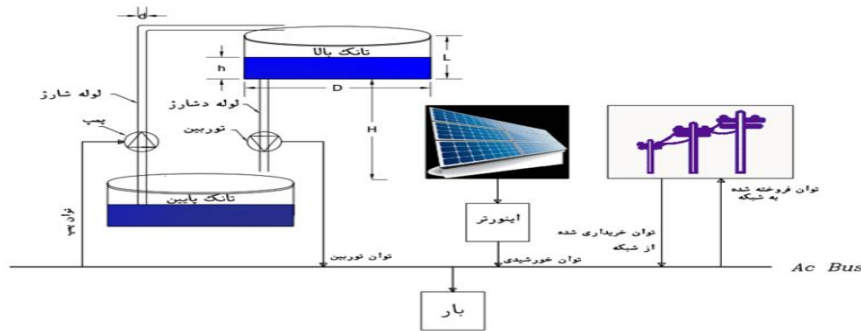
13. Emergency Demand Response Programs

14. Self-Elasticity

15. Cross-Elasticity

فروخته شود. علاوه بر این اگر $P_{surplus}$ بیش از توان مجاز پمپ باشد، پمپ با حداکثر توان کار خواهد نمود و مابقی توان تولیدی به شبکه فروخته خواهد شد.

از سوی دیگر، اگر توان تولیدی توسط PV کمتر از میزان تقاضا باشد، کمبود تولید وجود دارد که می‌بایست از طریق خرید از شبکه، PHS و یا هر دو جبران شود. در اینجا، توان خریداری شده از شبکه در نظر گرفته شده است. اگر توان خریداری شده از کمبود توان بیشتر باشد، تقاضای بار به طور کامل تامین خواهد شد و مازاد توان به سمت پمپ (اگر قیود راه اندازی پمپ را تامین نماید) خواهد رفت. در غیر اینصورت، کمبود توان می‌بایست توسط توربین (در صورت تامین شدن قیود راه‌اندازی توربین) تامین گردد. توجه به این نکته ضروری است که در تمام طول مدت زمان بهره‌برداری، مقدار احتمال از دست دادن منبع (LPSP) می‌بایست از مقدار مورد نظر کمتر باشد تا قابلیت اطمینان سیستم به نحو مطلوب برآورده شود.



شکل ۱. اجزای تشکیل دهنده سیستم ترکیبی ارائه شده

$$d(i) = d_0(i) \cdot \left\{ 1 + E(i, i) \cdot \frac{\rho(i) - \rho_0(i) + A(i)}{\rho_0(i)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{24} E(i, j) \cdot \frac{\rho(i) - \rho_0(j) + A(j)}{\rho_0(j)} \right\} \quad (25)$$

رابطه (۲۵) نشان‌دهنده آن است که مشترک در طول ۲۴ ساعت، در حالیکه در برنامه‌های پاسخگویی بار شرکت کرده است، چه میزان مصرف داشته باشد، تا به سود حداکثر دست پیدا نماید.

۶-۲ راهبرد مدیریت انرژی

در هر بازه زمانی، توان تولید شده توسط سیستم فتوولتائیک اندازه‌گیری شده و با اندازه تقاضا مقایسه می‌شود. اگر توان PV از میزان تقاضا بیشتر بود، اضافه تولید ($P_{surplus}$) وجود دارد که می‌تواند صرف پمپ کردن آب (اگر میزان توان اضافی در محدوده ۰/۶ تا ۱/۲ برابر توان نامی پمپ باشد [۲۷]) به مخزن بالاتر شود و یا به شبکه

۷-۲ تابع هدف

در این سیستم، کمینه کردن هزینه بهره‌برداری هدف اصلی است. رابطه (۲۶) سه عبارت متفاوت دارد. عبارت اول متعلق به هزینه توان خریداری شده از شبکه است. عبارت دوم، هزینه استفاده از برنامه‌های پاسخگویی تقاضا است که توسط بهره‌بردار به مشترکین پرداخت می‌شود. عبارت سوم مربوط به درآمد فروش برق حاصل از اضافه تولید PV به شبکه می‌باشد. در نتیجه، تابع هدف کلی این سیستم به صورت رابطه (۲۶) تعریف می‌شود.

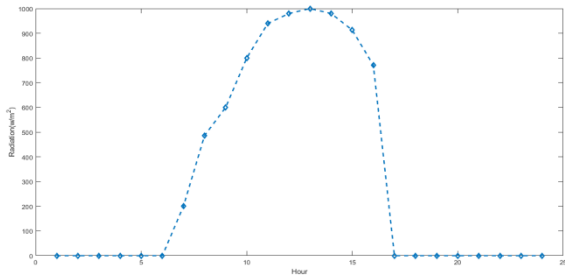
$$OF = \text{Min.} \left(\sum_{i=1}^{24} P_{\text{grid}}(i) \times \text{price}(i) + \sum_{i=1}^{24} \text{cost}_{\text{DR}}(i) - \sum_{i=1}^{24} P_{\text{sell}}(i) \times \text{price}(i) \right) \quad (26)$$

۸-۲ بهینه‌سازی

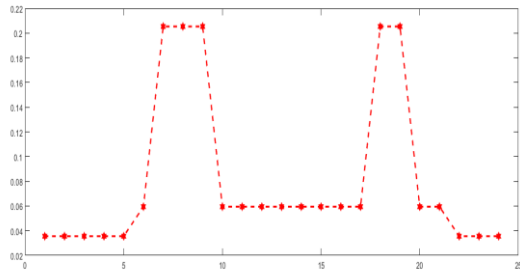
به عنوان یک بهینه‌ساز مبتنی بر جمعیت، CSA تلاش می‌کند تا رفتار هوشمندانه کلاغ‌ها را در چارچوب یک بهینه‌ساز شبیه‌سازی نماید [۲۸]. سادگی، کارایی بالا و پیاده‌سازی راحت از مهمترین خصوصیات CSA به شمار می‌روند. CSA همچون دیگر بهینه‌سازها، دارای دو پارامتر کلی می‌باشد: اندازه جمعیت (N_C) و حداکثر تعداد تکرار ($iter_{max}$). علاوه بر این دو پارامتر، دو پارامتر دیگر وجود دارند که می‌بایست مقداردهی شوند: طول پرواز $f(l)$ و احتمال آگاهی (AP)^{۱۷}. فلوجارت الگوریتم جستجوی کلاغ در شکل (۲) ارائه شده است. در این تحقیق، برای حل بهینه مسئله، CSA اصلی و CSA

¹⁶. Flight length

¹⁷. Awareness probability



شکل ۴: میزان تابش خورشید در طول ۲۴ ساعت



شکل ۵: قیمت برق در طول ۲۴ ساعت

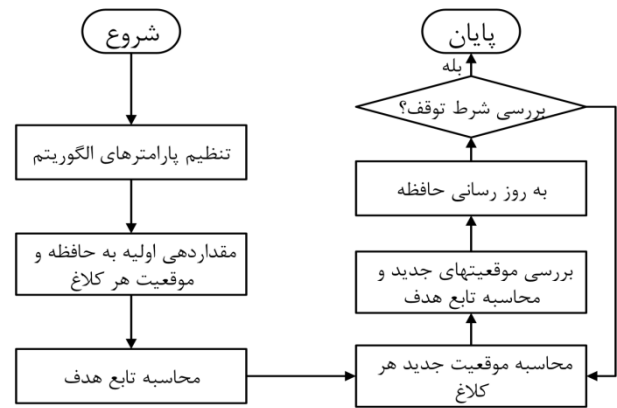
جدول ۱: مشخصات سیستم PHS [۱۲]

| مقدار | پارامتر |
|-------------------|------------------|
| ۰/۴ متر | قطر لوله شارژ |
| ۰/۴ متر | قطر لوله تخلیه |
| ۵۰ متر | ارتفاع نصب |
| ۱۴/۸۲۱۶ متر | عمق مخزن |
| ۱۸/۵۳۳۶ متر | قطر مخزن |
| ۴۰۰۰ مترمکعب | حجم مخزن بالا |
| ۴۰ کیلووات | توان نامی پمپ |
| ۴۰ کیلووات | توان نامی توربین |
| ۸۰ درصد | بازدهی پمپ |
| ۸۰ درصد | بازدهی توربین |
| ۱۴۵۰ دور بر دقیقه | دور نامی پمپ |

جدول ۲: مقدار ضرایب الاستیسیته [۱۷]

| بازه زمانی | کم باری | میان باری | اوج بار |
|------------|---------|-----------|---------|
| کم باری | -۰/۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱۲ |
| میان باری | ۰/۰۱ | -۰/۱ | ۰/۰۱۶ |
| اوج بار | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۱۶ | -۰/۱ |

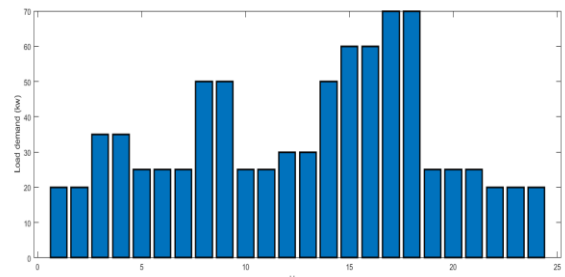
تفاضلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از روشهای متفاوت در تولید موقعیت جدید بهره می‌برند.



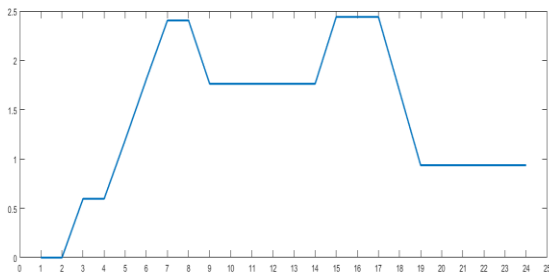
شکل ۲- فلوجارت الگوریتم جستجوی کلاغ

۳- نتایج

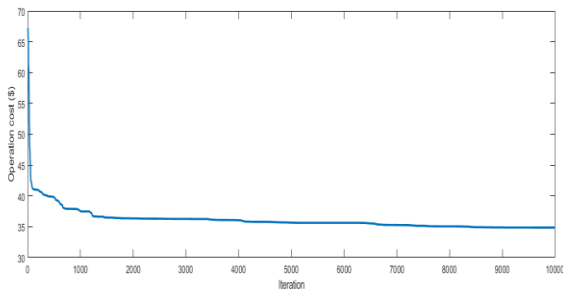
در این بخش، روشی برای تعیین مقدار بهینه پاداش شرکت کنندگان در برنامه پاسخگویی تقاضا و توان خریداری شده از شبکه در سیستم ترکیبی PV/PHS متصل به شبکه ارائه شده است. منحنی تقاضا و میزان تابش خورشید در بازه زمانی مورد نظر (۲۴ ساعت) به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. بر اساس [۱۲]، این اطلاعات مربوط به منطقه‌ای به نام آدرار در جنوب کشور الجزایر می‌باشد. دو سناریو در نظر گرفته شده است: (۱) بدون برنامه‌های پاسخگویی تقاضا و (۲) با استفاده از برنامه‌ها پاسخگویی تقاضا. همچنین، سطح اولیه آب برابر با صفر است (مخزن خالی). جداول (۱) و (۲) مشخصه‌های PHS و ضرایب الاستیسیته که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. قیمت برق در ساعات مختلف نیز در شکل (۵) آورده شده است. پانل‌های خورشیدی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند از مدل SunPower SPR-305-WHT با توان ۳۰۵ وات، طول عمر ۲۵ سال و بازدهی ۹۰ درصد می‌باشند [۱۳].



شکل ۳: منحنی بار در طول ۲۴ ساعت



شکل (۷): سطح آب داخل مخزن در طول ۲۴ ساعت در سناریو ۱


 شکل (۸): آهنگ همگرایی CSA_{diff} در سناریو ۱

۲-۳ سناریو ۲: سیستم PV/PHS متصل به شبکه با اجرای

برنامه‌های پاسخگویی تقاضا

در این سناریو، برنامه پاسخگویی تقاضا در مسئله بهینه‌سازی لحاظ شده است. از این رو، تعداد متغیرهای تصمیم ۲۵ عدد می‌باشد (مقدار پاداش شرکت کنندگان در برنامه و میزان توان خریداری شده از شبکه در هر ساعت). جدول (۴) بهترین نتایج به دست آمده از هر الگوریتم را پس از ۳۰ اجرای مستقل، زمانیکه منبع خالی باشد را نشان می‌دهد. حداقل مقدار تابع هدف که توسط CSA_{diff} و CSA به دست آمده است به ترتیب $۳۲/۵۲۰۷$ و $۳۰/۲۳۲۰$ است. بر اساس نتایج به دست آمده از الگوریتم CSA_{diff} ، مقدار بهینه پاداش که می‌بایست به مشترکینی که در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا شرکت می‌کنند $۰/۰۷۰۸$ \$/kw می‌باشد.

جدول ۴: بازدهی هر الگوریتم در سناریو دوم

| روش | تابع هدف (\$) | تشویقی (\$/kw) |
|--------------|------------------|-------------------|
| CSA | ۳۲/۵۲۰۷ | ۰/۰۷۰۱ |
| CSA_{diff} | ۳۰/۲۳۲۰ | ۰/۰۷۰۸ |

برای حل مسئله بهینه‌سازی، CSA_{diff} و CSA در محیط متلب کد نویسی شده‌اند. با توجه به طبیعت تصادفی بودن الگوریتم‌های فراابتکاری، برای مقایسه منصفانه، هر الگوریتم ۳۰ بار به صورت مستقل اجرا و بهترین پاسخ گزارش شده است. در تمام حالات N_C ، $iter_{max}$ و AP به ترتیب روی ۴۰۰، ۱۰۰۰۰، ۲ و ۰/۲ تنظیم شده‌اند. در الگوریتم‌های مبتنی بر CSA ، موقعیت هر کلاغ با استفاده از یک بردار x نمایش داده می‌شود. در سناریو اول، میزان توان خریداری شده از شبکه در هر ساعت به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است پس طول بردار x برابر ۲۴ است $[P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{g24}, I_p]$ ، در سناریو دوم، با توجه به در نظر گرفتن مقدار بهینه پاداش (I_p) به عنوان متغیر تصمیم، اندازه بردار x برابر با ۲۵ خواهد بود $[P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{g24}, I_p]$.

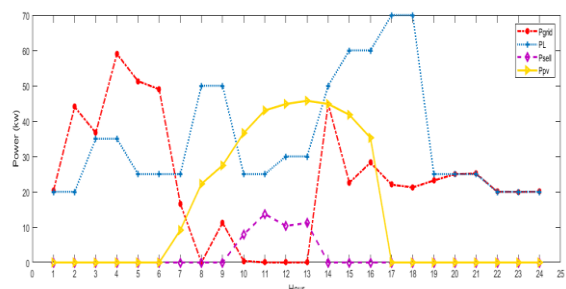
۳-۱ سناریو ۱: سیستم PV/PHS متصل به شبکه بدون برنامه-

های پاسخگویی تقاضا

در این سناریو، بهره‌برداری بهینه از سیستم بدون برنامه‌های پاسخگویی تقاضا انجام خواهد شد. بنابراین، شبکه، PV و PHS تامین تقاضا را با رعایت قیود مسئله برعهده خواهند داشت. جدول (۳) نتایج حل مسئله را براساس الگوریتم‌های مبتنی بر CSA در دو حالتی که حجم اولیه آب در منبع بالا خالی باشد، نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۴)، زمانی که منبع خالی است، CSA_{diff} ، CSA به ترتیب به جوابهای $۳۷/۵۵۳۹$ و $۳۴/۸۶۳$ دلار خواهند رسید. کمترین مقدار تابع هدف $۳۴/۸۶۳$ دلار می‌باشد که توسط CSA_{diff} به دست آمده است.

جدول ۳: بازدهی هر الگوریتم سناریو اول

| روش | مقدار تابع هدف |
|--------------|----------------|
| CSA | ۳۷/۵۵۳۹ |
| CSA_{diff} | ۳۴/۸۶۳ |



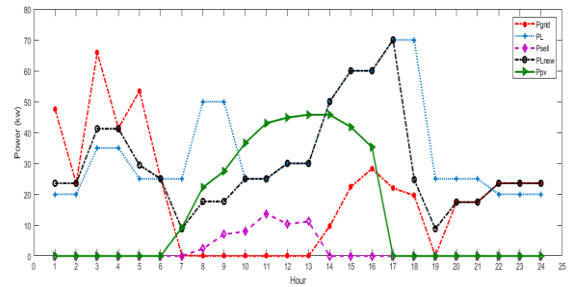
شکل (۶): نحوه مشارکت هریک از تجهیزات سیستم ترکیبی در طول ۲۴ ساعت در

سناریو ۱

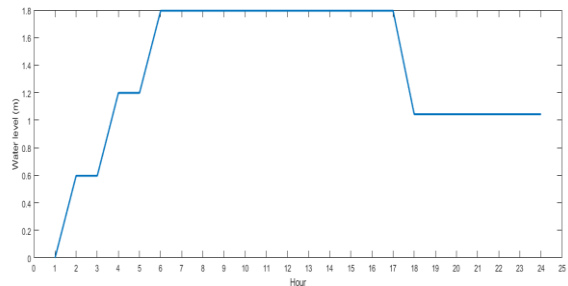
سازی ابداعی به نام الگوریتم جستجوی کلاغ تقاضای مبتنی بر انتخاب رقابتی استفاده شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، نشان داده شد که استفاده بهینه از برنامه‌های پاسخگویی تقاضا در سیستم‌های ترکیبی، هزینه بهره‌برداری را کاهش می‌دهد. همچنین، هنگامی که منبع خالی باشد، استفاده از برنامه‌های پاسخگویی تقاضا هزینه بهره‌برداری را به میزان ۱۳/۲ درصد کاهش می‌دهد.

فهرست علائم

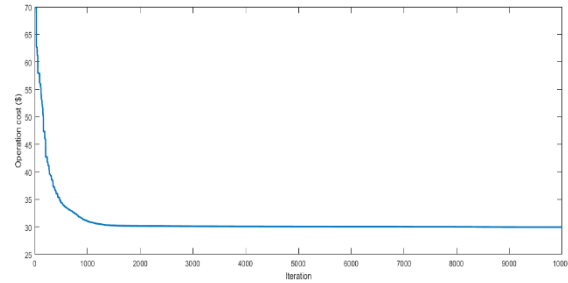
| | |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| P_{pv} | توان تولید شده توسط سیستم خورشیدی |
| R_a | میزان تابش خورشید |
| R_s | میزان تابش خورشید در شرایط استاندارد |
| R_c | میزان تابش معین |
| N_{pv} | تعداد پنل‌های فتوولتائیک |
| $P_{purchase}$ | توان خریداری شده از شبکه |
| P_{sell} | توان فروخته شده به شبکه |
| P_{demand} | توان مورد تقاضا |
| $P_{deficit}$ | کمبود توان |
| $P_{turbine}$ | توان خروجی توربین |
| $P_{surplus}$ | توان اضافی |
| P_p | توان مورد استفاده پمپ |
| P_{pump}^n | توان نامی پمپ |
| N_{pump}^n | سرعت نامی پمپ (rpm) |
| $H_{tot@Nn}$ | ارتفاع کل نصب سیستم با در نظر گرفتن تلفات ناشی از هد استاتیک و هد اصطکاکی |
| N | سرعت چرخش پمپ |
| ρ | چگالی آب (kg/m^3) |
| g | شتاب گرانش (m/s^2) |
| f | ضریب اصطکاک |
| H_f | افت ارتفاع فشاری ناشی از اصطکاکی |
| Q_p | دبی پمپ |
| $\eta_{p@Nn}$ | بازدهی پمپ در سرعت نامی |
| H_{tot} | مجموع ارتفاع فشاری سیستم |
| Re | عدد رینولدز |
| L | عمق منبع بالا (m) |
| ε | زبری لوله (mm) |
| μ | لزجت آب |
| d_{charge} | قطر لوله شارژ منبع (m) |
| η_t | بازدهی توربین |
| H_{stat} | ارتفاع نصب منبع |
| η_{max} | ماکزیمم بازدهی توربین |



شکل (۹): نحوه مشارکت هریک از تجهیزات سیستم ترکیبی در طول ۲۴ ساعت در سناریو ۲



شکل (۱۰): سطح آب داخل مخزن در طول ۲۴ ساعت در سناریو ۲



شکل (۱۱): آهنگ همگرایی CSA_{diff} در سناریو ۲

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، تاثیر استفاده بهینه از برنامه‌های پاسخگویی بار بر هزینه بهره‌برداری از یک سیستم ترکیبی PV/PHS متصل به شبکه بررسی شد. برای نیل به این هدف، میزان بهینه پاداش پرداختی به مشترکینی که در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا شرکت نموده‌اند با توجه به ضرایب کشش قیمت نسبت به تقاضا تعیین شد و پس از اجرای بهینه برنامه‌های پاسخگویی تقاضا منحنی بار جدید تولید شد که مبنای تعیین میزان توان خریداری شده از شبکه در ساعات مختلف بود. همچنین، میزان توان خریداری شده از شبکه به طوری که میزان قابلیت اطمینان مورد نظر را برآورده نماید در قالب یک مسئله بهینه‌سازی حل شد. برای حل این مسئله از یک بهینه



grid-interactive micro-hydrokinetic-pumped hydro storage system" *Journal of Energy Storage*, 17, 63-72.

[5] Abdul Rauf Bhatti, Ahmed Bilal Awan, Muhammad Zubair, Guftaar Ahmed Sardar Sidhu, Ahmed G. AboKhalil, (2018) "Performance analysis of various hybrid renewable energy systems using battery, hydrogen, and pumped hydro-based storage units" *Energy Research*, 1-26.

[6] Sina Makhdoomi, Alireza Askarzadeh, (2020) "Optimizing operation of a photovoltaic/diesel generator hybrid energy system with pumped hydro storage by a modified crow search algorithm" *Journal of Energy Storage*, 27, 101040.

[7] FERC, Assessment of demand response and advanced metering staff report, www.FERC.gov, August 2006.

[8] Jamshid Aghaei, Mohammad-Iman Alizadeh, (2013) "Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 64-72.

[9] Xiaonan Wang, Ahmet Palazoglu, Nael H. El-Farra, (2015) "Operational optimization and demand response of hybrid renewable energy systems" *Applied Energy*, 143, 324-335.

[10] Houman Jamshidi Monfared, Ahmad Ghasemi, Abdollah Loni, Mousa Marzband, (2019) "A hybrid price-based demand response program for the residential micro-grid" *Energy*, 185, 274-285.

[11] Mahdi Gharibi, Alireza Askarzadeh, (2019) "Size and power exchange optimization of a grid-connected diesel generator-photovoltaic-fuel cell hybrid energy system considering reliability, cost and renewability" *Hydrogen Energy*, 44, 25428-25441.

[12] Djelailia O, Kelaiaia MS, Labar H, Necaibia S, Merad F, (2019) "Energy Hybridization Photovoltaic/Diesel Generator/Pump Storage Hydroelectric Management Based on Online Optimal Fuel Consumption Per kWh" *Sustainable Cities and Society*, 44, 1-15.

[13] PUMPIRAN, Pump select, www.pumpselect.ir.

[14] Giampaolo Manfrida, Riccardo Secchi, (2014) "Seawater pumping as an electricity storage solution for photovoltaic energy systems" *Energy*, 69, 470-484.

[15] Clayton T. Crowe, Donald F. Elger, Barbara C. Williams, John A. Roberson, *Engineering Fluid Mechanics*, 9th ed, Wiley.

[16] Robert H. Frank, Ben S. Bernanke, *Principles of micro-economics*, 4th ed, McGraw-Hill/Irwin

[17] H. Aalami, G.R. Yousefi, M.P. Moghadam, 2008 "Demand response model considering EDRP and TOU programs". In: IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, IL, USA, 21-24.

[18] Daniel Kirschen, Goran Strbac, *Fundamentals of power system economics*, 2018, Wiley.

[19] Daniel S. Kirschen, (2003) "Demand-side view of electricity markets" IEEE, *Transaction on power systems* 18.

| | |
|-----------------|-------------------------------------------------------|
| $P_{turbine}^n$ | توان نامی توربین |
| Q_t | دبی توربین (m^3/s) |
| h | ارتفاع آب داخل منبع (m) |
| $d_{discharge}$ | قطر لوله‌های دشارژ منبع (m) |
| A | مساحت سطح منبع (m^2) |
| N_c | تعداد جمعیت |
| $iter_{max}$ | ماکزیمم تعداد تکرار |
| m^j | بهترین مکان کلاغ j |
| r_i | عدد تصادفی بین ۰ و ۱ با توزیع یکنواخت |
| AP | احتمال آگاهی |
| fl | طول پرواز |
| N_c | تعداد کلاغ‌ها |
| $iter$ | شماره تکرار |
| x^i | موقعیت فعلی کلاغ i |
| $do(i)$ | میزان اولیه تقاضا در ساعت i |
| $d(i)$ | تقاضای مشتری در لحظه i |
| $\Delta d(i)$ | میزان تغییر بار پس از اعمال برنامه‌های پاسخگویی تقاضا |
| E | میزان کشش تقاضا نسبت به قیمت |
| $E(i,i)$ | الاستیسیته خودی |
| $E(i,j)$ | الاستیسیته متقابل |
| $\rho_o(i)$ | مقدار اولیه قیمت در لحظه i |
| $\rho(i)$ | قیمت لحظه‌ای برق در لحظه i |
| S | سود مشتری |
| $B(d(i))$ | درآمد مشتری |

مراجع

- [1] Kanzumba Kusakana, (2018) "Hybrid DG-PV with groundwater pumped hydro storage for sustainable energy supply in arid areas" *Journal of Energy Storage*, 18, 84-89.
- [2] Navid Mousavi, Ganesh Kothapalli, Daryoush Habibi, Mehdi Khiadani, Choton K. Das, (2019), "An improved mathematical model for a pumped hydro storage system considering electrical, mechanical, and hydraulic losses" *Applied Energy*, 247, 228-236.
- [3] Muhammad Shahzad Javed, Tao Ma, Jakub Jurasz, Muhammad Yasir Amin, (2020), Solar-wind-pumped hydro energy storage systems: review and future perspective, *Renewable Energy*, 148, 176-192.
- [4] Sandile Phillip Koko, Kanzumba Kusakana, Herman Jacobus Vermaak, (2018), "Optimal power dispatch of a



optimization problems: Crow search algorithm” *Computers and Structures*. 169 ,1–12.

[24] Sina Makhdoomi, AlirezaAskarzadeh, (2020) “Daily performance optimization of a grid-connected hybrid system composed of photovoltaic and pumped hydro storage (PV/PHS)” *Renewable Energy*, 159 , 272-285.

[25] Storn R and Price K (1997) “Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization Over Continuous Space” *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359.

[20] H.A. Aalami, M. Parsa Moghaddam , G.R. Yousefi, (2010) “Modeling and prioritizing demand response programs in power markets” *Electric Power Systems Research*, 80 ,426–435.

[21] Schweppe FC, Caramanis MC, Tabors RD, Bohn RE. 1989 “Spot pricing of electricity” Boston, MA: Kluwer Ltd..

[22] G. Manfrida, R. Secchi, (2014) “Seawater pumping as an electricity storage solution for photovoltaic energy systems” *Energy*. 69 ,470-484.

[23] Alireza Askarzadeh, (2016) “A novel metaheuristic method for solving constrained engineering

ACEC2021-70606

برنامه ریزی توسعه شبکه توزیع با وجود توربین بادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت از طریق روش مونت کارلو

پریسا انجم شعاع^۱سعید اسماعیلی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، anjomparisa@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشگاه شهید باهنر کرمان، s_esmaeili@uk.ac.ir

چکیده

برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع یکی از مسائل مهم، بخصوص در مواجهه با چالش‌های جدید شبکه هوشمند است. در این مقاله تحت محیط شبکه هوشمند، نقش منابع بادی، در دو سطح توسعه و بهره‌برداری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سطح اول، شبکه توزیع باید به گونه‌ای توسعه پیدا کند که بهینه‌ترین توپولوژی برای اتصال بارهای جدید به شبکه فعلی انتخاب گردد و مناسب‌ترین محل برای نصب توربین‌های بادی مشخص شود. سطح دوم برنامه‌ریزی می‌بایست باتوجه به شرایط مختلف بهره‌برداری (بهره‌برداری در شرایط عادی و بهره‌برداری در هنگام رخداد انواع خطا) تعیین گردند. اهدافی که این مقاله در نظر گرفته است؛ شامل بهینه کردن هزینه سرمایه‌گذاری و قابلیت‌اطمینان در سطح اول و بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و شاخص قابلیت اطمینان در سطح دوم می‌باشد. همچنین این مقاله، تاثیر عدم قطعیت منابع بادی را بصورت احتمالاتی و بر پایه مدل‌سازی مونت کارلو در برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع بررسی نموده است. با توجه به پیچیدگی، و غیر خطی بودن مسئله، از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) در نرم‌افزار متلب برای بهینه‌سازی استفاده گردیده است. مطالعات انجام شده بر روی شبکه ۲۴ باس نشان می‌دهد که در نظر گرفتن منابع بادی در برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع باعث بهبود قابلیت اطمینان و به تاخیر انداختن بعضی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری، کاهش هزینه بهره‌برداری در شرایط عادی عملکرد شبکه و پایداری شبکه هنگام رخداد خطا می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: انرژی بادی، شبکه توزیع هوشمند، برنامه ریزی، اتوماسیون، عدم قطعیت.

مقدمه

برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع (DNEP) یکی از مهمترین و در عین حال چالش برانگیزترین مسائل در توسعه سیستم‌های قدرت است. DNEP پاسخ به سوال‌های کی، کجا و چه مقدار تجهیزات توزیع باید احداث یا نصب گردد می‌باشد. هدف اصلی در توسعه شبکه توزیع، تعیین الگوی برای پیکربندی، بطوری که تمامی بارهای موجود در طرح تامین توان شوند. از این رو با رشد چشمگیر تکنولوژی منابع تولید پراکنده بیشتر مقاله‌ها به سمت برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده برای تامین توان بهتر بارها گرایش پیدا کرده‌اند. بطور مثال در بعضی از مقاله‌ها به تاثیر منابع تولید پراکنده در بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع مورد برنامه‌ریزی توسعه پرداخته است [۱]. مرجع [۲] روشی را برای توسعه شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده برای کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تلفات ارائه نموده است. جایابی منابع تولید پراکنده برای کاهش تلفات در شبکه توزیع در [۳] بحث شده است. از طرف دیگر، برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع یک مسئله پیچیده است. این پیچیدگی به دلیل این است که برنامه‌ریزی توسعه؛ ترکیبی از اعداد صحیح و مسائل غیرخطی و غیرمحدب می‌باشد. در مقالات از روش‌های مختلف بهینه‌سازی از جمله روش‌های کلاسیک مثل برنامه‌ریزی پویا و برنامه‌ریزی شبه پویا [۴] برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح مرکب [۵] برنامه‌ریزی غیرخطی [۶] و روش‌های هیوریستیک و متاهیوریستیک مثل ژنتیک [۷] اغلب برای حل این گونه مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شوند.

مطالعه انجام شده در این مقاله شامل دو سطح از برنامه‌ریزی شبکه توزیع می‌باشد. در سطح اول آن برنامه‌ریزی توسعه انجام می‌گیرد که منجر به تعیین محل احداث خطوط جدید، منابع بادی می‌گردد و سطح دوم به بهره‌برداری از شبکه توزیع توسعه یافته در شرایط مختلف می‌پردازد. برای تعیین توپولوژی بهینه شبکه توزیع، هزینه

از آنجایی که روش‌ها و شاخص‌های متفاوتی برای ارزیابی قابلیت اطمینان وجود دارد؛ در این مقاله از شاخص EENS و یک روش تحلیلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان، با توجه به رابطه (۲) استفاده شده است. این شاخص در هر دو سطح ذکر شده مورد مطالعه بکار گرفته می‌شود. [۸].

$$EENS = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{l=1}^{N_l} \gamma_l L_l \cdot \left(\sum_{k=1}^{N_{loc}} P_{loc_k} \cdot t_{loc_k}^{Aut} - P_{WT_k} \right) \right] + \sum_{t=1}^T \left[\sum_{s=1}^{N_{sb}} \gamma_s (t_{loc_s}) \cdot \sum_{n=1}^{N_{ls}} P_{lpn} - P_{WT_n} \right] \quad (2)$$

برای اعمال تاثیر حضور تجهیزات بر شاخص EENS از رابطه (۳) و (۴) استفاده می‌شود. در (۳) رابطه t_{loc} مدت زمانی است که نشانگر خطا زودتر می‌تواند محل رخداد خطا را تشخیص دهد. رابطه (۴) نیز اثر ریکلوزر بر قابلیت اطمینان را نشان می‌دهد که منجر به کاهش نرخ خرابی فیدری که ابتدای آن قرار گرفته می‌شود.

$$t_{loc}^{Aut} = t_{loc} - \Delta t_{fa} \cdot x_{fa} \quad (3)$$

$$\lambda_l^{Aut} = \lambda_l - \Delta \lambda_{re} \cdot x_{re} \quad (4)$$

هزینه بهره‌برداری

هزینه بهره‌برداری از سه قسمت تشکیل شده است که در رابطه (۵) قابل ملاحظه است.

$$Opr. cost = \sum_{s=1}^{N_{sb}} 8760 \cdot x_s \cdot PL_s \cdot C_{loss} + \sum_{l=1}^{N_l} 8760 \cdot x_l \cdot (L_l \cdot PL_l \cdot C_{loss}) + \sum_{u=1}^{N_{park}} 8760 \cdot x_u \cdot (P_W) \cdot C_m \quad (5)$$

ترم اول این رابطه هزینه تلفات پست، ترم دوم آن هزینه تلفات خطوط و ترم سوم هزینه خرید برق از مزرعه بادی می‌باشد.

مدلسازی عدم قطعیت

برای مدل‌سازی عدم قطعیت سرعت باد (v)، از تابع توزیع احتمالاتی ویبال ($f(v)$) بر اساس داده‌های تاریخی سرعت باد مطابق با رابطه (۶) استفاده شده است. در این رابطه پارامترهای تابع توزیع ویبال که k و c می‌باشند در نرم‌افزار متلب و با استفاده از داده‌های تاریخی محاسبه می‌گردند. اعداد تصادفی تولید شده با استفاده از روش مونت کارلو در هر سناریو با استفاده از رابطه (۶) به سرعت باد تبدیل می‌شوند.

$$f_v(v) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) \quad (6)$$

سرمایه‌گذاری و شاخص^۳ (EENS) که بیانگر میزان قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد به عنوان دو تابع هدف در سطح اول و هزینه بهره‌برداری و EENS به عنوان دو تابع هدف سطح دوم این مسئله در نظر گرفته شده است. در نهایت با اعمال مدل پیشنهادی در یک شبکه توزیع ۲۴ باس و به کارگیری الگوریتم چند هدفه (NSGA-II) به بررسی مدل پیشنهادی خواهد پرداخت.

فرمول‌بندی مسئله

همان‌طور که در قسمت قبل بیان شده است، اصلی‌ترین هدف DNEP، ایجاد توانایی در شبکه توزیع برای پاسخگویی به افزایش بار با کمترین هزینه است؛ در این مقاله هزینه سرمایه‌گذاری برای احداث خطوط، پست‌ها، منابع بادی مدلسازی شده است. همچنین برای محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری، فرض بر این است که اگر یک المان از قبیل خط یا پست در زمان t به شبکه اضافه گردد، هزینه سرمایه‌گذاری آن با ضریب $\frac{1}{(1+r)^{t-1}}$ کاهش می‌یابد.

هزینه سرمایه‌گذاری

هزینه سرمایه‌گذاری شامل چهار قسمت است که با توجه به رابطه (۱) تعیین می‌گردد. این قسمت‌ها به ترتیب هزینه سرمایه‌گذاری برای احداث خط، پست، پارکینگ را نشان می‌دهند.

$$Inv. cost = \sum_{s=1}^{N_{sb}} \sum_{t=1}^T \frac{x_{s,t} - x_{s,t-1}}{(1+r)^{t-1}} \cdot (IC_{sub}) + \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{t=1}^T \frac{x_{l,t} - x_{l,t-1}}{(1+r)^{t-1}} \cdot (L_l \cdot IC_{la}) + \sum_{\square=1}^{N_{SW}} \sum_{t=1}^T x_{\square,t} \cdot C_{INV_{WT}} + \sum_{s=1}^{N_{SW}} \sum_{t=1}^T x_{sw,t} \cdot C_{SW} \quad (1)$$

هزینه سرمایه‌گذاری فقط در سطح اول برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شود که توسعه بهینه شبکه را در پی دارد.

جایی که $x_{s,t}$ و $x_{l,t}$ و $x_{h,t}$ و $x_{sw,t}$ متغیرهای صحیح می‌باشند که نشان‌دهنده حضور یا عدم حضور پست، خط، توربین بادی و کلید اتوماتیک در شبکه برای زمان t هستند. این متغیرها مقادیر ۱ و ۰ را می‌توانند داشته باشند که ۱ نشان‌دهنده حضور و ۰ نشان‌دهنده عدم حضور المان مربوطه در شبکه می‌باشد.

ارزیابی قابلیت اطمینان



گرفته شود. ساختاری شعاعی است اگر هر فیدر یک گراف بهم پیوسته باشد و تعداد خط و گره‌ها با هم برابر باشند [۱۰]. این موارد می‌بایست همزمان برقرار باشند.

مطالعات عددی

در این مقاله روش پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴ باس پیاده‌سازی شده است. اطلاعات مربوط به بار و قابلیت اطمینان این شبکه در مرجع [۱۰] قابل ملاحظه می‌باشد. برای بهینه‌سازی مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب در نرم افزار متلب استفاده شده است. در این الگوریتم تعداد جمعیت ۵۰، دفعات تکرار ۱۰۰ و نرخ همبری و جهش به ترتیب ۰٫۲ و ۰٫۸ در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی روش و مدل ارائه شده، ۵ سناریو در نظر گرفته شده است که در زیر شرح می‌گردند.

سناریو اول: در این حالت شبکه توزیع بصورت حلقوی توسعه پیدا می‌کند. محل احداث پست جدید، توربین بادی و همچنین خط مناسب برای قرارگیری کلید اتوماتیک نیز مشخص می‌شود. نتایج این سناریو در جدول (۱) قابل ملاحظه است.

سناریو دوم: این سناریو وضعیت عادی بهره برداری شبکه توزیع را نشان می‌دهد. وضعیت کلیدها بگونه است که آرایش شعاعی و بهینه شبکه حاصل گردد. نتایج این سناریو در جدول (۲) نشان داده شده است. در این سناریو کمترین ولتاژ نقاط بار در شبکه برابر با ۰٫۹۶۳ پرینیت حاصل گشته است.

سناریو سوم: در این سناریو فرض بر این است که یک خطا در یکی از خطوط اصلی ابتدای فیدر رخ داده است. جدول (۲) وضعیت کلیدها را بگونه ای نشان می‌دهد که شبکه بتواند این خطا را جبران نماید. در این حالت کمترین ولتاژ نقاط بار در شبکه برابر با ۰٫۹۴۸ پرینیت شده است.

سناریو چهارم: در این سناریو دو خطا در شبکه در نظر گرفته شده است. جدول (۲) وضعیت بهینه عملکرد کلیدها را بگونه‌ای نشان می‌دهد که بارهای قطع شده به بهترین شکل برقرار گردند. در این حالت کمترین ولتاژ نقاط بار در شبکه برابر با ۰٫۹۲۵ پرینیت گشته است.

سناریو پنجم: این سناریو بدترین حالت رخداد خطا در مقایسه با سایر سناریوها می‌باشد. وجود توربین بادی باعث شده که شبکه در این حالت نیز پاسخگوی بارهای موجود باشد. محل رخداد خطا و وضعیت کلیدهای این سناریو نیز در جدول (۲) قابل ملاحظه است. کمترین ولتاژ در این سناریو برابر با ۰٫۹۰۷ پرینیت شده است که بیانگر پایداری شبکه در این حالت می‌باشد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن توربین بادی در مرحله برنامه‌ریزی توسعه، منجر به بهره‌برداری پایدارتر از شبکه در شرایط مختلف رخداد خطا

توان تولیدی توربین بادی به سرعت باد وابسته است که طبق رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۹].

$$P_w = \begin{cases} 0 & v \leq v_{in}^c \text{ or } v \geq v_{out}^c \\ \left(\frac{v - v_{in}^c}{v_{out}^c - v_{in}^c} \right) \times P_R & v_{in}^c \leq v \leq v_R \\ P_R & v_R \leq v \leq v_{out}^c \end{cases} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، P_R توان نامی توربین بادی، P_W توان تولیدی توربین بادی در ساعت t ، v_{in}^c سرعت قطع پایین، v_{out}^c سرعت قطع بالا و v_R سرعت نامی توربین بادی می‌باشند.

شکل ۱ الگوریتم پیشنهادی برای تلفیق مدل جدیدی از عدم قطعیت منابع بادی در برنامه‌ریزی دو سطحی محور شبکه توزیع را نشان می‌دهد. این الگوریتم از سه قسمت اصلی تشکیل شده است که در قسمت اول به مدلسازی احتمالاتی منابع بادی بوسیله روش مونت کارلو پرداخته است و قسمت دوم، سطح اول برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد که مربوط به توسعه شبکه می‌باشد و سطح سوم نیز بیانگر بازآرایی شبکه در شرایط مختلف بهره‌برداری است.

قیود و فرضیات مسئله

در این مدل چندین قید در نظر گرفته شده است که می‌بایست رعایت گردند. این قیود عبارتند از:

(۱) محدودیت‌های توان اکتیو و راکتیو (سطح اول و دوم)

این قید که در رابطه ۸ نشان داده شده است تاکید بر برابری توان اکتیو و راکتیو تولیدی با مصرفی دارد.

$$P_{g_i} - P_{l_i} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = 0 \quad (8)$$

$$Q_{g_i} - Q_{l_i} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = 0$$

(۲) ظرفیت پست وفیدر (سطح اول و دوم)

مطابق با این محدودیت که در رابطه ۹ بیان شده است، توان ظاهری عبوری از هر خط می‌بایست از ظرفیت نامی آن خط کوچکتر باشد.

$$S_{s_i} \leq S_{s_{max}} \quad \forall i \in \Omega_{sb} \quad (9)$$

$$S_{f_i} \leq S_{f_{max}} \quad \forall i \in \Omega_f$$

(۳) محدوده افت ولتاژ (سطح اول و دوم)

ساختار پیشنهادی در برنامه‌ریزی احتمالاتی توسعه شبکه توزیع باید به گونه‌ای باشد که ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز مطابق با رابطه ۱۰ قرار گیرد.

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (10)$$

(۴) ساختار شعاعی شبکه توزیع (سطح دوم)

به دلایلی از قبیل سادگی در حفاظت و کاهش جریان اتصال کوتاه شبکه توزیع، این نوع ساختار در اغلب شبکه‌ها پیاده می‌گردد. بنابراین محدودیت شعاعی می‌بایست در فرمول‌بندی مسئله در نظر

سرمایه‌گذاری و EENS در سطح اول و هزینه بهره‌برداری و EENS در سطح دوم استفاده شده است. ارزیابی مدل ارائه شده از طریق اجرای آن روی شبکه ۲۴ باسه صورت پذیرفته است. برای مقایسه نتایج حاصل از روش پیشنهادی، ۵ سناریو در نظر گرفته شده است که در سناریو اول به سطح اول این برنامه‌ریزی پرداخته است که مربوط به برنامه‌ریزی توسعه شبکه در کنار جابجایی توربین بادی می‌باشد. سناریوهای دیگر نیز به بررسی شبکه توسعه یافته در شرایط مختلف بهره‌برداری می‌پردازند. نتایج حاصله نقش مهم و موثر توربین‌های بادی در شرایط رخداد خطا در شبکه را نشان می‌دهند.

منابع

- [1] M. A. Larkin *et al.*, "Clustal W and Clustal X version 2.0," *bioinformatics*, vol. 23, no. 21, pp. 2947–2948, 2007.
- [2] W. Ouyang, H. Cheng, X. Zhang, and L. Yao, "Distribution network planning method considering distributed generation for peak cutting," *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 12, pp. 2394–2401, Dec. 2010.
- [3] N. C. Sahoo, S. Ganguly, and D. Das, "Fuzzy-Pareto-dominance driven possibilistic model based planning of electrical distribution systems using multi-objective particle swarm optimization," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 1, pp. 881–893, 2012.
- [4] L. G. W. Da Silva, R. A. F. Pereira, J. R. Abbad, and J. R. S. Mantovani, "Optimized Allocation of Control and Protective Devices in Electric Distribution Systems," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 38, no. 1, pp. 1–21, 2009.
- [5] M. El-kady, "Computer-Aided Planning of Distribution Substation and Primary Feeders," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-103, no. 6, pp. 1183–1189, Jun. 1984.
- [6] W. El-Khattam, Y. G. Hegazy, and M. M. A. Salama, "An Integrated Distributed Generation Optimization Model for Distribution System Planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 1158–1165, May 2005.
- [7] M. S. Nazar and M. R. Haghifam, "Multiobjective electric distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 6, pp. 899–911, Jun. 2009.
- [8] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*. Boston, MA: Springer US, 1996.
- [9] A. Ghasemi, H. Shayeghi, M. Moradzadeh, and M. Nooshyar, "A novel hybrid algorithm for electricity price and load forecasting in smart grids with demand-side management," *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 40–59, Sep. 2016.
- [10] M. Lavorato, M. J. Rider, A. V. Garcia, and R. Romero, "A Constructive Heuristic Algorithm for Distribution System Planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1734–1742, Aug. 2010

می‌گردد. بطوری که اگرچه با افزایش تعداد خطا EENS و هزینه بهره‌برداری افزایش و از طرف دیگر کمترین ولتاژ شبکه کاهش می‌یابد اما همچنان شبکه می‌تواند پاسخگوی بارهای موجود باشد و ولتاژ نقاط بار در محدوده مجاز قرار گیرد.

جدول ۱: نتایج سناریو ۱#

| خطوط | محل کلید | توربین بادی | پست | EENS | Inv.Cost |
|------------|----------|-------------|-----|---------------|--------------|
| (۱۳)- | | | | | |
| (۲۰)،(۱۶)- | | | | | |
| (۲۲)،(۱۹)- | | | | | |
| (۱۵)،(۱۱)- | (۷)- | | | | |
| (۷)،(۱۰)- | (۱۰)، | | | | |
| (۱۷)،(۵)- | (۱۵)- | | | | |
| (۱۲)،(۱)- | (۴)، | ۷ و ۱۰ | ۲۴ | ۴۳،۳ MWh/year | ۱،۱۰۸،۲۰۵ \$ |
| (۱۴)،(۱)- | (۱۳)- | | | | |
| (۷)،(۱۰)- | (۶)، | | | | |
| (۱۵)،(۴)- | (۱۸)- | | | | |
| (۱۳)،(۶)- | (۱۴) | | | | |
| (۱۸)،(۱۴)- | | | | | |
| (۲۰)،(۲۴)- | | | | | |
| (۱۸)،(۲۴)- | | | | | |

جدول ۲: نتایج سناریوهای ۲-۵

| سناریو | محل خطا | کلید وصل | EENS (MWh/year) | Opr.Cost\$ |
|--------|-----------------------------------------------|-----------------------------|-----------------|------------|
| ۲# | - | - | ۴۷،۸ | ۳۶۸۷۵ |
| ۳# | (۲۱)- (۱) | (۱۸-۱۴) | ۵۳،۲ | ۳۷۹۰۶ |
| ۴# | (۲۱)- (۱) (۲۲)- (۸) | (۷-۱۰) (۱۸-۱۴) | ۵۷،۶ | ۳۸۱۰۷ |
| ۵# | (۲۱)- (۱) (۲۴)- (۲۰) (۲۲)- (۸) | (۱۳-۶) (۷-۱۰) (۱۸-۱۴) | ۶۲،۷ | ۴۰۰۵۲ |

نتیجه‌گیری

در این مطالعه علاوه بر جابجایی توربین بادی عدم قطعیت توربین بادی را با استفاده از روش مونت کارلو مدل نموده است. برای بهینه‌سازی مسئله از الگوریتم NSGA-II با در نظر گرفتن توابع هدف هزینه

ACEC2021-72341

برنامه ریزی بهینه و احتمالاتی فیلترهای هارمونیک پسیو در شبکه های توزیع با در نظر گرفتن بازآرایی با تغییرات بار روزانه و نفوذ زیاد تولیدات فتوولتائیک

سجاد فتاحی مقدم^۱، سعید اسماعیلی^۲

^۱سجاد فتاحی مقدم، دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی برق دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ sajjad.f.m71@gmail.com

^۲سعید اسماعیلی، دانشیار بخش مهندسی برق دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ s_esmaeilil@uk.ac.ir

مقدمه

در مرجع [۱] طراحی فیلترهای پسیو در حضور مدار اشتاینمتر برای تعادل شبکه های نامتعادل شامل بارهای تک فاز ارائه شده است. و در همین مرجع تاکید شد که اعوجاج ولتاژ و پدیده رزونانس مشکلات بسیار جدی در سیستم های قدرت هستند. توابع بهینه سازی شده برای این مسئله شامل اعوجاج هارمونیک کل، مقدار انحراف ولتاژ، هزینه فیلترگذاری، پاسخ فرکانسی و ضریب توان باس بحرانی شبکه می باشند. مشکلات هارمونیک ناشی از دستگاه های مبتنی بر الکترونیک قدرت و بارهای غیر خطی در شبکه های توزیع رو به افزایش هستند. از سوی دیگر، نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر (RES)، به ویژه فتوولتائیک (PV) و مبدل های الکترونیک قدرت به طور مداوم در حال افزایش است [۲]. به دلیل افزایش جریان های هارمونیک بارهای غیر خطی و سیستم های PV، اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ (THDv) در حال افزایش است. علاوه بر این، تلفات انرژی [۳] و خطر پدیده تشدید [۴] می تواند با نصب سیستم های PV، افزایش یابد. جریان های هارمونیک تولید شده توسط بارهای غیر خطی و سیستم های PV، به دلیل الگوهای مصرف انرژی مصرف کنندگان مختلف و تغییر شرایط آب و هوایی ناشی از ابرها، طوفان ها و باران عمدتاً غیرقابل پیش بینی هستند. بنابراین، روش های احتمالاتی باید برای آنالیزهای هارمونیک در نظر گرفته شوند [۵]. طراحی فیلتر بهینه یکی از راه حل ها برای کاهش مشکلات هارمونیک است. فیلترهای هارمونیک پسیو (PHF) به صورت سری، شنت و سری-شنت دسته بندی می شوند. فیلترهای سری و شنت به ترتیب با ارائه مسیرهای با امپدانس بالا و پایین، جریان های هارمونیک را کاهش می دهند [۶]. علاوه بر این، فیلترهای هارمونیک اکتیو، جریان های هارمونیک مناسبی را تولید می کنند تا THD کاهش یابد [۷]. فیلترهای هارمونیک پسیو به دلیل سادگی و کم هزینه بودن هنوز هم در سیستم های قدرت بسیار مورد استفاده قرار می گیرند. و همچنین فیلتر هارمونیک تک تنظیمه محبوب ترین، کارآمدترین و اقتصادی ترین PHF های شنت هستند [۸]. اگرچه در بسیاری از

چکیده

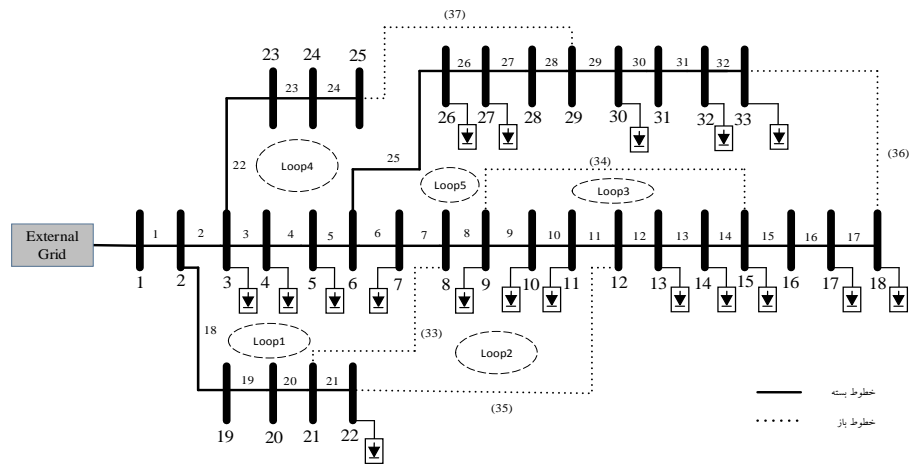
در سال های اخیر، شبکه های توزیع به طور فزاینده ای تحت تأثیر ماهیت تصادفی منابع هارمونیک توسط بارهای غیر خطی و منابع انرژی تجدید پذیر (RES) مانند سیستم های فتوولتائیک (PV) قرار گرفته اند. همچنین ویژگی های احتمالی بار هم باید برای برنامه ریزی بهینه ی فیلتر هارمونیک پسیو در نظر گرفته شود. اگرچه بازآرایی مجدد شبکه توزیع معمولاً برای کاهش تلفات انجام می شود، اما می تواند بر بسیاری از شاخص های دیگر شبکه مانند پروفیل ولتاژ و شاخص های کیفیت توان تأثیر بگذارد. بنابراین، مطالعات برنامه ریزی فیلتر هارمونیک که پیکربندی های مختلف شبکه را نادیده می گیرند، نمی توانند به راه حل های بهینه دست یابند. این تحقیق یک مدل کلی برای برنامه ریزی احتمالاتی فیلترهای هارمونیک پسیو مبتنی بر شبیه سازی مونت کارلو (MCS) و بازآرایی مبتنی بر کاهش تلفات در شبکه های توزیع را پیشنهاد می کند. دو هسته جداگانه الگوریتم ژنتیک (GA) برای حل مسئله اصلی برنامه ریزی فیلتر هارمونیک پسیو و بازآرایی تنظیم شده است. روش پیشنهادی سپس بر روی شبکه اصلاح شده ۳۳ باسه با نفوذ زیاد تولیدات فتوولتائیک اعمال می شود. نتایج شبیه سازی تأیید کردند که ترکیب توپولوژی های مختلف شبکه و در نظر گرفتن ویژگی های احتمالی منابع تولید هارمونیک در مطالعات افق برنامه ریزی، تضمین می کند که سطح اعوجاج هارمونیک کل (THD) شبکه در محدوده استاندارد حفظ شود و منجر به کاهش تلفات انرژی، اشغال ظرفیت و هزینه سرمایه گذاری فیلتر شود.

واژه های کلیدی: برنامه ریزی احتمالی، فیلتر هارمونیک پسیو، بازآرایی شبکه توزیع، نفوذ زیاد تولیدات فتوولتائیک

آثار، زوایای مرتبه هارمونیک ها در آنالیزهای هارمونیک در نظر گرفته نمی شود، اما این مهم است که دامنه و زاویه ی جریان های هارمونیک تزیق شده توسط بارهای بزرگ غیرخطی و سیستم های PV در نظر گرفته شود. مطالعات بسیاری در مورد برنامه ریزی بهینه PHF ها در ادبیات انجام شده است که می توان به روش های قطعی و احتمالی تقسیم شوند. به عنوان مثال، نویسندگان مراجع [۹-۱۱] برای به حداقل رساندن هزینه ی سرمایه گذاری و THD باس های سیستم از طریق یک مدل بهینه سازی برنامه ریزی فیلتر چند هدفه، از روش های قطعی استفاده کردند. با این حال، تلفات سیستم در این فرایند در نظر گرفته نمی شود. در [۱۲] برنامه ریزی فیلتر پسیو با توجه به کمینه سازی هزینه سرمایه گذاری فیلتر مورد مطالعه قرار می گیرد، در حالی که شاخص های کیفیت توان را در محدوده مجاز حفظ می کند. سرمایه گذاری فیلتر و هزینه های عملیاتی در مسئله برنامه ریزی مورد مطالعه در مرجع [۱۳] مورد بررسی قرار می گیرند. تعیین مکان بهینه و مشخصات فیلترهای پسیو به عنوان یک مسئله بهینه سازی برای به حداقل رساندن اعوجاج هارمونیک کل (THD) در [۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین افزایش ظرفیت میزبانی PV و حداقل سازی تلفات شبکه در هنگام بهبود ضریب توان و کاهش سطح THD به عنوان یک مسئله برنامه ریزی فیلتر پسیو نیز در [۱۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که تمامی مقالات مذکور تمامی روش های راه حل خود را به یک توپولوژی ثابت از شبکه ی مورد مطالعه اعمال نموده اند. به عبارت دیگر، آن ها توپولوژی های مختلف شبکه را در طول افق مطالعه نادیده گرفته اند. از سوی دیگر، با توجه به شرحی که در مرجع [۱۶] داده شده است. مقادیر امیدانس هارمونیک های شبکه تحت تاثیر پیکربندی شبکه و الگوی بار قرار می گیرند. این به این معنی است که اعمال پیکربندی جدید و الگوهای مختلف بار می تواند منجر به برخی انحرافات در شاخص های کیفیت توان شبکه شود. تاثیر پیکربندی مجدد شبکه بر شاخص های کیفیت توان در مقالات منتشر شده اخیر اثبات شده است [۱۷]. با توجه به نتایج ارائه شده در مرجع [۱۸] بازآرایی مجدد شبکه توزیع باعث تغییرات قابل توجهی در شاخص های هارمونیک با تغییر الگوی جریان هارمونیک در شبکه می شود. به طور مشابه نتایج این مقاله ثابت کرد که تمام شاخص های کیفیت توان ذکر شده در بالا به شدت تحت تاثیر بازآرایی مجدد سیستم قرار می گیرند. با توجه به تاثیر زیاد بازآرایی مجدد در سطح اعوجاج هارمونیک در شبکه های توزیع، هر مطالعه برنامه ریزی فیلتر هارمونیک که توپولوژی های مختلف شبکه را نادیده می گیرد ممکن است منجر به راه حل های غیر بهینه شود. از آنجایی که همه مقالات منتشر شده قبلی درباره طراحی فیلترهای هارمونیک مدل خود را بر روی یک توپولوژی ثابت شبکه اعمال می کنند، فقدان یک مدل جامع از برنامه ریزی فیلتر پسیو وجود دارد که توپولوژی های مختلف شبکه را در بر بگیرد. در مقاله حاضر، بهینه سازی احتمالاتی، تعیین مکان و جایابی فیلتر هارمونیک پسیو تک تنظیمه به طور همزمان با در نظر گرفتن

بازآرایی شبکه توزیع

معمولاً بازآرایی مجدد شبکه توزیع برای کاهش تلفات شبکه انجام می شود، اما می تواند بر بسیاری از شاخص های دیگر شبکه مانند پروفیل ولتاژ و شاخص های کیفیت توان تأثیر بگذارد. بنابراین، مطالعات برنامه ریزی فیلترهای هارمونیک که پیکربندی های مختلف شبکه را نادیده می گیرند، نمی توانند به راه حل های بهینه دست یابند. به عبارت دیگر، وقتی مطالعات برنامه ریزی فیلتر هارمونیک با توجه به یک توپولوژی ثابت شبکه انجام شود، رضایت محدودیت های کیفیت توان تضمین نمی شود در حالی که بازآرایی مجدد مبتنی بر کاهش تلفات در دنیای واقعی برای شبکه توزیع اعمال می شود. به منظور مشخص کردن توپولوژی های مختلف شبکه در طول افق برنامه ریزی و تصمیمات اپراتور شبکه توزیع برای بازآرایی مجدد با توجه به استراتژی پیشنهاد شده در مرجع [۲۱] عمل می شود. طبق این مقاله، همانطور که دوره ی بازآرایی مجدد کاهش می یابد، هزینه کل سیستم به دلیل فرسایش سوئیچ ها افزایش می یابد. از طرف دیگر، درحالی که شبکه با همان توپولوژی ثابت اگر برای مدت طولانی مورد بهره برداری قرار گیرد، بعد از گذشت زمان هزینه کل شبکه به دلیل توپولوژی غیر بهینه و افزایش تلفات انرژی شبکه، افزایش می یابد. تعریف مسئله بازآرایی مجدد مبتنی بر کاهش تلفات با توجه به استراتژی توصیف شده، کل تلفات انرژی سیستم در حضور بارهای غیرخطی در یک دوره زمانی مشخص تعیین می شود. شکل ۱ یک شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE به همراه خطوط تبادلی به همراه نصب سیستم های PV را نشان می دهد. از آنجا که منحنی های بار روزانه شبکه ی توزیع دارای تغییرات زمانی هستند، پیکربندی بهینه سیستم به طور مداوم تغییر می کند. با این حال، بازآرایی شبکه براساس یک برنامه ساعتی ممکن است منطقی نباشد، چرا که به تعداد زیادی از سوئیچ ها برای کنترل از راه دور نیاز دارد، که مقرون به صرفه نیست.



شکل ۱: شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE

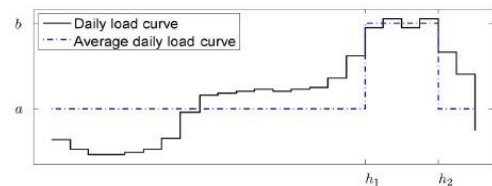
برنامه‌ریزی فیلتر هارمونیک پسیو به جهت فنی - اقتصادی همان طور که در [۲۲ و ۲۳] توضیح داده شده، مسئله برنامه‌ریزی فیلترهای هارمونیک تک تنظیمه، به عنوان متداول ترین فیلتر بکار رفته برای حذف هارمونیک ها در شبکه های توزیع، می توان به عنوان انتخاب ظرفیت توان راکتیو فیلترها، فرکانس تنظیم و تعیین باس بهینه برای نصب فیلتر تعریف کرد. لازم به ذکر است که این مسئله محدود به حفظ پروفیل ولتاژ و سطوح هارمونیک در محدوده استاندارد است. بر این اساس، چنین مسئله ای را می توان به عنوان یک مسئله کمینه سازی هزینه با محدودیت های فنی مورد مطالعه قرار داد. در این مقاله، با توجه به [۲۴]، تابع هدف مسئله برنامه‌ریزی فیلتر هارمونیک پسیو به صورت مجموع هزینه های ناشی از تلفات شبکه و سرمایه گذاری فیلتر تعریف می شود. کل تابع هزینه می تواند به شکل هزینه سالانه معادل در معادله ۲ ارائه شود.

$$OF_P = (C_{inv} + C_{loss}) = \frac{IR(1+IR)^N}{(1+IR)^N - 1} (C_{inv}^P + C_{co}^P) + C_{EL}^P \quad (2)$$

در این معادله، تابع هدف مسئله برنامه‌ریزی فیلتر است که در آن C_{inv} و C_{loss} به ترتیب هزینه تلفات و هزینه سرمایه گذاری فیلتر هستند. هزینه معادل سالانه برابر، C_{inv}^P و C_{co}^P ارزش فعلی هزینه سرمایه گذاری فیلتر و اشغال ظرفیت است، C_{EL}^P هزینه تلفات انرژی سالانه است، IR نرخ بهره اقتصادی است و N تعداد سال هایی است که در افق برنامه‌ریزی انتخاب شده است که براساس عمر فیلتر پسیو انتخاب شده است.

هر سوئیچ دارای حداکثر تعداد دفعات قطع و وصل مجاز در طول عمر خود است و اعمال تعداد دفعات قطع و وصل مکرر باعث کاهش طول عمر سوئیچ می شود. برای بازآرایی شبکه کم تر از ۲۴ بار در روز، دوره ۲۴ ساعته را به دو فاصله تقسیم می شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. ساعات h_1 و h_2 باید محاسبه شود و ترم قدر مطلق (a-b) باید حداکثر شود. سطح بار a و b به ترتیب میانگین مقادیر بار در بازه زمانی اول و دوم است. انتظار می رود این تکنیک هنگامی که منحنی بار روزانه شبکه دارای حداکثر تغییرات است، سیستم را بازآرایی کند. تعریف مسئله بازآرایی مجدد مبتنی بر کاهش تلفات با توجه به استراتژی توصیف شده، تلفات انرژی کل شبکه در حضور بارهای غیرخطی و منابع فتوولتائیک در یک دوره زمانی مشخص را می توان به شکل معادله ۱ فرموله کرد.

$$OF_{R,s} = \sum P_{LOSS_s} = 3 \times \sum_j r_j \sum_h |B_{h,j,s}|^2 \quad (1)$$



شکل ۲: منحنی بار روزانه

که در آنها h و s به ترتیب شاخص شاخه های شبکه، مرتبه هارمونیک و بازآرایی مجدد در هر روز هستند. علاوه بر این، $OF_{R,s}$ ، P_{LOSS_s} و $B_{h,j,s}$ به ترتیب تلفات انرژی کل شبکه به عنوان تابع هدف مسئله بازآرایی مجدد در هر روز S بر حسب (Kwh) و تلفات کل شبکه در ساعت t هر روز و بر حسب (Kw) و جریان هارمونیک مرتبه h ام در شاخه زد در ساعت t از هر نوع S بر حسب (KA) و مقاومت شاخه زبر حسب (Ω) می باشند.

محدودیت ها

با توجه به مرجع [۲۵]، در این مقاله مسئله برنامه‌ریزی فیلتر هارمونیک پسیو با استفاده از معادلات ۳ تا ۷ محدود شده است.

$$THD_{i,h} < THD_{Max} \quad (۳)$$

$$IHD_{i,h} < IHD_{Max} \quad (۴)$$

$$V_{Min} \leq V_{i,t,rms} \leq V_{Max} \quad (۵)$$

$$N_{fil} \leq N_{fil,max} \quad (۶)$$

$$PF_{min} \leq PF \leq PF_{max} \quad (۷)$$

این محدودیت‌ها باید با توجه به مجموعه پارامترهای معرفی شده در بخش قبلی مورد ارزیابی قرار گیرند. لازم به ذکر است که در رابطه ۶ N_{fil} تعداد کل فیلترهای نصب شده بر روی همه باس ها و مرتبه های هارمونیک است. علاوه بر این، THD، IHD و مقدار ولتاژ موثر باس ها و ضریب توان باس ها با استفاده از معادلات ۸ تا ۱۱ محاسبه می شوند.

$$THD_{i,h} = \left(\sqrt{\sum_{h \in H, h \neq 1} \frac{V_{i,h}^2}{V_{i,1}^2}} \right) \times 100 \quad (۸)$$

$$IHD_{i,h} = \left(\frac{V_{i,h}}{V_{i,1}} \right) \times 100 \quad (۹)$$

$$V_{i,rms} = \sqrt{\sum_{h \in H} V_{i,h}^2} \quad (۱۰)$$

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{3 \times \sum V_{i,i}^h I_{i,i}^h \cos \theta_h}{3 \times \sqrt{\sum_h (V_{i,i}^h)^2} \sqrt{\sum_h (I_{i,i}^h)^2}} \quad (۱۱)$$

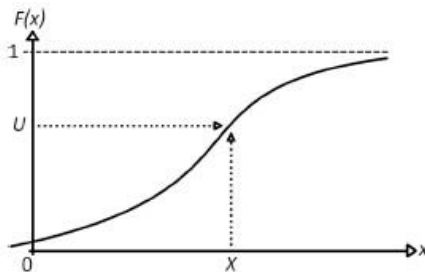
شبیه سازی مونت کارلو

از آنجا که تولید و بار عمدتاً دارای عدم قطعیت هستند، باید مطالعات احتمالاتی در مورد مسئله برنامه ریزی فیلتر پسیو انجام شود. به منظور رسیدگی به مسئله پخش بار احتمالاتی، برخی از رویکردها در ادبیات مورد بررسی قرار گرفته است. روش های پیشنهادی می توانند به روش های مبتنی بر مونت کارلو، تحلیلی و تقریبی تقسیم شوند. شبیه سازی مونت کارلو یک روش تکراری برای حل مسئله احتمالاتی است. در این روش، اول از همه باید تعداد کافی نمونه تولید شود. روش های کلی مختلفی برای تولید متغیرهای تصادفی تک بعدی از یک تابع توزیع وجود دارد. روش تبدیل معکوس برای تولید متغیر

تصادفی در کار حاضر در نظر گرفته شده است تا سرعت همگرایی شبیه سازی مونت کارلو را افزایش دهد. متغیر تصادفی را می توان از رابطه ۱۲ محاسبه کرد.

$$X = F^{-1}(U) \quad (۱۲)$$

که U تابع توزیع نرمال است، F^{-1} معکوس CDF و X متغیر تصادفی است. شکل ۳ مفهوم این روش را نشان می دهد. با توجه به تئوری حد مرکزی، میانگین سالانه برای توزیع بار مسکونی می تواند با یک تابع توزیع نرمال نشان داده شود حتی اگر بارهای روزانه تکی به طور نرمال توزیع نشده باشند. این فرض همچنین در کارهای تحقیقاتی متعددی انجام شده است که در آن یک تابع توزیع نرمال برای بارهای مسکونی در شبکه های توزیع استفاده شده است [۲۶].



شکل ۳: روش تبدیل معکوس

برنامه‌ریزی فیلتر پسیو با در نظر گرفتن بازآرایی مجدد

مدل کلی برنامه‌ریزی فیلتر هارمونیک پسیو با در نظر گرفتن بازآرایی مجدد مبتنی بر کاهش تلفات براساس روابط ذکر شده در بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به مسئله سطح پایین تر، تعیین توپولوژی برای هر روز مشخص شده و یک پیکربندی بهینه شبکه با توجه به معادله ۱ انجام می شود. سپس برنامه‌ریزی فیلتر پسیو براساس رابطه ۲ و نتایج مسئله سطح پایین تر مورد مطالعه قرار می گیرد. به عبارت دیگر، در مدل پیشنهادی، بهینه‌سازی سطح پایین تر توپولوژی شبکه را در دوره‌های زمانی مختلف در طول افق برنامه‌ریزی فیلتر مشخص می کند و بهینه‌سازی سطح بالا، اندازه و مکان فیلتر پسیو را با توجه به توپولوژی‌های مختلف شبکه مشخص می کند. راهکار جامع و احتمالاتی پیشنهادی برای مسئله تعریف شده در بخش بعدی ارائه شده است. جدول ۱ مقدار توان تولیدی PV های نصب شده روی شبکه مورد مطالعه را نشان می دهد. همچنین طیف هارمونیک این منابع از مرجع [۲۷] گرفته شده است.

جدول ۱: مقدار توان تولیدی PV های اضافه شده به شبکه ۳۳ باسه

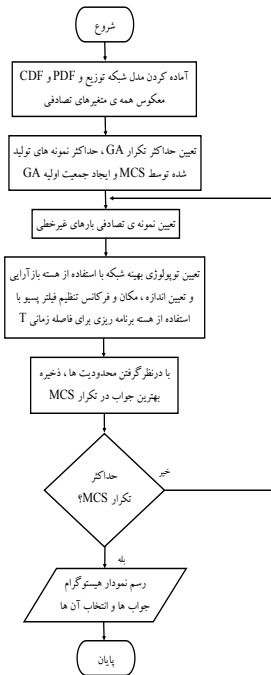
| باس | ۳ | ۴ | ۵ | ۷ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ | ۱۷ | ۱۸ | ۲۲ | ۲۶ | ۲۷ | ۳۰ | ۳۲ | ۳۳ |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| P(Kw) | ۱۰۰ | ۲۰۰ | ۱۰۰ | ۲۰۰ | ۱۰۰ | ۲۰۰ | ۵۰۰ | ۳۵۰ | ۶۵۰ | ۲۵۰ | ۲۲۰ | ۱۰۰ | ۵۰ | ۲۵۰ | ۴۰۰ | ۴۵۰ | ۶۵۰ | ۱۰۰ |

مدل جامع برنامه‌ریزی احتمالاتی فیلتر پسیو و بازآرایی

شکل ۴ فلوجارت روش راه حل جامع برنامه ریزی احتمالاتی فیلتر پسیو و بازآرایی را نشان می دهد. در مرحله اول، مدل سازی شبکه توزیع مورد نظر انجام می شود. پس از مشخص کردن PDF برای بارهای غیرخطی (به عنوان مثال PDF نرمال)، CDF معکوس محاسبه می شود. همانطور که در شبیه سازی مونت کارلو (MCS) توضیح داده شد، روش های کلی مختلفی برای تولید متغیرهای تصادفی تک بعدی از تابع توزیع مقرر وجود دارد. در مقاله حاضر، روش تبدیل معکوس برای تولید متغیر تصادفی در نظر گرفته شده است تا سرعت همگرایی MCS را افزایش دهد. در مرحله بعد، حداکثر تکرار برای GA و تعداد نمونه های تولید شده برای MCS به ترتیب برابر ۳۰ و ۱۰۰ فرض می شود. و در ادامه نسل اولیه GA ایجاد می شود. محاسبه ی نمونه بارهای غیرخطی، یک عدد تصادفی طبق یک تابع توزیع نرمال تولید می شود. در مرحله بعد، پخش بار هارمونیک با در نظر گرفتن هارمونیک های منابع فتوولتائیک انجام می شود. سپس تلفات انرژی، THD و تابع هزینه ارزیابی می شود و بهترین جواب در هر تکرار مونت کارلو ذخیره می شود. در مرحله بعدی، معیار توقف برای ساخت سناریو توسط MCS بررسی می شود. و در مرحله آخر، به دلیل اینکه ما به تعداد تکرار شبیه سازی مونت کارلو جواب بهینه داریم و برای انتخاب جوابی که تقریباً در تمامی سطوح مختلف بار شبکه قابل قبول باشد، نمودار هیستوگرام جواب های بدست آمده را رسم و جوابی که بیشترین تکرار را داشته به عنوان بهترین جواب مسئله انتخاب، شناخته و چاپ می شود.

شبیه سازی

به منظور ارزیابی اثربخشی روش پیشنهادی برای حل مسئله برنامه ریزی احتمالاتی فیلتر هارمونیک پسیو، استراتژی راه حل برای یک سیستم توزیع ۳۳ باسه اصلاح شده با نفوذ بالای منابع فتوولتائیک اعمال می شود. نمودار تک خطی سیستم ۳۳ باسه در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که خطوط خط چین خطوط تبدیلی شبکه را نشان می دهد. از آنجایی که دو بازآرایی در هر روز در ساعت های مشخص مقرون به صرفه است. در این مقاله بازآرایی شبکه در همان ساعات انجام شده در مرجع [۲۲] انجام می شود. علاوه بر این، منحنی های بار روزانه بارهای مسکونی، تجاری و صنعتی و ترکیب نوع بار در کلیه باس های شبکه نیز از همین مرجع گرفته شده است. در این مقاله فیلترهای پسیو برای مرتبه پنجم، هفتم، یازدهم و سیزدهم در مطالعه برنامه‌ریزی پیاده‌سازی می‌شوند و به ترتیب روی ۴/۷، ۶/۶، ۱۰/۴ و ۱۲/۲ تنظیم می‌شوند.



شکل ۴: فلوجارت مدل جامع برنامه ریزی احتمالاتی فیلتر پسیو و بازآرایی

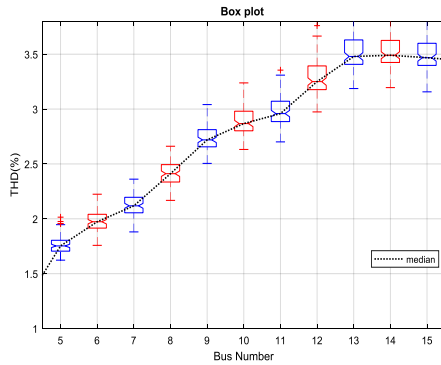
نتایج شبیه سازی نشان می دهد با اتصال PV های بیشتر به شبکه، THD باس ها افزایش یافته و فراتر از محدوده مجاز می رود. بنابراین، با افزایش نفوذ PV ها، شبکه با مشکلات هارمونیک روبرو است که باید بطور مناسب برطرف شود.

ارزیابی شبکه مینا

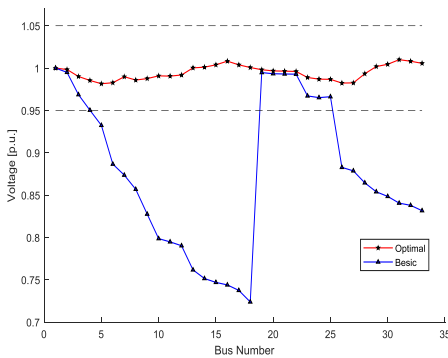
در این بخش شبکه توزیع ۳۳ باسه ی اصلاح شده در حضور بارهای غیرخطی اضافه شده مورد ارزیابی قرار می گیرد. لازم به ذکر است که هیچ فیلتر هارمونیک در شبکه وجود ندارد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نفوذ بالای بارهای غیرخطی، مقادیر THD ولتاژ در بسیاری از باس ها در طول افق ارزیابی از محدودیت های استاندارد خارج می شوند. چنین تخطی از محدودیت ها مستلزم مطالعات برنامه‌ریزی فیلتر هارمونیک پسیو در این شبکه می باشد.

جدول ۳: توپولوژی های انتخاب شده در افق برنامه ریزی

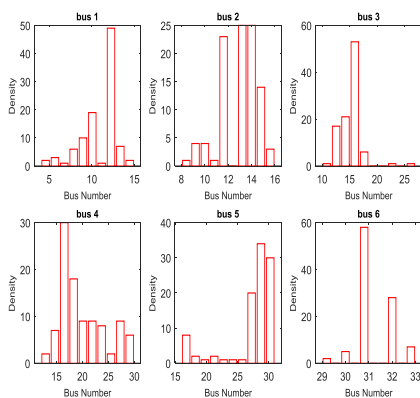
| ساعت | خطوط باز شده |
|------|---------------|
| ۰-۸ | ۶-۱۱-۱۴-۱۶-۲۸ |
| ۸-۲۴ | ۵-۱۲-۲۱-۲۶-۲۹ |



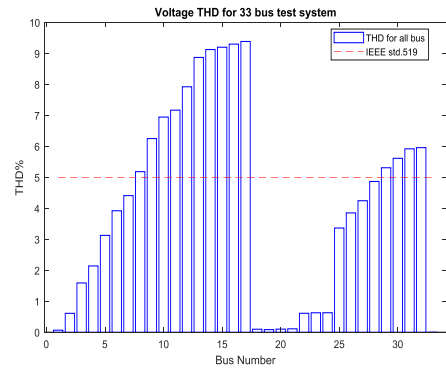
شکل ۶: مقدار THD تعدادی از باس ها بعد از افق برنامه ریزی



شکل ۷: نمودار پروفیل ولتاژ باس ها



شکل ۸: نمودار هیستوگرام باس های کاندید



شکل ۵: مقدار TDH باس ها در شبکه مبنا و در حضور PV ها

مطالعه جامع برنامه‌ریزی احتمالاتی فیلتر و بازآرایی روزانه

در این بخش، راه حل کامل داده شده در شکل ۴ برای حل مدل کلی مسئله برنامه‌ریزی احتمالاتی فیلتر پسیو و بازآرایی روزانه مبتنی بر کاهش تلفات اعمال می‌شود. فیلترهای انتخاب شده و توپولوژی‌های منتخب در هر روز و حداکثر THD باس ها به ترتیب در جدول های ۲، ۳ و شکل ۶ داده شده اند. با نتایج ارائه شده در این بخش، واضح است که مدل‌سازی دقیق توپولوژی‌های شبکه در طول افق مطالعه منجر به راه‌حل‌های دقیق برنامه‌ریزی فیلتر می‌شود. با توجه به جدول ۲، افزودن فیلترهای انتخاب‌شده به شبکه، کاهش تلفات انرژی شبکه و اشغال ظرفیت را در حالی که محدودیت های موجود در محدوده استاندارد حفظ می‌کنند را فراهم می‌کند. مقایسه با روش‌های راه‌حل دیگر، این فیلترها به طور موثر مقادیر THD باس ها را کاهش داده و تلفات انرژی سیستم و هم کاهش ظرفیت را از طریق یک هزینه پایین سرمایه‌گذاری فیلتر کاهش داده اند. حداکثر و حداقل پروفیل ولتاژ در حضور فیلترهای انتخاب‌شده در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به حداقل و حداکثر اندازه ولتاژ هر باس این شکل تایید می‌کند که محدودیت های ولتاژ در کل افق برنامه ریزی در محدوده استاندارد حفظ می‌شود. همچنین شکل ۸ نمودار هیستوگرام باس های کاندید جهت نصب فیلتر های پسیو را نشان می‌دهد. با توجه به مقایسه نتایج، مشخص است که بهترین مشخصات شبکه از طریق پایین‌ترین هزینه برنامه‌ریزی فیلترها در روش پیشنهادی ارائه شده در این مقاله بدست می‌آید.

جدول ۲: برنامه ریزی فیلتر پسیو با در نظر گرفتن بازآرایی

| باس | توان راکتیو خازن | مرتب‌ه فیلتر تنظیم شده |
|-----|------------------|------------------------|
| ۱۲ | ۱۳۵۰ | ۷ |
| ۱۳ | ۱۳۵۰ | ۵ |
| ۱۶ | ۱۵۰۰ | ۱۱ |
| ۱۷ | ۹۰۰ | ۷ |
| ۲۹ | ۱۲۰۰ | ۵ |
| ۳۱ | ۱۵۰۰ | ۵ |

نتایج

شبکه های توزیع به طور فزاینده ای تحت تأثیر ماهیت تصادفی منابع هارمونیک توسط بارهای غیرخطی و منابع انرژی تجدید پذیر (RES) مانند سیستم های فتوولتائیک (PV) قرار گرفته اند. همچنین ویژگیهای احتمالی بار و تولید PV نیز برای برنامه ریزی بهینه فیلتر هارمونیک پسیو بایستی در نظر گرفته شود. نتایج شبیه سازی تأیید کردند که با توجه به عدم قطعیت منابع تولید هارمونیک و نادیده گرفتن بازآرایی مجدد سیستم در فرایند برنامه ریزی ممکن است در برخی از ساعت های مشخص در طول افق برنامه ریزی منجر به نقض محدودیت های کیفیت توان شود. از طرف دیگر، ترکیب توپولوژی مختلف شبکه و در نظر گرفتن ویژگی های احتمالی بارهای غیرخطی در مطالعه برنامه ریزی تضمین می کند که سطح اوج هارمونیک کل (THD) سیستم در محدوده استاندارد حفظ شود و منجر به کاهش تلفات انرژی، اشغال ظرفیت و هزینه سرمایه گذاری فیلتر شود.

نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله بهینه سازی احتمالی فیلتر هارمونیک پسیو با در نظر گرفتن داده های شبکه و جریان هارمونیک PV ها برای کاهش اثرات هارمونیک سیستم های PV و بارهای غیرخطی ارائه شده است. با توجه به ماهیت تصادفی بار و تولید PV، شبیه سازی مونت کارلو برای حل مسئله برنامه ریزی فیلتر انجام شد. برای افزایش میزان همگرایی MCS در حالی که از نظر محاسباتی کارآمد باشد، از روش تبدیل معکوس برای تولید متغیر تصادفی استفاده شده است. برای افزایش دقت نتایج روش پیشنهادی در این کار هم دامنه و هم زاویه فاز جریان های هارمونیک در نظر گرفته است. همچنین یک استراتژی جدید برنامه ریزی فیلتر هارمونیک پسیو که توپولوژی های مختلف شبکه را در بر می گیرد، ارائه شده است. در این روش، مسئله بازآرایی مبتنی بر کاهش تلفات در طول افق برنامه ریزی، توپولوژی های شبکه را تعیین می کند. و در فرآیند برنامه ریزی فیلتر، به منظور حل مدل کلی، مسئله سطح بالاتر برنامه ریزی فیلتر در دوره های زمانی معین روزانه اندازه، مکان و فرکانس تنظیم فیلتر را تعیین می کند.

مراجع

- [1] J. Khajouei, S. Esmaeili, and S. M. Nosratabadi, "Optimal design of passive filters considering the effect of Steinmetz circuit resonance under unbalanced and non-sinusoidal conditions," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 14, no. 12, pp. 2333–2344, 2020.
- [2] Kalair A, Abas N, Kalair AR, Saleem Z, Khan N. Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. Renewable Sustain Energy Rev
- [3] Nduka OS, Pal BC. Quantitative evaluation of actual loss reduction benefits of a renewable heavy DG distribution network. IEEE Trans Sustain Energy 2018;9(3):1384–96.
- [4] Hu H, Shi Q, He Z, He J, Gao S. Potential harmonic resonance impacts of PV inverter filters on distribution systems. IEEE Trans Sustain Energy 2015;6(1):151–61. In collection, A., 1991. "Article
- [5] Kaddah SS, Abo-Al-Ez KhM, Megahed TF, Osman MG. Probabilistic power quality indices for electric grids with increased penetration level of wind power generation. Int J Elect Power Energy Syst 2016;77:50–8.
- [6] Dugan RC, McGranaghan MF, Santoso S, Beaty HW. Applied harmonics. Electrical power systems quality. 2nd ed. McGraw-Hill Education; 2004. p. 225–94 chapter 6.
- [7] Akagi H. New trends in active filters for power conditioning. IEEE Trans Ind Appl 1996;32(6):1312–22.
- [8] Sakar S, Balci ME, Aleem ShHEA, Zobaa AF. Integration of large-scale PV plants in non-sinusoidal environments: considerations on hosting capacity and harmonic distortion limits Review article. Renewable Sustain Energy Rev 2018;82:176–86.
- [9] Chen YL. Optimal multi-objective single-tuned harmonic filter planning. IEEE Trans Power Del 2005;20(2):1191–7.
- [10] Chang YP, Low Ch. Optimization of a passive harmonic filter based on the neuralgenetic algorithm with fuzzy logic for a steel manufacturing plant. Expert Syst Appl 2008;34(3):2059–70.
- [11] Chang YP. Integration of SQP and PSO for optimal planning of harmonic filters. Expert Syst Appl 2010;37(3):2522–30.
- [12] Y.-Y. Hong, W.-J. Liao, Optimal passive filter planning considering probabilistic parameters using cumulant and adaptive dynamic clone selection algorithm, Int. J. Electr. Power Energy Syst. 45 (2013) 159–166.
- [13] S.H.E. Abdel Aleem, A.F. Zobaa, M.E. Balci, Optimal resonance-free third-order high-pass filters based on minimization of the total cost of the filters using Crow Search Algorithm, Electr. Power Syst. Res. 151 (2017) 381–394.



- sitting, sizing and harmonic tuning orders setting of LC harmonic passive power filters in radial distribution systems with linear and nonlinear loads, *Appl. Soft Comput.* 29 (2015) 345–356.
- [23] M. Mohammadi, A.M. Rozbahani, M. Montazeri, Multi criteria simultaneous planning of passive filters and distributed generation simultaneously in distribution system considering nonlinear loads with adaptive bacterial foraging optimization approach, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 79 (2016) 253–262.
- [24] A.A.A. El-Ela, S. Allam, H. El-Arwash, An optimal design of single tuned filter in distribution systems, *Electr. Power Syst. Res.* 78 (2008) 967–974.
- [25] J.C. Leite, I.P. Abril, M.S.S. Azevedo, Capacitor and passive filter placement in distribution systems by nondominated sorting genetic algorithm-II, *Electr. Power Syst. Res.* 143 (2017) 482–489.
- [26] M. R. Jannesar, A. Sedighi, M. Savaghebi, A. Anvari-Moghaddam, and J. M. Guerrero, “Optimal probabilistic planning of passive harmonic filters in distribution networks with high penetration of photovoltaic generation,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 110, no. February, pp. 332–348, 2019.
- [27] Syed Muhammad Ahsan, Hassan Abbas Khan, Akhtar Hussain, Sarmad Tariq and Nauman Ahmad Zaffar, Harmonic Analysis of Grid-Connected Solar PV Systems with Nonlinear household Loads in Low-Voltage Distribution Networks, *Sustainability*, 13(7), (2021) 1–23
- [14] Y.-P. Chang, C.-J. Wu, Optimal multiobjective planning of large-scale passive harmonic filters using hybrid differential evolution method considering parameter and loading uncertainty, *IEEE Trans. Power Delivery* 20 (2005) 408–416.
- [15] S. Sakar, M.E. Balci, S.H.E.A. Aleem, A.F. Zobaa, Increasing PV hosting capacity in distorted distribution systems using passive harmonic filtering, *Electr. Power Syst. Res.* 148 (2017) 74–86.
- [16] J. Arrillaga, N.R. Watson, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, 2004.
- [17] S. Jazebi, B. Vahidi, Reconfiguration of distribution networks to mitigate utilities power quality disturbances, *Electr. Power Syst. Res.* 91 (2012) 9–17.
- [18] Y. Ch, S.K. Goswami, D. Chatterjee, Effect of network reconfiguration on power quality of distribution system, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 83 (2016) 87–95.
- [19] IEEE Power and Energy Society, “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” *IEEE Std.* 519-2014, vol. 2014, p. 29, 2014
- [20] M. McGranaghan and G. Beaulieu, “Update on IEC 61000-3-6: Harmonic emission limits for customers connected to MV, HV, and EHV,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, pp. 1158–1161, 2006.
- [21] Z. Ghofrani-Jahromi, M. Kazemi, M. Ehsan, Distribution switches upgrade for loss reduction and reliability improvement, *IEEE Trans. Power Delivery* 30 (2015) 684–692.
- [22] M. Mohammadi, Bacterial foraging optimization and adaptive version for economically optimum

ACEC2021-75966

پایانه بازگشت، حالت لغزشی کنترل کننده ردیابی نقطه حداکثر توان برای سیستم‌های فتوولتائیک

محمد رضا محمدیان آسیاب^۱، جابر کوچکی سفید داربنی^۲

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج؛ mohammadrezamohammadiyan28@yahoo.com

^۲ کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج؛ jabber.koochaki@gmail.com

چکیده

در این مقاله، یک کنترل جدید ردیابی نقطه بیشینه توان (MPPT) برای یک سیستم فتوولتائیک (PV) براساس هر دو روش گام به عقب و حالت لغزشی گذرا توسعه داده شده است. این سیستم از یک آرایه خورشیدی، یک مبدل تقویت DC / DC، یک کنترل کننده MPPT و یک بار خروجی تشکیل شده است. ترمینال Backstepping کنترل کننده حالت لغزش (BTSMC) از طریق یک مبدل تقویت DC - DC برای رسیدن به حداکثر توان خروجی استفاده می شود. پایداری سیستم حلقه بسته با استفاده از روش لیاپانوف تضمین شده است. این روش جدید پاسخ گذرای خوب، خطای ردیابی کم و واکنش بسیار سریع در برابر تابش خورشیدی و تغییرات دمای سلول PV را فراهم می کند. علاوه بر این، لرزش که عیب اصلی روش حالت لغزشی کلاسیک را تشکیل می دهد، حذف شده است. برای نشان دادن کارایی و قدرت کنترل پیشنهادی، شبیه سازی های مختلفی تحت شرایط جوی مختلف در Matlab / SIMink انجام شده است.

واژه های کلیدی: بازگشت (Backstepping)؛ کنترل حالت لغزشی پایانه؛ پایداری لیاپانوف؛ ردیابی نقطه حداکثر توان؛ سیستم فتوولتائیک

مقدمه

منابع انرژی تجدیدپذیر امروزه بخش مهمی از تولید برق هستند. تولید فتوولتائیک (PV) یکی از منابع تجدید پذیر بسیار امیدوار کننده است، زیرا مزایای زیادی از قبیل در دسترس بودن، تمیز بودن، نگهداری کم، و عدم آلودگی صوتی را نشان می دهد. با این حال، همه سیستم های PV دو مشکل دارند: بازده تولید توان الکتریکی بسیار پایین، به ویژه تحت حالت های تابش پایین و وابستگی متقابل مقدار توان الکتریکی تولید شده توسط آرایه های

خورشیدی و شرایط آب و هوایی. عدم تطابق بار تحت این شرایط آب و هوایی می تواند رخ دهد و حداکثر توان ممکن است استخراج نشود و به بار تحویل داده نشود. این مساله به اصطلاح ردیابی نقطه توان بیشینه (MPPT) را تشکیل می دهد [۱ - ۴]. روش های بسیاری برای تعیین نقطه حداکثر توان (MPP) تحت شرایط مختلف توسعه داده شده اند. برخی از آنها براساس اصل شناخته شده آشفته شدن و مشاهده (P&O) [۸]، و برخی دیگر براساس کنترل حالت لغزشی [۹ - ۱۲]، بر روی شبکه های عصبی مصنوعی، یا بر روی الگوریتم های منطق فازی [۱، ۲، ۷] هستند. در [۱۲ - ۱۴]، روش های مبتنی بر حداکثر ولتاژ توان (MPV) با استفاده از طرح کنترل MPPT دو حلقه ای توسعه داده شده اند. حلقه اول تعیین مرجع MPV آرایه PV و حلقه دوم تنظیم ولتاژ آرایه PV به ولتاژ مرجع است. این روش جستجوی مرجع MPV و ردیابی ولتاژ PV را تا رسیدن به حداکثر توان تکرار می کند. برای پی گیری موثرتر MPP، یک روش ترکیبی متشکل از دو حلقه در [۱۵] پیشنهاد شده است. در حلقه اول، MPP با استفاده از یک روش رسانایی افزایشی تخمین زده می شود، و در حلقه دوم یک کنترل کننده حالت لغزشی ترمینال برای هدایت سیستم به سمت MPP مرجع جستجو شده توسعه داده می شود. نویسندگان در [۱۶] استفاده از کنترل حالت لغزشی Backstepping را برای حلقه دوم پیشنهاد دادند. قانون کنترل حالت لغزشی گام به عقب براساس تجزیه و تحلیل پایداری مجانبی است در حالی که مسیرهای سیستم به یک جاذب مشخص که در زمان نامحدود به تعادل می رسد تکامل می یابد. بسیاری از نویسندگان یک راه جایگزین برای رسیدن به هم گرایی زمان محدود براساس روش های جاذب ترمینال [۱۵ - ۱۸] پیشنهاد کرده اند که عملکرد با دقت بالا را در کنار تضعیف اختلال فراهم می کند. علاوه بر این، لرزش در BSMC همچنان مشکلی است که باید بر آن غلبه کرد.

در نظر گرفتن $x(t) = [V_{pv}(t) I_L(t) V_{C_2}(t)]^T$ ، مجموعه معادلات در (۱) را می‌توان به شکل زیر نوشت [۱۵]:

$$\begin{cases} \frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_1} (I_{pv} - I_L) \\ \frac{dI_L}{dt} = f_1(x) + g_1(x)d \\ \frac{dV_{C_2}}{dt} = f_2(x) + g_2(x)d \end{cases} \quad (2)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= \frac{1}{L} V_{pv} - \frac{R_C}{L(1+\frac{R_C}{R})} I_L + \frac{1}{L} \left(\frac{R_C}{R_C+R} - 1 \right) V_{C_2} - \frac{V_D}{L} \\ f_2(x) &= \frac{1}{C_2(1+\frac{R_C}{R})} I_L - \frac{1}{C_2(R_C+R)} V_{C_2} \\ g_1(x) &= \frac{1}{L(1+\frac{R_C}{R})} I_L - \frac{1}{L} \left(\frac{R_C}{R_C+R} - 1 \right) V_{C_2} + \frac{V_D}{L} \\ g_2(x) &= -\frac{1}{L} \frac{1}{C_2(1+\frac{R_C}{R})} I_L \end{aligned}$$

طراحی کنترل کننده حالت لغزشی پایانه Backstepping MPPT

ساختار کنترل کلی در شکل ۲ نشان داده شده است. در اینجا، i_{pv} و v_{pv} از آرایه PV اندازه‌گیری شده و به الگوریتم جستجوی MPP منتقل می‌شوند، که حداکثر ولتاژ مرجع را تولید می‌کند. سپس ولتاژ مرجع به کنترل کننده BTSM مبتنی بر MPV برای ردیابی توان حداکثری داده می‌شود.

الگوریتم جستجوی MPP

معادلات باید به برای جستجوی ولتاژ MPP از روش رسانایی افزایشی استفاده می‌کنیم [۱، ۱۵]. شیب توان می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2)$$

هنگامی که شیب توان $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ ، $i.e.$ $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ می‌توان

PV در حداکثر تولید برق کار می‌کند. بنابراین، قانون به روزرسانی V_{ref} با قوانین زیر ارائه شده است [۱، ۱۵]:

$$\begin{cases} V_{ref} = V_{ref}(k-1) + \Delta V, \text{ for } \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \\ V_{ref} = V_{ref}(k-1) - \Delta V, \text{ for } \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \end{cases} \quad (3)$$

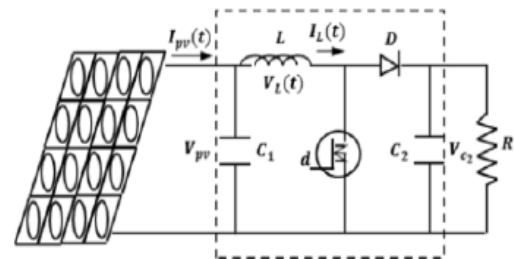
پایانه Backstepping کنترل کننده مدل لغزشی

کنترل کننده حالت لغزشی ترمینال گام به عقب برای استخراج حداکثر توان از صفحه PV طراحی شده است. هدف این کنترل کننده این است که اجازه دهد ولتاژ PV صفحه V_{pv} ولتاژ حداکثر مرجع V_{ref} را با عمل کردن بر روی دوره کاری سوئیچ مبدل بوسه ردیابی کند. ماهیت بازگشتی طرح کنترل پیشنهادی مشابه با روش گام به عقب استاندارد است. با این حال، طراحی کنترل پیشنهادی از گام به عقب برای طراحی کنترل کننده‌ها با سطح لغزش ترمینال در آخرین مرحله استفاده می‌کند [۲۲ - ۲۳]. این طرح به شرح زیر است: برای اولین مرحله یک سطح لغزنده مرتبه صفر را در نظر می‌گیریم:

به منظور جلوگیری از لرزش، عیب عمده در روش حالت لغزشی، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از آن‌ها شامل جایگزینی تابع علامت با تقریب پیوسته در مجاورت سطح لغزش است. تابع اشباع یا تابع سیگموئید در منطق فازی برای ساخت باند انتقال مورد استفاده قرار گرفت [۹، ۲۱، ۲۲]. نویسندگان [۲۲] پیشنهاد کرده‌اند که بهره لغزش را با استفاده از یک سیستم فازی تغییر دهند که فاصله بین سیستم و سطح لغزش را تنظیم می‌کند. بنابراین، با نزدیک شدن وضعیت سیستم به سطح لغزشی، مقدار آن کاهش می‌یابد. با این حال، دقت نهایی و مقاومت حالت لغزشی تا حدی از دست می‌رود. در این مقاله، یک ترمینال Backstepping کنترل کننده حالت لغزش (BTSMC) برای MPPT توسعه داده شده است. با استفاده از مبدل تقویت DC / DC در مدار کنترل توان، BTSMC برای هدایت سیستم به سمت مرجع MPV در حلقه دوم پیشنهاد شده است. با استفاده از این روش، هم‌گرایی زمان محدود خطا تضمین می‌شود و اثر لرزش بدون از دست دادن استحکام حذف می‌شود.

مدل سازی سیستم PV

یک مبدل تقویت DC - DC که قلب MPPT را تشکیل می‌دهد بین ماژول PV و بار آن برای دستیابی به انتقال توان بهینه قرار داده می‌شود، همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود.



شکل ۱: ساختار سیستم PV

مبدل برای تنظیم ولتاژ خروجی V_{PV} ماژول PV به منظور استخراج بیش‌ترین توان ممکن از ماژول PV استفاده می‌شود. با اشاره به [۱۵]، دینامیک مبدل بوسه به صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{cases} \frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_1} (I_{pv} - I_L) \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} V_{pv} - \frac{R_C(1-d)}{L(1+\frac{R_C}{R})} I_L \\ + \frac{(1-d)}{L} \left(\frac{R_C}{R_C+R} - 1 \right) V_{C_2} - \frac{V_D(1-d)}{L} \\ \frac{dV_{C_2}}{dt} = \frac{(1-d)}{C_2(1+\frac{R_C}{R})} I_L - \frac{1}{C_2(R_C+R)} V_{C_2} \end{cases} \quad (1)$$

که در آن سه حالت متغیرهای V_{PV} ، I_L و V_{C_2} به ترتیب ولتاژ خروجی ماژول PV، جریان سلف و ولتاژ خازن C_2 (یعنی ولتاژ در سراسر بار) هستند. V_D ولتاژ رو به جلو دیود توان، d نسبت کار سیگنال ورودی کنترل PWM و R بار مقاومتی است. با



تحلیل ثبات و پایداری

مسائل پایداری و استحکام کنترل کننده در اینجا با استفاده از نظریه پایداری لیاپانوف به صورت زیر مورد بررسی قرار گرفته است: تابع لیاپانوف تقویت شده به صورت زیر است:

$$V_2 = \frac{1}{2} s^2 \quad (11)$$

پس از آن مشتق زمانی $V_2(S)$ به صورت زیر است:

$$\dot{V}_2 = s \dot{s} = s \left[\dot{e}_2 + \gamma \frac{p}{q} e_2^{\left(\frac{p-1}{q}\right)} \dot{e}_2 \right] \quad (12)$$

$$\dot{V}_2 = s \gamma \frac{p}{q} e_2^{\left(\frac{p-1}{q}\right)} \left[\dot{e}_2 + \frac{1}{\gamma} \frac{q}{p} e_2^{\left(2-\frac{p}{q}\right)} \right] \quad (13)$$

با:

$$\dot{e}_2 = \ddot{e}_1 + \dot{\alpha}_1 = \ddot{V}_{pv} - \ddot{V}_{ref} + \dot{\alpha}_1 \quad (14)$$

$$\dot{V}_2 = s \left[\dot{e}_2 + \gamma \frac{p}{q} e_2^{\left(\frac{p-1}{q}\right)} \dot{e}_2 \right] = \quad (15)$$

$$s \gamma \frac{p}{q} e_2^{\left(\frac{p-1}{q}\right)} \left[\dot{e}_2 + \frac{1}{\gamma} \frac{q}{p} e_2^{\left(2-\frac{p}{q}\right)} \right]$$

برای برآورده کردن شرایط پایداری لیاپانوف، کنترل سیگنال ورودی به صورت زیر طراحی شده است:

$$d(t) = \frac{1}{g_1(x)} [d_1(t) + d_2(t)], g_1(x) \neq 0 \quad (16)$$

که در آن:

$$d_1(t) = -f_1(x) + \dot{I}_{pv} - C_1 \dot{V}_{ref} + C_1 \dot{\alpha}_1 \quad (17)$$

و

$$d_2(t) = C_1 \left[\int_0^t \left[\frac{1}{\gamma} \frac{q}{p} e_2^{\left(2-\frac{p}{q}\right)} + \eta \text{sign}(s) \right] dt \right] \quad (18)$$

بنابراین معادله ۱۳ را می توان توسعه داد تا معادله زیر را به دست آورد:

$$\dot{V}_2 = -\gamma \frac{p}{q} e_2^{\left(\frac{p-1}{q}\right)} \cdot \eta |s| \quad (19)$$

اگر $s \neq 0$ باشد، به طوری که p و q فرد و $1 < p/q < 2$

باشد، پس $e_2^{p/q-1} \geq 0$ است، که به معنی $\dot{V}_2 \leq 0$ است. اگر s

$\neq 0$ باشد، دو شرط زیر را در نظر می گیریم:

• اگر $z_n \neq 0$ باشد، پس $\dot{V}_2 =$

$$-\gamma \frac{p}{q} e_2^{\left(\frac{p-1}{q}\right)} \cdot \eta |s| < 0$$

• اگر $z_n = 0, z_n \neq 0$ باشد آنگاه $\dot{V}_2 = 0$ نمی تواند به

طور مداوم نگه داشته شود.

بنابراین، براساس نظریه پایداری لیاپانوف، سیستم می تواند در زمان

محدود به منیقولد برسد، برای e_2 ، در زمان محدود به صفر همگرا می شود.

نتایج شبیه سازی

مدل Simulink سیستم PV نشان داده شده در شکل ۲ برای ارزیابی عملکرد و اثربخشی کنترل کننده BTSMC پیشنهادی انتخاب شده است. حل کننده نوع گام ثابت و ode4 (رانج کوتتا) پارامترهای

$$e_1 = x_1 - V_{ref} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن یک متغیر خطای ردیابی کمکی:

$$e_2 = \dot{e}_1 + \alpha_1 \quad (5)$$

اولین انتخاب تابع لیاپانوف به صورت زیر باشد:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (6)$$

زمان مشتق (۶) به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 \\ &= e_1 (e_2 - \alpha_1) = e_1 e_2 \\ &= -\lambda_1 e_1^2 + e_1 e_2 \end{aligned} \quad (7)$$

پایدارسازی e_1 را می توان با معرفی یک کنترل مجازی جدید α_1 به دست آورد، به طوری که:

$$\alpha_1 = \lambda_1 e_1, \quad \lambda_1 > 0 \quad (8)$$

که در آن λ_1 یک بهره بازخورد مثبت است، به طوری که α_1 می تواند به منظور حذف غیرخطی بودن و گرفتن $\dot{V}_1(X) < 0$ باشد.

معادله (۷) نشان می دهد که، اگر قانون کنترل طراحی شده e_2 را همگرا کند، آنگاه $\dot{V}_1(X) < 0$ است که پایداری جهانی را تضمین می کند.

به منظور همگرایی e_2 در زمان محدود و بهبود نرخ همگرایی و دقت ردیابی حالت پایدار سیستم، سطح لغزشی پایانه غیر تکین مرتبه بالا به صورت زیر برای e_2 طراحی شده است:

$$s = e_2 + \gamma e_2^{\frac{p}{q}}, \quad 1 < p/q < 2, \quad \gamma > 0 \quad (9)$$

که در آن $\gamma > 0$ یک ثابت مثبت است که باعث می شود خطای e_2 به سمت صفر میل کند در حالی که p و q ثوابت اختلال مثبت هستند

به طوری که $1 < p/q < 2$ است. این آخرین نابرابری باید اعمال شود تا از تکینگی ذاتی در این نوع کنترل ها جلوگیری شود. سطح

انتخاب شده در (۹) حالت غیر تکین لغزش (NTSM) نامیده می شود. از این روش برای تحقق یک SMC مرتبه دوم استفاده می شود که

می تواند داشته باشد که اغلب حالت لغزشی مرتبه بالاتر نامیده می شود. اگر سیستم روی به صفر همگرا شود، که به معنی است، پس

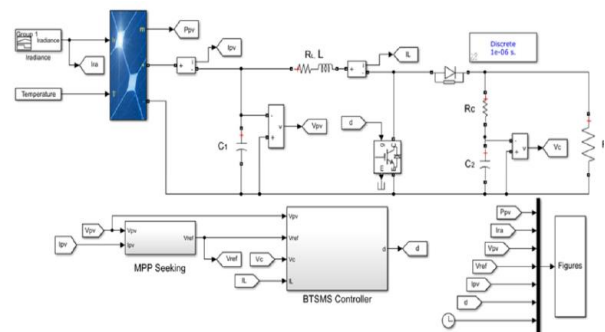
از (۹)، می توان نشان داد که e_2 و e_2 در زمان محدود به صفر همگرا خواهند شد، با توجه به:

$$t_s = t_r + \gamma^{p/q} \frac{p}{(p-q)} |e_2(t_r)|^{\frac{p-q}{p}} \quad (10)$$

سیستم در حالت لغزشی مرتبه دوم ($e_2 = \dot{e}_2 = 0$) باقی خواهد

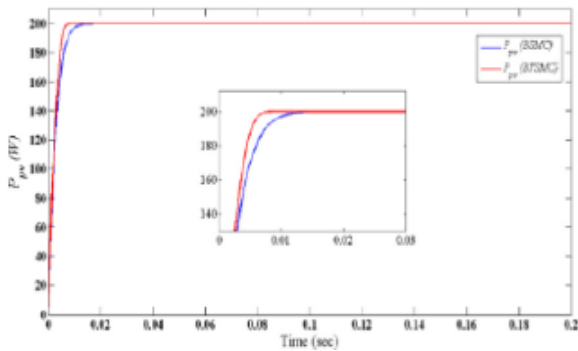
ماند، با توجه به (۱۰)، و با انتخاب پارامترهای p, q و γ می توان

سرعت همگرایی را تنظیم کرد.

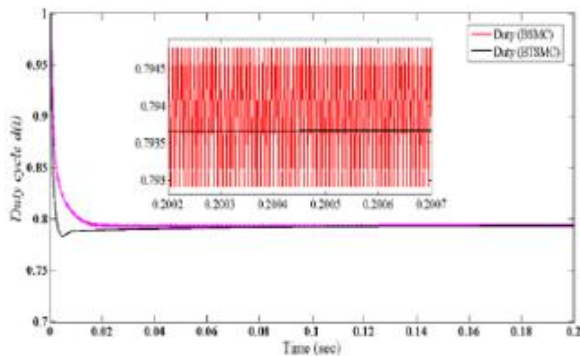


$$= e_1 (e_2 - \alpha_1)$$

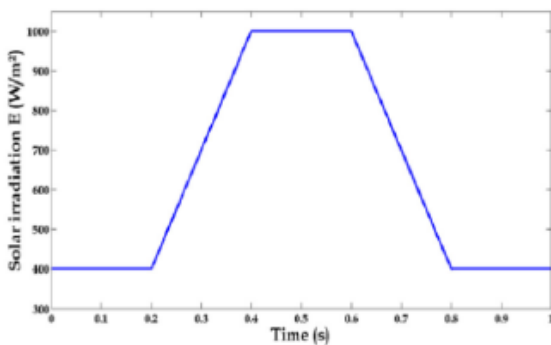
شکل ۲: مدل Simulink سیستم PV



شکل ۵. تکامل Ppv


 شکل ۶. تکامل چرخه کار $d(t)$

Ppv حداکثر توان را در زمان نشست 0.008 ثانیه به دست می‌آورد. علاوه بر این، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی پاسخ گذرای خوب، خطای ردیابی پایین، و یک واکنش سیستم بسیار سریع در برابر تغییر نقطه تنظیم را ارائه می‌دهد. شکل ۵ - ۶ یک مطالعه مقایسه‌ای بین کنترل کننده پیشنهادی و BSMC را نشان می‌دهد. هنگام مقایسه این نتایج، واضح است که روش پیشنهادی پاسخ‌های سریع‌تری را در عین حذف پدیده لرزش ارائه می‌دهد.



شکل ۷: تغییرات تابش خورشیدی.

نتایج شبیه‌سازی تحت باران تابشی خورشیدی

مشخص شده‌است که پارامترهای هواشناسی، به ویژه دما، در تمام طول روز ثابت نمی‌مانند اما به طور قابل توجهی تغییر می‌کنند. بنابراین بررسی تاثیر تغییرات دمای متوسط روزانه بر عملکرد سیستم بهینه شده ارزشمند است. به منظور ارزیابی اثر تغییر شرایط تابش، تغییر شیب تابش همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده‌است، مورد استفاده قرار گرفت. دما با مقدار 25 درجه سانتی‌گراد در طول آزمایشات شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته می‌شود. عملکردهای V_{pv} ، I_{pv} و P_{pv} و چرخه کاری در شکل‌های ۸ - ۱۱ ارائه شده‌اند.

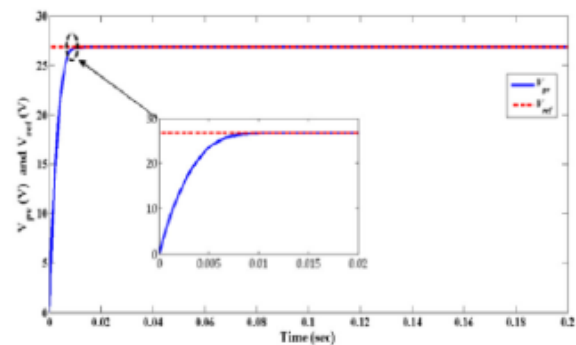
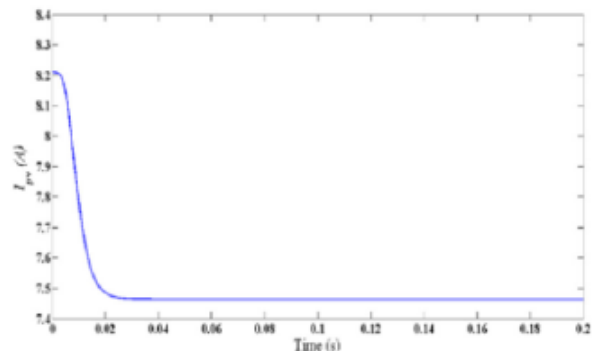
انتخاب حل کننده Simulink بودند. پارامترهای مشخصات برای تولید توان PV در جدول ۱ داده شده‌است. پارامترهای مبدل تقویت کننده مورد استفاده عبارتند از: $L=12$ میلی هانری، $Rz=0.159$ ، $C=1000$ میکروفاراد، $R=39.622$ ، $Vo=0.82$ و $y=0.5$ ، $n=0.01$ ، $p=y$ ، $q=0.5$. در بخش، ما نتایج شبیه‌سازی را در هنگام استفاده از ترمینال Backstepping قانون کنترل حالت لغزش ارائه می‌دهیم.

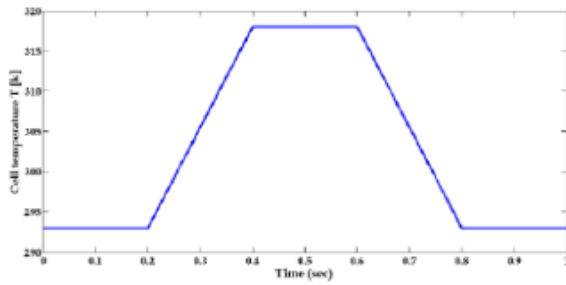
جدول ۱: مشخصات الکتریکی مدل PV-KC200GH-2P

| مقدار | پارامتر |
|-----------|-------------------------------------|
| ۲۰۰ وات | حداکثر توان P_{mpp} |
| ۸,۲۱ آمپر | جریان اتصال کوتاه I_{SCR} |
| ۳۲,۹ ولت | ولتاژ مدار باز V_{oc} |
| ۲۶,۳ ولت | ولتاژ در نقطه حداکثر توان V_{mpp} |
| ۷,۶۱ آمپر | جریان در نقطه حداکثر توان I_{mpp} |
| ۱,۸ | ضریب مشخصه اتصال پالس - P N |

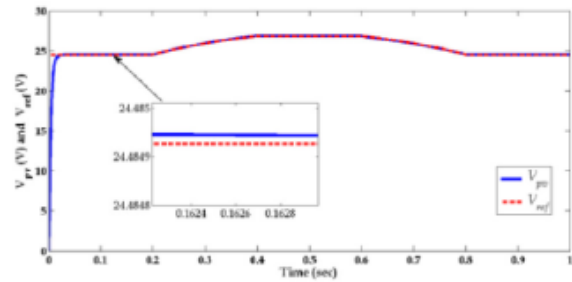
نتایج شبیه‌سازی با شرایط عملیاتی استاندارد

نتایج شبیه‌سازی با شرایط عملیاتی استاندارد ($S=1000$ وات بر متر مربع، $T=25$ درجه سانتی‌گراد) در شکل‌های ۳-۶ نشان داده شده‌است. با توجه به نتایج بدست آمده، واضح است که V_{pv} به سرعت به نقطه مجموعه مورد نظر V_{ref} می‌رسد.

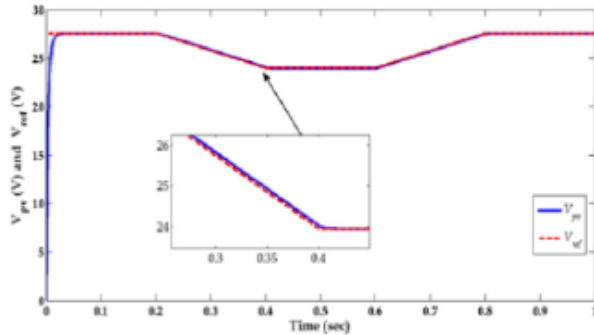

 شکل ۳: تکامل V_{pv} و V_{ref} .

 شکل ۴: تکامل I_{pv}



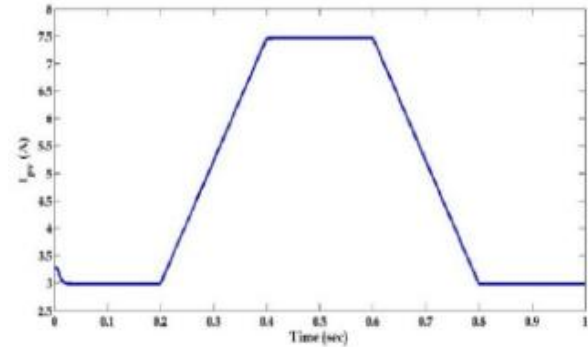
شکل ۱۲: تغییرات دما.



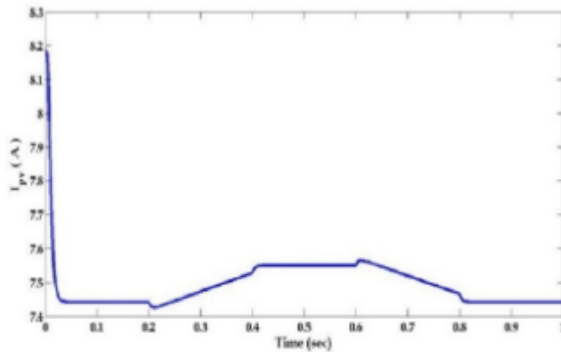
شکل ۸: تکامل Vref و Vpv.



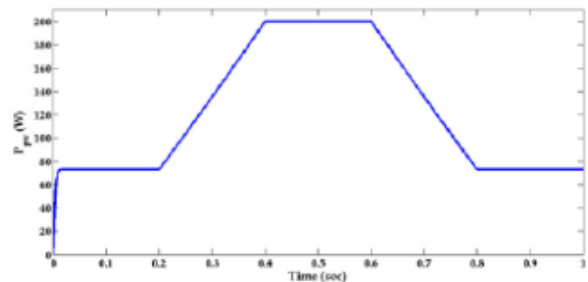
شکل ۱۳: تکامل Vpv و Vref.



شکل ۹: تکامل Ipv.

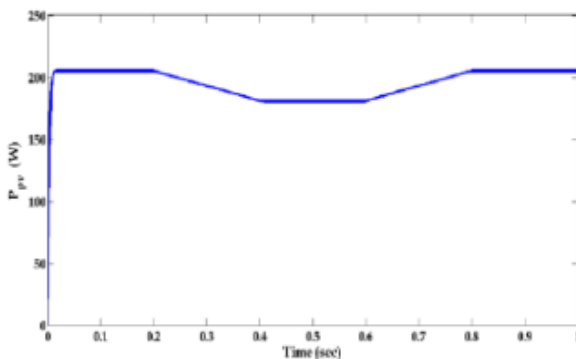


شکل ۱۴: تکامل Ipv.

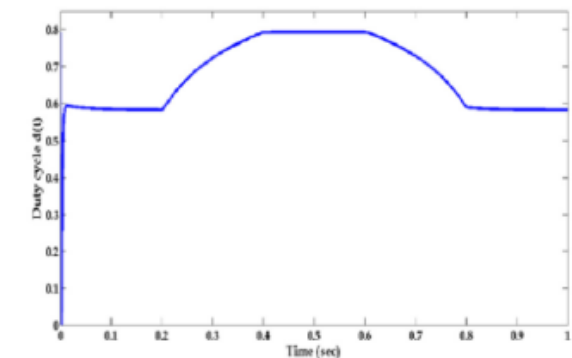


شکل ۱۰: تکامل Ppv.

در شکل‌های ۱۳ - ۱۶ مشاهده می‌شود که وقتی دما تغییر می‌کند، کنترل‌کننده MPPT می‌تواند به سرعت MPP را ردیابی کند. کنترل‌کننده MPPT پیشنهادی عملکرد خوبی را در تمامی آزمایشات شبیه‌سازی فراهم می‌کند. شکل ۱۷ نشان می‌دهد که اثر نقطه کار در طول شبیه‌سازی نزدیک MPP ها باقی می‌ماند.



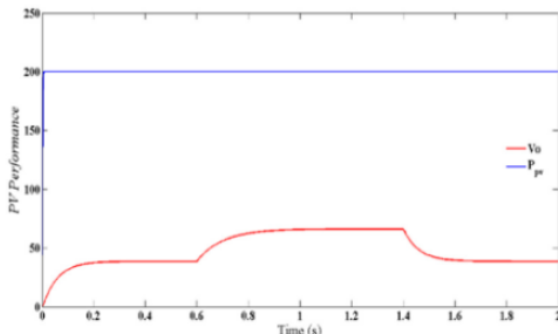
شکل ۱۵: تکامل Ppv.

شکل ۱۱: تکامل چرخه کار. $d(t)$.

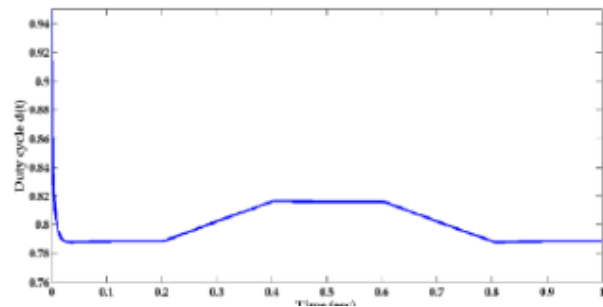
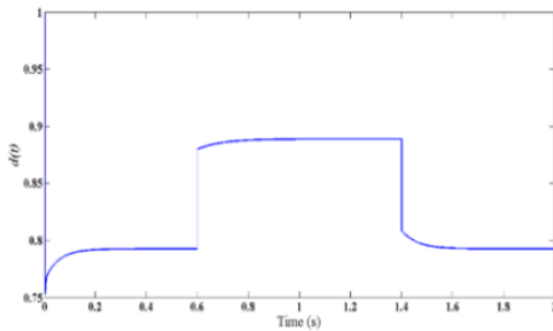
همانطور که در شکل ۸ - ۱۱ نشان داده شده‌است، زمانی که سطح تابش تغییر می‌کند، کنترل‌کننده MPPT می‌تواند به سرعت MPP را ردیابی کند. می‌توان از نتایج مشاهده کرد که کنترل‌کننده MPPT پیشنهادی، جهت MPP را به طور کامل دنبال می‌کند.

نتایج شبیه‌سازی تحت تغییرات دما

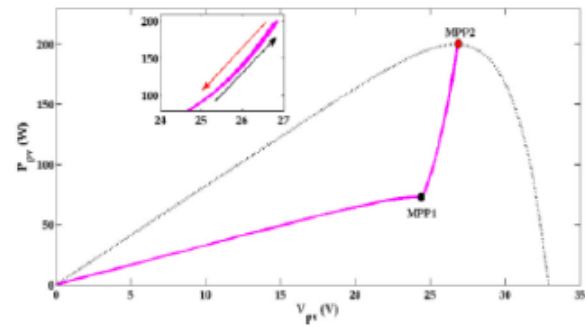
شبیه‌سازی‌ها برای ارزیابی اثر تغییر دما انجام شد (شکل ۱۲). تابش خورشیدی با مقدار ۱۰۰۰ وات بر متر مربع ثابت در نظر گرفته می‌شود. در شکل‌های ۱۳ - ۱۶ عملکردهای V_{pv} , P_{pv} , I_{pv} و چرخه کاری آورده شده‌اند.



شکل ۱۹: کارایی PV

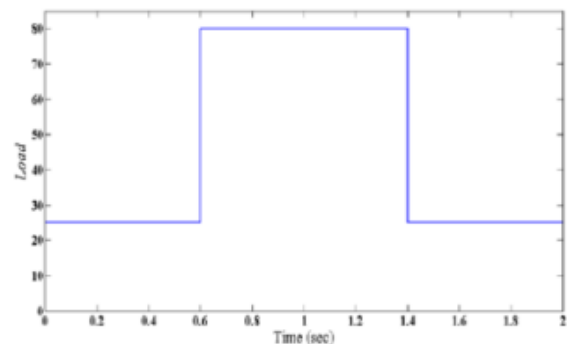

 شکل ۱۶: تکامل چرخه کار $d(t)$


شکل ۲۰: تکامل چرخه وظیفه


 شکل ۱۷: ویژگی‌های V_{PV} - P_{PV} تحت تغییر تابش خورشیدی.

نتایج شبیه‌سازی تحت تغییرات بار

با در نظر گرفتن تغییر بار از ۲۵ اهم به ۸۰ اهم تحت تابش و دمای یکسان، نتایج مربوطه در شکل ۱۸ - ۲۰ نشان داده شده‌اند. به راحتی می‌توان نتیجه گرفت که کنترل کننده پیشنهادی به استحکام بالایی دست یافته و پاسخ رضایت‌بخشی تحت این نوع اختلال دارد. در تمامی نتایج شبیه‌سازی، پیشنهادی عملکرد خوبی دارد. کنترل کننده MPPT پیشنهادی جهت MPP را به طور کامل و در زمان محدود دنبال می‌کند. علاوه بر این، حذف مشکل لرزش، یکنواختی قانون کنترل را ممکن می‌سازد.



شکل ۱۸: تغییر شارژ

نتیجه گیری

در این مطالعه، یک طرح کنترل حالت لغزشی backstepping برای MPPT یک سیستم PV توسعه داده شده‌است، که روش backstepping و راهبرد کنترل حالت لغزشی ترمینال را ادغام می‌کند. ثابت شد که راهبردهای ترکیبی مزایای هم حالت لغزشی ترمینال و هم رویکرد backstepping را دارند. پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی با استفاده از قوانین تطبیق، براساس ترکیب لیاپونوف تنظیم می‌شوند تا در حضور اغتشاشات خارجی، پایداری سیستم حلقه بسته و عملکرد ردیابی به صورت محدود به دست آید. هدف از این مطالعه انجام شد. خطای ردیابی کم، واکنش سیستم بسیار سریع در برابر تغییر تابش خورشیدی، و پاسخ انتقال خوب بدون افزایش زیاد به دست آمد. علاوه بر این، نشان داده شده‌است که پدیده لرزش که در کنترل حالت لغزشی backstepping کلاسیک ظاهر می‌شود، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، الگوریتم پیشنهادی زمان صعود کوتاه‌تری را نسبت به کنترل حالت لغزشی backstepping فراهم می‌کند. کارهای آینده شامل اجرای الگوریتم بر روی سیستم PV با استفاده از dSPACE1104 شامل مطالعه تأثیر اختلاف جزئی است.

مراجع

- [1] M. Y. Allani, D. Mezghani, F. Tadeo, and A. Mami, "FPGA Implementation of a Robust MPPT of a Photovoltaic System Using a Fuzzy Logic Controller Based on Incremental and Conductance

↑ تا حد امکان دو ستون موجود در صفحه آخر را تراز کنید. ↑



10.48084/etasr.2687.

- [9] Y. Zhang, Q. Zhang, J. Zhang, and Y. Wang, "Sliding Mode Control for Fuzzy Singular Systems With Time Delay Based on Vector Integral Sliding Mode Surface," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 768–782, Apr. 2020, <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2019.2916049>.
- [10] A. Bag, B. Subudhi, and P. K. Ray, "A combined reinforcement learning and sliding mode control scheme for grid integration of a PV system," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 498–506, Dec. 2019, <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2017.01000>.
- [11] Z. Meng, W. Shao, J. Tang, and H. Zhou, "Sliding-mode control based on index control law for MPPT in photovoltaic systems," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 303–311, Sep. 2018, <https://doi.org/10.30941/CESTEMS.2018.00038>.
- [12] I.-S. Kim, "Robust maximum power point tracker using sliding mode controller for the three-phase grid-connected photovoltaic system," *Solar Energy*, vol. 81, no. 3, pp. 405–414, Mar. 2007, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.04.005>.
- [13] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 46–54, Jan. 2001, <https://doi.org/10.1109/63.903988>.
- [14] M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato, "Neural-network-based maximum-power-point tracking of coupled-inductor interleaved-boostconverter-supplied PV system using fuzzy controller," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 4, pp. 749–758, Aug. 2003, <https://doi.org/10.1109/TIE.2003.814762>.
- [15] C.-S. Chiu, Y.-L. Ouyang, and C.-Y. Ku, "Terminal sliding mode control for maximum power point tracking of photovoltaic power generation systems," *Solar Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 2986–2995, Oct. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.008>.
- [16] K. Dahech, M. Allouche, T. Damak, and F. Tadeo, "Backstepping sliding mode control for maximum power point tracking of a

- Algorithm," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 9, no. 4, pp. 4322–4328, Aug. 2019, <https://doi.org/10.48084/etasr.2771>.
- [2] A. Elgharbi, D. Mezghani, and A. Mami, "Intelligent Control of a Photovoltaic Pumping System," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 9, no. 5, pp. 4689–4694, Oct. 2019, <https://doi.org/10.48084/etasr.2982>.
- [3] M. Aly and H. Rezk, "A Differential Evolution-Based Optimized Fuzzy Logic MPPT Method for Enhancing the Maximum Power Extraction of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 172219–172232, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025222>.
- [4] J. E. Hernández-Díez, C. F. Méndez-Barrios, S. I. Niculescu, and E. Bárcenas-Bárcenas, "A current sensorless delay-based control scheme for MPPT-boost converters in photovoltaic systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 174449–174462, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024566>.
- [5] J. Wang, C. Wang, S. jia, S. Xiang, and X. Shan, "Photovoltaic power MPPT controller based on fuzzy-backstepping method," in *2019 8th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE)*, Zhengzhou, China, Oct. 2019, pp. 1–3, <https://doi.org/10.1109/ISNE.2019.8896680>.
- [6] O. Abdel-Rahim and H. Wang, "A new high gain DC-DC converter with model-predictive-control based MPPT technique for photovoltaic systems," *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 5, no. 2, pp. 191–200, Jun. 2020, <https://doi.org/10.24295/CPSSSTPEA.2020.00016>.
- [7] K. Y. Yap, C. R. Sarimuthu, and J. M.-Y. Lim, "Artificial Intelligence Based MPPT Techniques for Solar Power System: A review," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 6, pp. 1043–1059, Nov. 2020, <https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000159>.
- [8] Z. R. Labidi, H. Schulte, and A. Mami, "A Systematic Controller Design for a Photovoltaic Generator with Boost Converter Using Integral State Feedback Control," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 9, no. 2, pp. 4030–4036, Apr. 2019, <https://doi.org/>



- photovoltaic system," *Electric Power Systems Research*, vol. 143, pp. 182–188, Feb. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.043>.
- [17] N. Zerroug, M. N. Harmas, S. Benagoune, Z. Bouchama, and K. Zehar, "DSP-based implementation of fast terminal synergetic control for a DC–DC Buck converter," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 355, no. 5, pp. 2329–2343, Mar. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2018.01.004>.
- [18] R. Ma, H. Zhang, M. Yuan, B. Liang, Y. Li, and Y. Huangfu, "Chattering Suppression Fast Terminal Sliding Mode Control for Aircraft EMA Braking System," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3054510>.
- [19] K. Behih, K. Benmahammed, Z. Bouchama, and M. N. Harmas, "Real-Time Investigation of an Adaptive Fuzzy Synergetic Controller for a DC-DC Buck Converter," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 9, no. 6, pp. 4984–4989, Dec. 2019, <https://doi.org/10.48084/etasr.3172>.
- [20] Z. B. Duranay, H. Guldemir, and S. Tuncer, "Fuzzy Sliding Mode Control of DC-DC Boost Converter," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 8, no. 3, pp. 3054–3059, Jun. 2018, <https://doi.org/10.48084/etasr.2116>.
- [21] S. Latreche and S. Benagoune, "Robust Wheel Slip for Vehicle Antilock Braking System with Fuzzy Sliding Mode Controller (FSMC)," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 10, no. 5, pp. 6368–6373, Oct. 2020, <https://doi.org/10.48084/etasr.3830>.
- [22] T. L. Nguyen, T. H. Vo, and N. D. Le, "Backstepping Control for Induction Motors with Input and Output Constrains," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 10, no. 4, pp. 5998–6003, Aug. 2020, <https://doi.org/10.48084/etasr.3680>.
- [23] B. K. Oubbati, M. Boutoubat, A. Rabhi, and M. Belkheiri, "Experiential Integral Backstepping Sliding Mode Controller to achieve the Maximum Power Point of a PV system," *Control Engineering Practice*, vol. 102, Sep. 2020, Art. no. 104570, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104570>.

ACEC2021-79782

مدل سازی آلودگی صوتی توربین های بادی محور قائم نوع H با استفاده از معادلات فاکس ویلیامز-هاو کینگز

علیرضا بزرگی^{۱*}، محمدجواد زارعی^۲، فاطمه روستائی^۳

^۱استادیار، دانشگاه صنعتی اراک bozorgi@arakut.ac.ir

^۲کارشناسی، دانشگاه صنعتی اراک mjzare92@gmail.com

^۳دانشجوی کارشناسی، دانشگاه صنعتی اراک fatemeroostaie@gmail.com

چکیده

استفاده از توربین های بادی تاثیرات منفی بر محیط زیست دارد که در استفاده از آنها محدودیت هایی به وجود آورده است. مهم ترین آلودگی محیط زیستی این توربین ها آلودگی صوتی یا همان نویز حاصل از توربین های بادی می باشد. این نویز بنا بر منبع تولید به دو دسته مکانیکی و آیرودینامیکی تقسیم می شود.

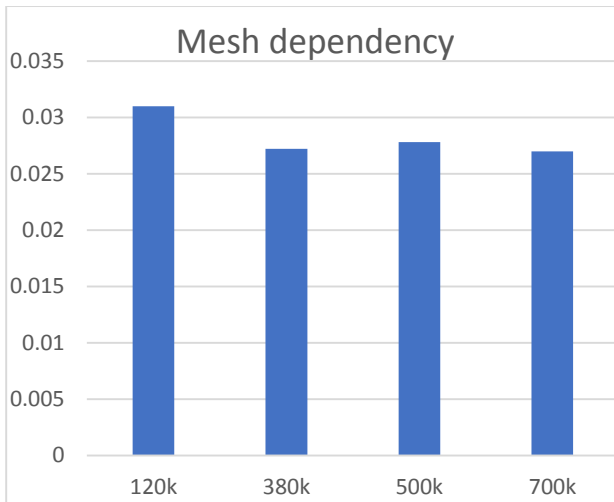
یکی از اصلی ترین عوامل تاثیرپذیری افراد از نویز این توربین ها فاصله از منبع صوت است. تحقیقات انجام شده نشان می دهد نویز ناشی از توربین های بادی می تواند موجب آزدگی روانی گردد [۲،۱]. به طور مثال، اریکسون و استانسفلد [۴،۳] اعلام کردند که توربین های بادی یکی از عوامل ایجاد پریشانی و اضطراب در ساکنان اطراف مزارع بادی می باشد. قرارگیری در معرض این نویز در طولانی مدت می تواند موجب اختلالات روانی و فیزیولوژیکی مانند استرس و فشارخون گردد [۶،۵]. همچنین برای افرادی که در نزدیکی توربین های بادی فعالیت می کنند مواجهه با صدای بالای ۸۵ دسیبل می تواند موجب انقباض عروق، تغییر در ضربان قلب، ترشح آدرنالین و در نتیجه افزایش فشار خون و استرس گردد [۹،۸،۷]. در مطالعه ای که توسط عباسی و همکاران [۱۰] بر روی تاثیرات نویز توربین های بادی بر روی کارمندان یک مزرعه بادی صورت گرفت مشخص گردید که تاثیرات منفی نویز توربین ها بر روی افراد با سن بالاتر بیشتر بوده و همچنین تعمیرکارانی که در نزدیکی توربین ها فعالیت داشتند تحت تاثیرات منفی بیشتری قرار گرفتند. لازم به ذکر است که نویز منتشر شده از توربین ها به دلیل ماهیت نوسانی توان و فرکانس که به دنبال تغییرات مداوم جریان باد رخ می دهد، باعث آزدگی بیشتری می گردد. در تحقیقاتی که توسط فخرالدین و همکاران [۱۱] صورت گرفت مشخص گردید مواجهه مزمن با صدا در محیط های کار موجب تغییرات روان شناختی و فیزیولوژیکی مانند تغییر در سطح پرخاشگری و فشار خون می گردد. با توجه به توضیحات ذکر شده و استفاده روزافزون از توربین های بادی می توان گفت تحلیل و بهینه سازی نویز این توربین ها اهمیت بسیاری دارد. در این مقاله نویز

انرژی بادی سهم قابل توجهی از سبد انرژی پاک را در سطح جهانی به خود اختصاص داده است. برای بهره برداری از انرژی بادی از توربین های بادی استفاده می شود اما آلودگی صوتی یا همان نویز این توربین ها به عنوان اثری مخرب برای محیط زیست شناخته می شود. بنا بر تحقیقات انجام شده، نویز توربین های بادی می تواند موجب بروز بیماری هایی همچون سردرد، سرگیجه و وزوو گوش در افرادی باشد که در نزدیکی این توربین ها زندگی می کنند. به همین دلیل، تحلیل نویز توربین های بادی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این مقاله نویز یک توربین بادی محور قائم نوع H شبیه سازی شده است. بدین منظور، جریان دوبعدی اطراف توربین با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه سازی گردید و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. برای بررسی نویز توربین از معادلات فاکس ویلیامز-هاو کینگز استفاده گردید و نویز دریافت شده توسط ناظران متعدد در فواصل ۵ متر و ۱۰ متر برای زوایای مختلف اطراف توربین بررسی گردید. نتایج نشان می دهد که موقعیت قرارگیری ناظر تاثیر بسزایی در دریافت نویز دارد.

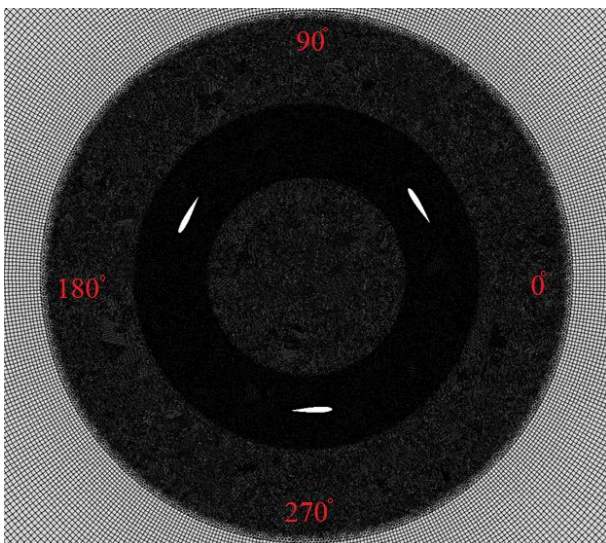
واژه های کلیدی: انرژی پاک، آلودگی صوتی، توربین بادی محور قائم، نویز.

مقدمه

در سال های اخیر استفاده از انرژی های پاک و تجدید پذیر همچون انرژی بادی از اهمیت زیادی برخوردار شده است. انرژی بادی در بسیاری از نقاط در دسترس می باشد و با بهره برداری از آن می توان مصرف سوخت های فسیلی که عامل تولید گازهای گلخانه ای هستند را کاهش داد. برای استفاده از این انرژی، توربین های بادی متنوع متناسب با پتانسیل های بادی مختلف موجود می باشد که بهره برداری از انرژی بادی در بسیاری از نقاط را امکان پذیر ساخته است. البته



شکل ۲. نمودار بررسی استقلال نتایج از تعداد سلول مش



شکل ۳. شبکه‌بندی اطراف روتور

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

| پارامتر | مقادیر |
|-------------|---------------------------|
| سرعت باد | ۱۰ متر بر ثانیه |
| تعداد مش | ۵۲۰۰۰ |
| نوع ایرفویل | NACA 0015 |
| شعاع روتور | ۱/۲۵ متر |
| تعداد پره | 3 |
| وتر ایرفویل | ۴۰۰ میلی‌متر |
| چگالی هوا | ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب |

دو پارامتر مهم که برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شده است، مقادیر نسبت سرعت λ و ضریب بی‌بعد توان C_p می‌باشد.

$$\lambda = \frac{R\omega}{U} \quad (1)$$

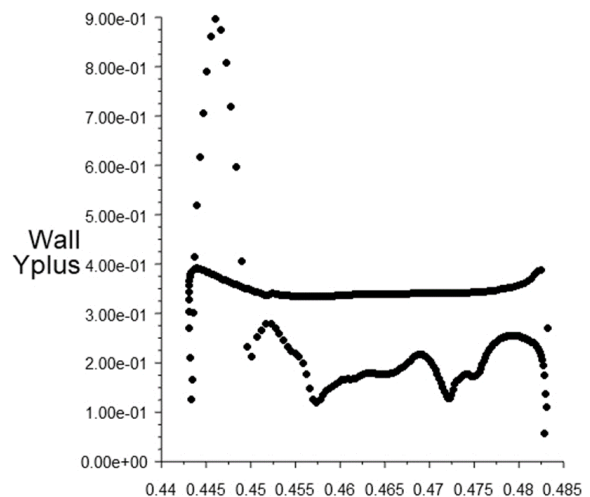
$$C_p = \frac{P}{0.5 \times \rho \times U^3 \times A} \quad (2)$$

منتشر شده از یک توربین بادی محور قائم نوع H با استفاده از معادلات فاکس ویلیامز-هاوکینگز شبیه‌سازی شده است. توربین‌های محور قائم در مناطق مسکونی کاربرد بیشتری دارند و به همین دلیل تحلیل نویز این توربین‌ها بسیار مهم می‌باشد.

تحلیل آیرودینامیکی

برای شبیه‌سازی آیرودینامیکی از نرم افزار انسیس فلوئنت استفاده شده است. جریان هوا با استفاده از مدل توربولانسی SST-KW و معادلات RANS شبیه‌سازی شده است. با توجه به مدل توربولانسی استفاده شده هنگام شبکه‌بندی دقت گردید تا مقادیر Y^+ روی پره‌ها کوچکتر از یک باشد (شکل ۱). پس از بررسی استقلال نتایج از شبکه (شکل ۲)، تعداد ۵۲۰ هزار سلول برای تحلیل جریان استفاده شد. در شکل ۳ شبکه‌بندی اطراف روتور نشان داده شده است. روتور این توربین دارای سه پره می‌باشد که پروفیل پره‌ها منطبق بر پروفیل ایرفویل NACA0015 می‌باشد. وتر ایرفویل‌ها ۴۰۰ میلی‌متر و قطر روتور ۲/۵ متر می‌باشد. در این شبیه‌سازی، هر تناوب به ۱۲۸ قسمت تقسیم شد. بنابراین مقدار چرخش برای هر گام زمانی کمتر از یک درجه بوده است.

برای ترم فشار و ترم‌های ناپایا از گزینه گسسته‌سازی مرتبه دوم و برای ترم‌های مومنتوم، اتلاف انرژی، انرژی جنبشی توربولانسی از گزینه گسسته‌سازی بالادست مرتبه دوم استفاده شده است. همچنین محاسبه گرادیان‌ها طبق روش کمترین مربعات المان‌ها صورت گرفته است. با توجه به تحقیقات انجام شده بر روی دقت روش‌های مختلف کوپلینگ معادلات فشار-سرعت توسط رزاریو و همکاران [۱۲]، برای حل این مسئله از روش PISO استفاده شد.


 شکل ۱. نمودار Y^+ روی یک پره



$$L_p = 20 \log \frac{P_{rms}}{p_{ref}} \quad (3)$$

در فرمول (۳)، p برابر فشار و rms ریشه دوم میانگین مجذور مربعات می‌باشد. مقدار P_{ref} برابر با ۲۰ میکرو پاسکال و L_p تراز فشار صوتی بر حسب دسیبل می‌باشد.

نتایج

در شکل ۴ تراز فشار صوتی در نقاط ۰ تا ۳۳۰ درجه برای شعاع‌های ۵ و ۱۰ متر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در نقاط با زاویه یکسان، افزایش فاصله باعث کاهش تراز صوتی می‌گردد. البته نمی‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله حتماً نویز کاهش می‌یابد زیرا تراز صوتی در شعاع ۱۰ متر و زاویه ۱۵۰ درجه از تراز صوتی در شعاع ۵ متر و زاویه ۳۳۰ درجه بیشتر است. البته در بقیه نقاط افزایش شعاع منجر به کاهش تراز صوتی می‌شود.

در هر دو شعاع، بیشترین نویز در زاویه ۱۵۰ درجه دریافت می‌شود. کمترین نویز برای شعاع ۵ متر در زاویه ۳۳۰ درجه و برای شعاع ۱۰ متر در زاویه صفر درجه دریافت می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در شعاع ۵ متر تغییر زاویه ناظر می‌تواند تا ۱۴ دسیبل و در شعاع ۱۰ متر تا ۶ دسیبل بر روی تراز صوتی تاثیر داشته باشد. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر شعاع در زاویه یکسان، تغییر تراز صوتی عدد ثابتی نیست.

در شکل ۵ و ۶ مقادیر فشار صوتی بر حسب زمان برای ناظرهای مختلف نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد شکل موج‌ها برای ناظرهای مختلف کاملاً متفاوت می‌باشد. با توجه به اینکه ابتدا و انتهای هر نمودار تقریباً منطبق بر یکدیگر است می‌توان گفت نتایج شبیه‌سازی همگرایی بسیار خوبی داشته است.

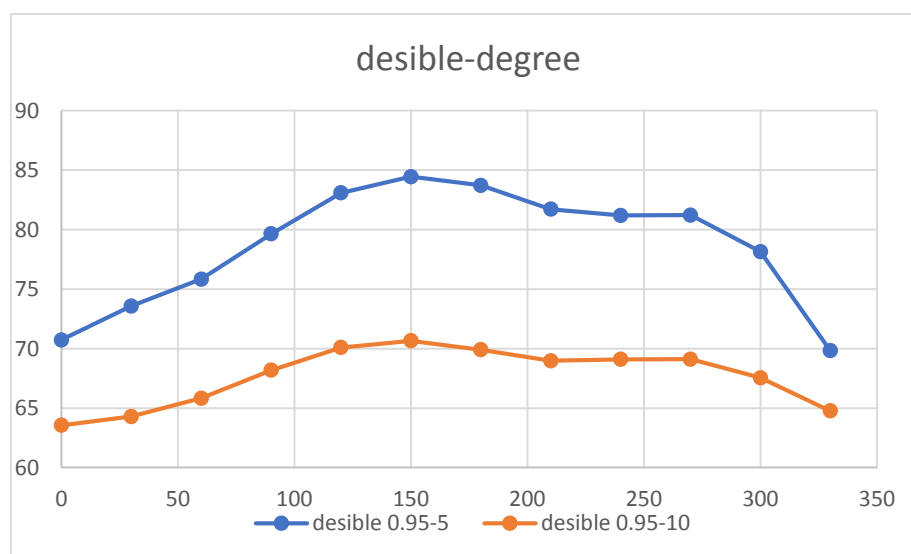
در فرمول ۱، R شعاع روتور، ω سرعت چرخش روتور و U سرعت جریان هوای ورودی می‌باشد. در فرمول ۲ مقدار P توان ورودی می‌باشد که طبق رابطه $P = TW$ اندازه گیری شده است. مقدار T میانگین گشتاور وارد بر پره‌ها می‌باشد. همچنین A سطح موثر توربین و ρ چگالی هوا است. با توجه به داده‌های جدول ۱ شبیه‌سازی در سرعت چرخش ۷/۶ رادیان بر ثانیه و سرعت هوای آزاد ۱۰ متر بر ثانیه انجام شده است و طبق فرمول ۲ مقدار نسبت سرعت در این شبیه‌سازی ۰/۹۵ بوده است. در شبیه‌سازی آیرودینامیکی به منظور اعتبارسنجی نتایج، مقدار ضریب بی‌بعد توان با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید که طبق نتایج حاصل شده خطای شبیه‌سازی ۱۰/۴ درصد بوده است (جدول ۲).

جدول ۲. بررسی نتایج شبیه‌سازی

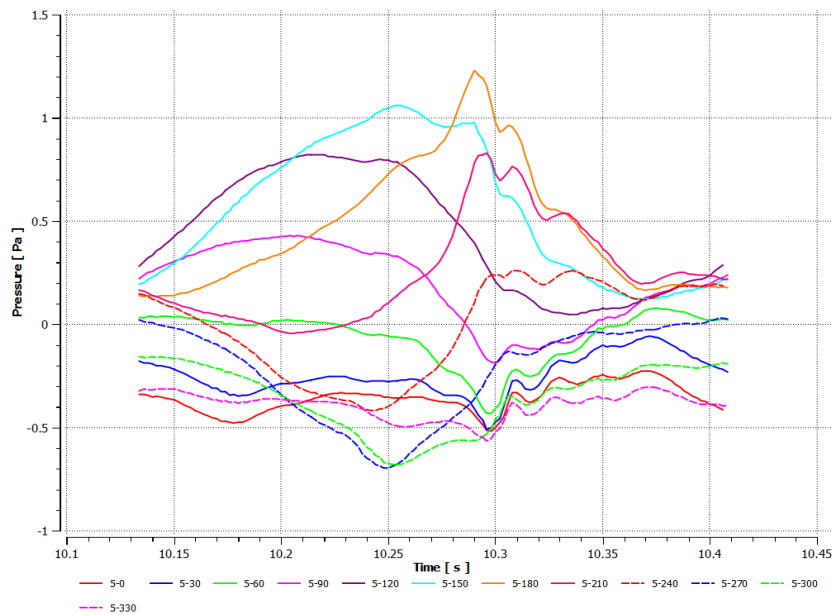
| منابع | نتایج | درصد خطا |
|-----------------|-------|----------|
| آزمایشگاهی [۱۲] | ۰/۱۲۵ | |
| شبیه‌سازی حاضر | ۰/۱۳۸ | ۱۰/۴ |

تحلیل نویز

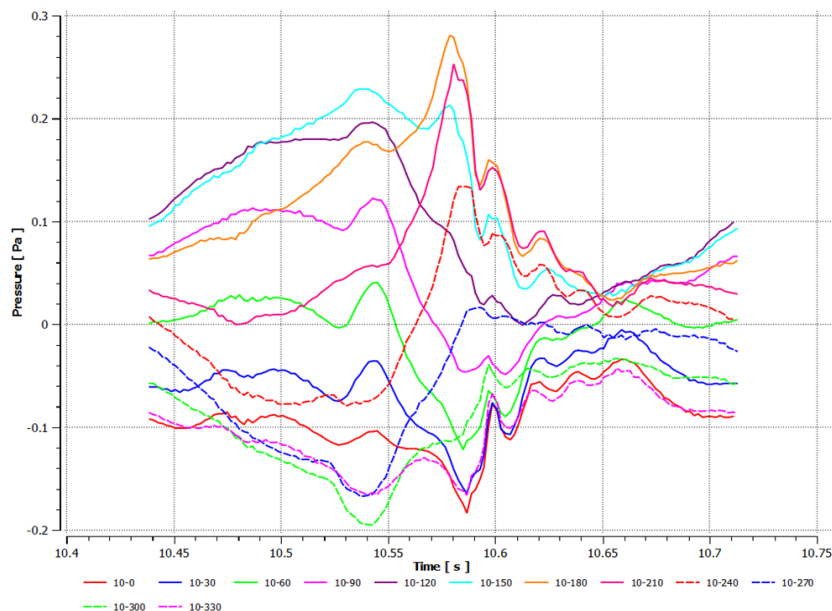
در این مسئله، نویز منتشر شده از پره‌ها با استفاده از معادلات فاکس ویلیامز-هاوکینگز انجام شده است. از این روش برای محاسبه فشار صوتی در نقاط دور دست استفاده می‌شود. پره‌های روتور به عنوان منبع تولید صوت تعریف شده و مقادیر فشار صوتی در شعاع ۵ و ۱۰ متر از مرکز روتور در زوایای مختلف محاسبه شده است. به منظور بررسی تاثیرات زاویه قرارگیری در یک شعاع یکسان از مرکز روتور، ۱۲ نقطه برای قرارگیری ناظرها تعریف شده است که این نقاط با فاصله زاویه یکسان ۳۰ درجه از یکدیگر قرار گرفته‌اند. در ادامه، نتایج برای یک تناوب استخراج گردید. سپس با استفاده از فرمول ۳ تراز صوتی در نقاط مختلف تعیین گردید.



شکل ۴. نمودار تراز صوتی بر حسب زاویه قرارگیری ناظر



شکل ۵. نمودار تغییرات فشار صوتی بر حسب زمان برای فاصله ۵ متر



شکل ۶. نمودار تغییرات فشار صوتی بر حسب زمان برای فاصله ۱۰ متر

افزایش فاصله ناظر منجر به کاهش تراز صوتی می‌شود اما نمی‌توان نتیجه گرفت که افزایش زاویه حتماً منجر به کاهش نویز می‌شود، زیرا در این مسئله تراز صوتی در شعاع ۱۰ متر و زاویه ۱۵۰ درجه از تراز صوتی در شعاع ۵ متر و زاویه ۳۳۰ درجه بیشتر است. البته در بقیه نقاط افزایش شعاع منجر به کاهش تراز صوتی می‌شود.

مراجع

- [1] Nissenbaum, Michael A., Jeffery J. Aramini, and Christopher D. Hanning., 2012, "Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health." *Noise and Health* 14, no. 60, 237.
- [2] Bowdler, Dick., 2008. "Amplitude modulation of wind turbine noise: a review of the evidence." *Institute of Acoustics Bulletin* 33, no. 4, 31-41.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله نویز منتشر شده از یک توربین بادی محور قائم مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا مسئله با استفاده از مدل توربولانسی SST KW شبیه‌سازی گردید و برای محاسبه نویز از معادلات فاکس ویلیامز-هاوکینگز استفاده شد. بدین منظور، ناظر در زوایای مختلف از مرکز روتور در فواصل ۵ و ۱۰ متر تعریف گردید و تراز صوتی فشار در محل قرارگیری ناظرها محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد محل قرارگیری ناظر تاثیر زیادی در تراز صوتی نویز دریافتی دارد. در هر دو شعاع، بیشترین نویز در زاویه ۱۵۰ درجه دریافت می‌شود. کمترین نویز برای شعاع ۵ متر در زاویه ۳۳۰ درجه و برای شعاع ۱۰ متر در زاویه صفر درجه دریافت می‌شود. در زوایای یکسان،



- [3] Erickson v. Director. "Ministry of the Environment. Environmental Review Tribunal", Case Nos: 10-121/10-122.
- [4] Stansfeld S, Clark C. "Mental health effects of noise. Noise pollution and health effects. Encycl. "Env. Health; 7011. p. 483-1.
- [5] Smith, Andrew. "A review of the non-auditory effects of noise on health." *Work & stress* 5, no. 1 49-62.
- [6] Alimohammadi, Iraj., 2018. "Relationship between smoking and hearing impairment of automotive industry workers exposed to noise." *Occupational Medicine*.
- [7] Van Kempen, Elise EMM, Hanneke Kruize, Hendriek C. Boshuizen, Caroline B. Ameling, Brigit AM Staatsen, and Augustinus EM de Hollander., 2002. "The association between noise exposure and blood pressure and ischemic heart disease: a meta-analysis." *Environmental health perspectives* 110, no. 3,307-317.
- [8] Chang, Ta-Yuan, Ruei-Man Jain, Chiu-Sen Wang, and Chang-Chuan Chan., 2003. "Effects of occupational noise exposure on blood pressure." *Journal of occupational and environmental medicine* 45, no. 12, 1289-1296.
- [9] Pourabdiyan, Syamak, Mohsen Ghotbi, Hossein Ali Yousefi, Ehsanallah Habibi, and Mohsen Zare., 2009 "The epidemiologic study on hearing standard threshold shift using audiometric data and noise level among workers of Isfahan metal industry." *Koomesh* 10, no. 4, 253-260.
- [10] Abbasi M, Monazzam Esmaielpour M R, Akbarzadeh A, Zakerian S A, Ebrahimi M H, 2015. "Investigation of the effects of wind turbine noise annoyance on the sleep disturbance among workers of Manjil wind farm", *JHSW* 5 (3), 51-62.
- [11] Ahmadi Kanrash, Fakhradin, Iraj Alimohammad, Jamileh Abolaghasemi, and Kazem Rahmani., 2019. "A study of mental and physiological effects of chronic exposure to noise in an automotive industry." *Iranian Journal of Ergonomics* 7, no. 1: 54-62.
- [12] Lanzafame, Rosario, Stefano Mauro, and Michele Messina., 2014. "2D CFD modeling of H-Darrieus wind turbines using a transition turbulence model." *Energy Procedia* 45, 131-140.



ACEC2021-82694

بررسی اثر ماده تغییرفازدهنده بر عملکرد یک خشک کن خورشیدی با کلکتور صفحه موجدار هوای گرم

محمد زاهدی یزدی^۱، مسعود ایرانمنش^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان m.zahedi@student.kgut.ac.ir
^۲ دانشیار، پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان m.iranmanesh@kgut.ac.ir

چکیده

خشک کن های خورشیدی برای خشک کردن محصولات کشاورزی جهت نگهداری طولانی مدت محصولات، وابستگی زیادی به شدت تابش خورشید در طول روز دارند، که این مسئله باعث ایجاد طولانی شدن پروسه خشک شدن و ایجاد دمای غیریکنواخت هوا در طی شبانه روز می شود، به منظور بررسی راه حل مناسب جهت خشک شدن یکنواخت و کوتاه شدن زمان پروسه خشک شدن، از مواد تغییر فازدهنده (پارافین) در ساختمان کلکتور هوای گرم خشک کن استفاده گردید، همچنین چیدمان سینی های داخل محفظه برای کمک به یکنواخت شدن فرآیند خشک شدن به صورت زیگزاگی قرار گرفت. خشک کن مورد نظر در دو حالت، با و بدون مواد تغییرفازدهنده در سرعت فن های زیاد، کم و جابجایی آزاد (همرفت طبیعی) مورد آزمایش قرار گرفت، که هر بار ۳ کیلوگرم میوه به تازه در شرایط آب و هوایی شهر ماهان کرمان در تاریخ ۲۲ - ۲۸ شهریور ۱۴۰۰ خشک گردید. نتایج نشان داد زمان خشک شدن با وجود مواد تغییرفازدهنده در سیستم در سرعت فن های زیاد، کم و جابجایی طبیعی بترتیب ۱۱، ۱۲ و ۱۵ ساعت می باشد، در صورتیکه در حالت بدون مواد تغییرفازدهنده فرآیند خشک شدن طی یک روز اتفاق نمی افتد.

واژه های کلیدی: خشک کن خورشیدی، کلکتور هوای گرم، مواد تغییرفازدهنده، پارافین

مقدمه

امروزه بشر با دو بحران اساسی روبه رو است، از یک طرف مشکل آلودگی هوا در جوامع صنعتی و شهرهای بزرگ و از طرف دیگر محدودیت مواد اولیه و سوخت مورد نیاز برای تامین انرژی. تنها راه حل، برای نجات از این دو بحران استفاده ی بهینه از انرژی پاک، ارزان و در دسترس خورشیدی به عنوان یک منبع بی پایان انرژی است. برای جلوگیری از خرابی، فساد و حفظ کیفیت میوه ها،

سبزیجات و مواد غذایی برای مدت طولانی، حفاظت از آنها ضروری می باشد. برای نگهداری مواد غذایی چند روش اصلی وجود دارد که شامل کنسرو کردن، منجمدسازی و خشک کردن است. یکی از کاربردهای مهم و گسترده ی انرژی خورشیدی، استفاده از خشک کن های خورشیدی برای خشک کردن محصولات کشاورزی جهت نگهداری طولانی مدت آن ها است. نوسانات دمایی و زمان کوتاه استفاده از انرژی خورشیدی دو نقطه ضعف مهم جهت کاربرد خشک کن های خورشیدی برای محصولات کشاورزی و مواد غذایی هستند. استفاده از سیستم های ذخیره انرژی بر مبنای مواد تغییرفازدهنده راه حل مناسبی برای رفع این مشکلات می باشد. همچنین با استفاده از مواد تغییرفازدهنده می توان مشکل اساسی این نوع خشک کن ها که دما غیریکنواخت هوا در طی شبانه روز می باشد را حل نمود. دیلیپ جین^۱ مدلسازی عملکرد سیستم خشک کن خورشیدی با استفاده از مواد تغییرفازدهنده را انجام داد. کلکتور مدل شده از نوع هوا گرمکن دوجداره و مواد تغییرفازدهنده نیز واکس پارافین در نظر گرفته شد. مواد تغییرفازدهنده در لوله هایی به طول ۷۵ سانتی متر و قطر ۵ سانتی متر در جهت موازی جریان در ورودی و در دهانه ی خروجی محفظه به کار گرفته شد. تحلیل نمودارها و منحنی های این شبیه سازی نشان می دهد که با افزایش مساحت گرمکن درجه حرارت محصول افزایش می یابد [۱]. رسولی یزدی بررسی تجربی عملکرد خشک کن خورشیدی با به کارگیری مواد تغییرفازدهنده انجام داد. او در این بررسی از کلکتور تخت هوایی و پارافین بعنوان مواد تغییرفازدهنده در لوله هایی استوانه ای بصورت افقی استفاده نمود. نتایج نشان داد وجود پارافین عملکرد سیستم را بهبود داده اما پارافین به طور کامل ذوب نمی شود و بنظر علت این امر تلفات بالای عملکرد دستگاه باشد. استفاده از پودر گرافیت عملکرد دستگاه را افزایش داده اما استفاده از آن به علت رسوب پودر پس از گذشت چند روز کارایی خود را از دست میدهد و باید از میله های

^۱ Dilip Jain

حالت بدون این مواد است. با وجود PCM بعد از غروب خورشید برای حداقل ۵ ساعت، دمای خشک‌کن را ۵/۵ تا ۷/۵ درجه سیلیسیوس بالاتر از دمای محیط قرار میدهد. مواد مورد آزمایش بعد ۱۲ الی ۱۸ ساعت به رطوبت نهایی خواهد رسید [۶]. الونگی^۶ و همکاران آنالیز تجربی و شبیه‌سازی CFD یک خشک‌کن خورشیدی مستقیم را برای ماهی انجام دادند. ابعاد بهینه برای محفظه‌ی خشک‌کن در سرعت فن‌ها ۰/۵ و ۱/۵ و ۲/۵ و ۳/۵ متر برثانه شبیه‌سازی شد. در نتایج مشاهده شد که ابعاد بهینه برای محفظه‌ی خشک‌کن در سرعت فن‌های مختلف ۴۰*۶۰*۷۰ سانتیمتر مکعب می‌باشد. بهترین محل برای موقعیت سینی، دمای بهینه و بهترین توزیع جریان هوا در داخل محفظه خشک‌کن صفحه‌ای افقی که از کف محفظه ارتفاع ۲۵ سانتیمتر دارد [۷]. ایرانمنش و همکاران بررسی تجربی اثر مواد ذخیره‌کننده تغییرفازدهنده و جریان جابجایی بر عملکرد یک نمونه خشک‌کن خورشیدی با کلکتور لوله گرمایی تحت خلاء را انجام دادند. در این پژوهش با طراحی و ساخت خشک‌کن سینی دار خورشیدی غیرمستقیم مجهز به کلکتور لوله خلاء (هیت پایپ) و با استفاده از مواد تغییرفازدهنده (PCM) برای ذخیره انرژی حرارتی، بررسی‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. اثر پارامترهای دماهای ورودی و خروجی کلکتور، محفظه‌ی خشک‌کن و محیط، رطوبت داخل محفظه‌ی خشک‌کن و رطوبت محیط، شدت تابش خورشیدی بر فرآیند خشک‌کردن برای دو حالت، با استفاده از مواد PCM و بدون استفاده از PCM و در سرعت‌های مختلف جریان جابجایی اجباری بررسی و مقایسه شده است. نتایج نشان میدهد که اثر جریان جابجایی بر سرعت بخشیدن به فرآیند خشک‌کردن بیش از اثر استفاده از مواد ذخیره‌کننده بوده است [۸]. ایرانمنش و همکاران مدل‌سازی CFD و ارزیابی عملکرد خشک‌کن خورشیدی کابینتی مجهز به کلکتور خورشیدی لوله خلاء و سیستم ذخیره‌سازی حرارتی را انجام دادند. در این مدل آنالیز گرمایی کلکتور خورشیدی بازده خشک‌کن، مدل‌سازی CFD سیستم و ارزیابی کیفیت برش‌های سبب خشک شده در نظر گرفته شد. آزمایشات در سه نرخ جریان هوا ۰/۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۹ کیلوگرم برثانه برای سیستم خشک‌کن با و بدون استفاده PCM و برای خشک‌کردن تکه‌های سبب با ضخامت 5mm انجام شد. نتایج آنالیز گرمایی نشان میدهد که استفاده از PCM انرژی گرمایی را در حدود ۱/۷۲٪ و ۵/۱۲٪ برای نرخ جریان هوا ۰/۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۹ کیلوگرم برثانه بترتیب افزایش میدهد. اما افزایش بیش از حد نرخ جریان (بیش از ۰/۰۵) انرژی گرمایی ورودی را کاهش میدهد. ماکزیمم بازده خشک‌کن خورشیدی برای سیستم با مواد PCM در نرخ جریان ۰/۲۵ بود که برابر با ۳۹/۹٪ می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی CFD سیستم ذخیره و خشک‌کن نشان میدهد رابطه خوبی بین اطلاعات شبیه‌سازی و آزمایشات وجود دارد.

گرافیتی استفاده شود که به شدت قیمت دستگاه را بالا می‌برد [۲]. ایساکمی موتو^۱ و همکاران بررسی آزمایشگاهی سیستم ذخیره‌سازی حرارت برپایه‌ی مواد تغییرفازدهنده برای گرمایش خورشیدی را انجام دادند. آنها در این بررسی از کلکتور تخت هوایی برای جمع‌آوری انرژی گرمایی استفاده نمودند و از پارافین HS-58 بعنوان مواد تغییرفازدهنده استفاده کردند و محل PCM^۲ را در مخزنی بین دو صفحه شبکه‌ای قرار دادند. نتایج نشان داد در سرعت‌های جرمی بالاتر، بازده کلکتور بالاتر است که ناشی از کاهش تلفات حرارتی ناشی از کاهش دمای متوسط کلکتور است، بعلاوه افزایش مقدار ضریب انتقال حرارت در نرخ جرمی بالاتر از گرم‌شدن هوا در طول ساعات پیک خورشید به خاطر جذب گرمای ناشی از ماده تغییرفاز در دمای ثابت جلوگیری می‌کند، این کار از خراب شدن محصول بخاطر گرمای بیش‌ازحد جلوگیری می‌کند. تامین یک نرخ جریان جرمی پایین‌تر از هوا در طول فرآیند تخلیه، قادر به استفاده از حداکثر ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی و دستیابی به تامین یکنواخت گرما برای مدت طولانی‌تر پس از غروب خورشید میگردد [۳]. پریتی سین^۳ و همکاران به صورت تجربی بر روی یک خشک‌کن خورشیدی با همرفت طبیعی با استفاده از ذخیره‌سازی گرمای نهان کار کردند. پارافین بعنوان مواد تغییرفازدهنده در داخل کلکتور به کار گرفته شد و کلکتور از نوع تخت هوا گرم‌کن می‌باشد. در طول تست بار حداکثر درجه حرارت بدست‌آمده در انتهای کلکتور و ورودی محفظه در زمان اوج تشعشع ۸۷۰ وات بر مترمربع بترتیب برابر است با ۰/۲ و ۰/۶. حجم واکس پارافین نیز برابر ۰/۰۶ متر مکعب می‌باشد. در آزمایشات مشاهده شد که رطوبت زنجبیل طی ۲۴ ساعت از ۷۴٪ به ۳٪ رسیده و میانگین بازده روزانه خشک‌کن ۱۲/۴٪ بدست آمد [۴]. ریزی^۴ و همکاران به صورت تجربی بر روی کاهش آب (خشک‌شدن) چارچ در درون یک خشک‌کن هیبرید خورشیدی با استفاده از مواد تغییرفازدهنده کار کردند. آنها از دو کلکتور برای تحقیق خود در نظر گرفتن یکی برای گرم‌کردن هوا و دیگری برای ذخیره انرژی گرمایی در مواد تغییرفازدهنده استفاده کردند. کلکتور هوای گرم آن از نوع تخت و مواد PCM آن پارافین می‌باشد. مواد PCM در لوله‌هایی لابه‌لای صفحات جاذب قرار دارند. نتایج نشان داد وجود PCM به طور قابل توجهی باعث بهبود راندمان سیستم می‌شود. بازده حرارتی نیز میتواند با افزایش جرم پارافین جامد افزایش یابد [۵]. شالابی^۵ و همکاران بررسی تجربی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با استفاده از مواد تغییرفازدهنده در محفظه‌ی خشک‌کن انجام دادند. کلکتور مورد استفاده از نوع تخت هوا گرم‌کن، واکس پارافین بعنوان مواد تغییرفازدهنده، محل قرارگیری مواد تغییرفازدهنده در دو محفظه‌ی جداگانه در داخل محفظه‌ی خشک‌کن چسبیده به کف محفظه به گونه‌ای که هوای ورودی به محفظه خشک‌کن از روی آن می‌گذرد. نتایج نشان داد ماکزیمم دما با وجود مواد PCM پایین‌تر از

^۴ Reyes^۵ Shalaby^۶ Alonge^۱ Esakkimuthu^۲ Phase Change material^۳ Sain



بنابراین جرم آبی که باید از دست بدهد برابر است با ۲/۳۳۷ کیلوگرم، از طرفی حرارت مورد نیاز برای تبخیر یک کیلوگرم آب برابر است با ۲/۲۶ مگاژول که در نتیجه آن حرارت مورد نیاز برای خشک کن برابر است با:

$$2/337 \text{ kg} * 2/26 \text{ Mj/kg} = 5/281 \text{ Mj}$$

جرم و حجم هوای لازم برای خشک کن

با مراجعه به نمودار سایکرومتریکی و دمای میانگین ۳۰ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۱۶ درصد نسبت رطوبت $0.05 / \text{kg water/kg dry air}$ بدست آمد. برای هوا با رطوبت ۴۰ درصد و دمای ۵۵ درجه سانتیگراد مقدار نسبت رطوبت $0.35 / \text{kg water/kg dry air}$ بدست می آید که با توجه به محاسبات زیر حجم هوای لازم برای خشک کردن محصول بدست می آید [۱۱].

$$m_{air} = 77/9 \text{ kg dry air}$$

طبق رابطه گاز کامل داریم:

$$PV = m_{air} RT \quad (3)$$

$$T = 303 \text{ k}$$

$$P = 83$$

$$R = 0/291 \text{ kpa m}^3/\text{kg}$$

$$V = 82/75$$

کل انرژی گرمایی مورد نیاز

کل انرژی گرمایی مورد نیاز برای تبخیر آب درون سیستم را می توان از رابطه زیر تخمین زد [۱۰]:

$$E = M_a(h_f - h_i)t_d$$

مقدار آنتالپی هوا بر حسب ژول بر کیلوگرم را میتوان از رابطه زیر تخمین زد:

$$h = 1006/9T + m_w(2512131 + 1552/4T) \quad (4)$$

بنابراین داریم:

$$E = 9/017 \text{ Mj}$$

مساحت کلکتور مورد نیاز

با فرض در نظر گرفتن بازده ۳۰ درصد برای کلکتور هوای گرم طبق رابطه ی زیر مقدار مساحت کلکتور مورد نیاز تخمین زده میشود [۱۰]:

$$A_c = \frac{E}{I_b * \eta} \quad (5)$$

بنابراین با فرض ۲۰ درصد مساحت بیشتر برای سطح کلکتور خواهیم داشت:

$$A_c = 1/5 \text{ m}^2$$

کل انرژی جمع شده از سطح کلکتور

کل انرژی خورشیدی جمع شده از سطح کلکتور هوای گرم طبق رابطه زیر محاسبه میگردد [۱۰]:

$$E_T = A_c I \quad (6)$$

بنابراین کل انرژی جمع شده از سطح کلکتور $38/4 \text{ Mj}$ می باشد.

ساخت اجزای سیستم

همینطور استفاده از مواد PCM تاثیر منفی در کیفیت محصول خشک شده ندارد [۹].

بنابراین با توجه به مرور کارهای گذشته، خشک کن مورد نظر در سه حالت جابجایی آزاد، سرعت فن کم و زیاد مورد بررسی قرار گرفت، سپس مقدار ۱۲ کیلوگرم پارافین به دلیل فراوانی، ارزانی و پایداری شیمیایی در سیکل های شارژ و دشارژ و محدوده مناسب دمایی برای تغییر فاز به سیستم تزریق شد و سپس آزمایشات نیز در این حالت تکرار گردید.

طراحی و ساخت دستگاه

طراحی بر اساس ظرفیت خشک کن خورشیدی که با توجه به مطالعات انجام شده و محدودیت های موجود مقدار ۳ کیلوگرم میوه به در نظر گرفته شد انجام گرفت. مساحت ۳ کیلوگرم به ورق شده برابر تقریباً ۱/۲ مترمربع می باشد که با احتساب ۲۰ درصد افزایش در حالت های مختلف نهایتاً برابر ۱/۴۴ مترمربع می باشد.

بنابراین محفظه ی خشک کن دارای سه عدد سینی در ابعاد $0.8 * 0.6 * 3 = 1/44 \text{ m}^2$ متر می باشد، بنابراین مساحت سینی های موجود در محفظه برابر است با:

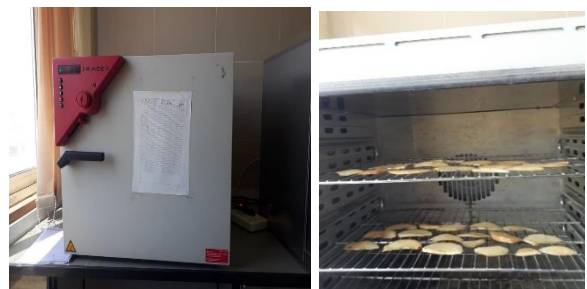
$$0/8 * 0/6 * 3 = 1/44 \text{ m}^2$$

اندازه گیری میزان رطوبت نمونه ها

میزان رطوبت اولیه محصول و محصول خشک (بر اساس وزن مرطوب) با قرار دادن نمونه ها درون آون در دمای 105 ± 5 درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت (ثابت شدن جرم) و طبق رابطه زیر محاسبه گردید [۱۰]:

$$MC(w.b) = \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in}} * 100 \quad (1)$$

رطوبت اولیه محصول $80/14\%$ و رطوبت نهایی محصول $10/03\%$ بدست آمد.



شکل ۱: بدست آوردن رطوبت محصول با دستگاه آون

محاسبه ی سطح کلکتور با توجه به ظرفیت خشک کن و شرایط اقلیمی محل آزمایش

طبق رابطه (۲) جرم آب محصول که باید از محصول گرفته شود، بدست خواهد آمد [۱۱]:

$$M_w = \frac{M_c(W_I - W_F)}{100 - W_F} \quad (2)$$

عایق

قسمت کف کلکتور هوای گرم را با استفاده از پشم سنگ به ضخامت ۱۰ سانتیمتر عایق کاری و روی آن ورق آلومینیوم کشیده شد.



شکل ۳: عایقکاری کف کلکتور هوای گرم

فن

فن در ابتدای ورودی به کلکتور هوای گرم تعبیه شده و باعث دمیده شدن هوای بیرون به داخل کلکتور می شود.



شکل ۴: فن تعبیه شده در محفظه نگهدارنده

جدول ۴: مشخصات موتور فن

| مقادیر | مشخصات موتور فن |
|--------|-----------------|
| PYCO | مدل |
| ۱۲ | ولتاژ |
| ۲ | تعداد دور |



شکل ۵: حالت مونتاژ شده سیستم، (A) سیستم در حالت جایجایی آزاد، (B) سیستم در حالت جایجایی اجباری

محفظه خشک کن

با توجه به محاسبات انجام شده بر اساس ظرفیت خشک کن تعداد سه سینی به ابعاد ۸۰ در ۶۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد و چیدمان

کلکتور هوای گرم از چند جزء تشکیل شده است که شامل چهارچوب اصلی، لوله های داخلی کلکتور، صفحه جاذب، عایق و شیشه می باشد.

چهارچوب اصلی

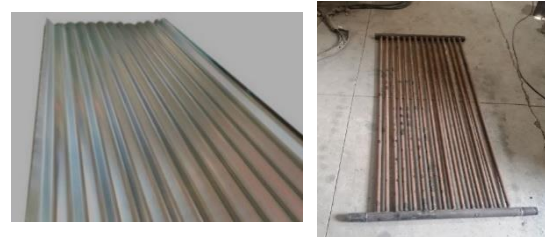
چهارچوب کلکتور هوای گرم که جنس آن آلومینیوم می باشد.

جدول ۱: مشخصات چهارچوب اصلی

| مقادیر | مشخصات چهارچوب |
|---------------|----------------|
| آلومینیوم | جنس |
| ۱۹۸/۵*۹۳*۱۴/۶ | ابعاد (cm) |

لوله های داخل کلکتور

لوله های تعبیه شده که محل قرارگیری مواد تغییرفازدهنده درون سیستم می باشد.



شکل ۲: لوله های کلکتور هوای گرم و صفحه جاذب موجدار

جدول ۲: مشخصات لوله های کلکتور

| مقادیر | مشخصات لوله های کلکتور |
|--------|------------------------|
| آهن | جنس |
| ۵۰ | قطر لوله هدر (mm) |
| 25 | قطر لوله کلکتور (mm) |
| 87 | طول لوله هدر (cm) |
| 177 | طول لوله کلکتور (cm) |
| 2 | ضخامت لوله هدر (mm) |
| 0/8 | ضخامت لوله کلکتور (mm) |

صفحه جاذب

برای افزایش سطح موثر کلکتور و بهبود عملکرد آن، صفحه جاذب آن از یک ورق آهن گالوانیزه موجدار تشکیل شده است.

جدول ۳: مشخصات صفحه جاذب

| مقادیر | مشخصات صفحه جاذب |
|---------------|------------------|
| آهن گالوانیزه | جنس |
| ۱۷۰*۸۵ | ابعاد (cm) |

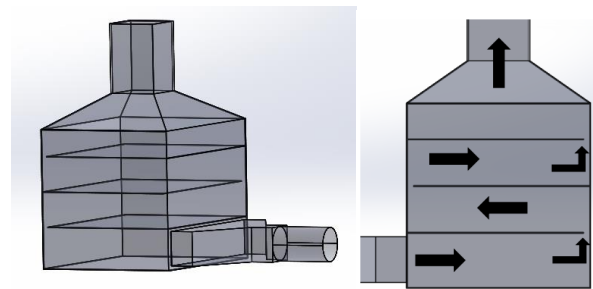


شکل ۷: سینی های پر شده از به تازه



شکل ۸: سینی های پر شده درون محفظه خشک کن

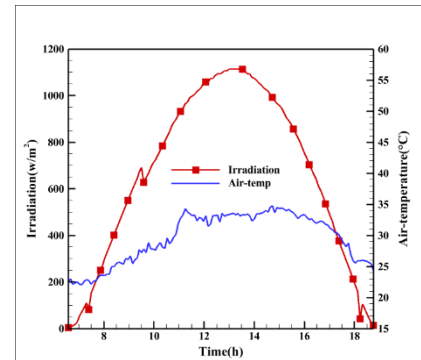
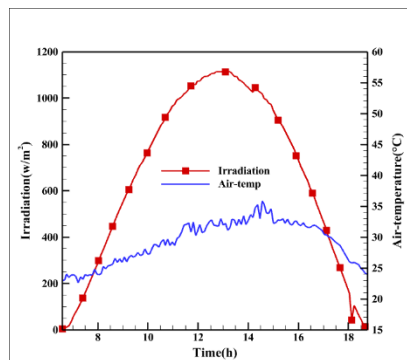
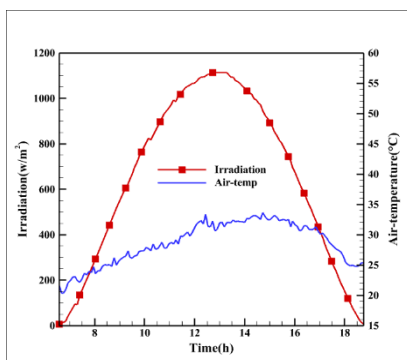
سینی ها به صورت زیگزاگی قرارداده شد و طراحی محفظه مطابق شکل ۶ انجام گردید.



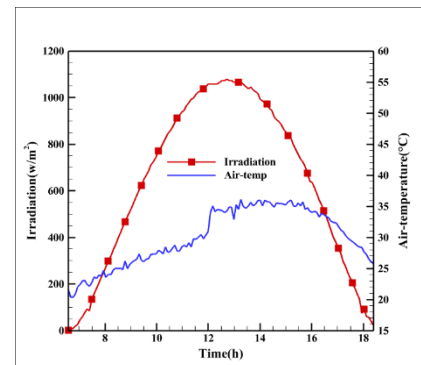
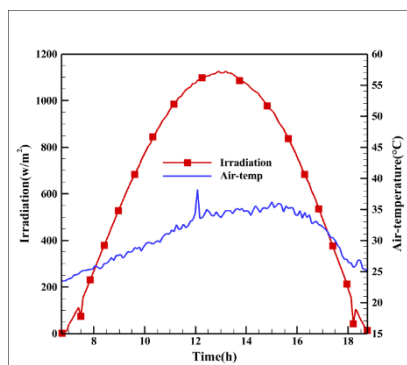
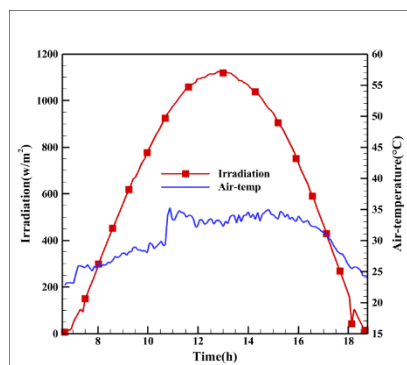
شکل ۶: طراحی محفظه خشک کن

آزمایشات و نتیجه گیری

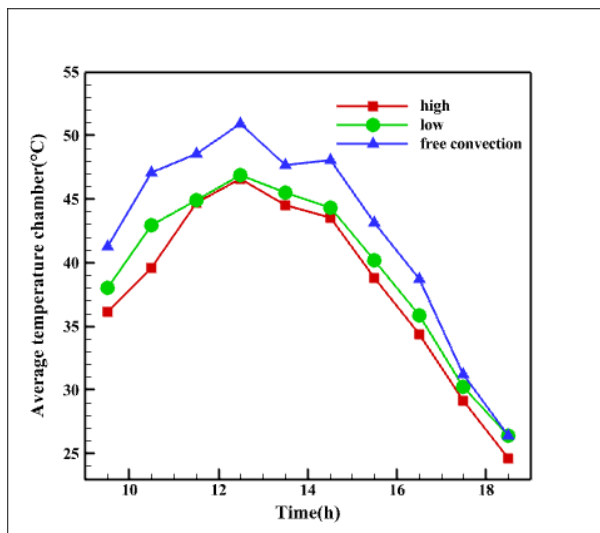
آزمایشات در شرایط آب و هوایی شهر ماهان کرمان در آزمایشگاه انرژی خورشیدی پژوهشکده انرژی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان در تاریخ ۲۸-۲۲ شهریور ۱۴۰۰ انجام شد. بدین صورت که سه روز ابتدایی سیستم در حالت بدون مواد ذخیره ساز انرژی در سرعت فن های زیاد، کم و جابجایی آزاد از ساعت ۸:۳۰ تا ۱۸:۳۰ تست گردید، سپس در روز چهارم مواد ذخیره ساز انرژی به سیستم تزریق شد و سپس تست ها در سرعت فن های زیاد، کم و جابجایی آزاد از ساعت ۸:۳۰ تا ۲۲:۳۰ گرفته شد. در هر تست مقدار ۳ کیلوگرم میوه به تازه ورق شده که در هر سینی یک کیلوگرم مطابق شکل ۷ درون سیستم قرار داده شد.



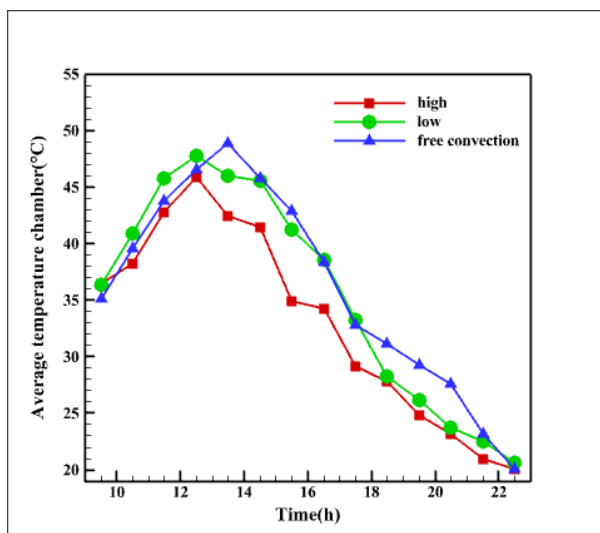
شکل ۹: میزان شدت تابش و دمای محیط بترتیب از چپ به راست در روزهای ۲۲، ۲۳ و ۲۴ شهریور ۱۴۰۰



شکل ۱۰: میزان شدت تابش و دمای محیط بترتیب از چپ به راست در روزهای ۲۶، ۲۷ و ۲۸ شهریور ۱۴۰۰

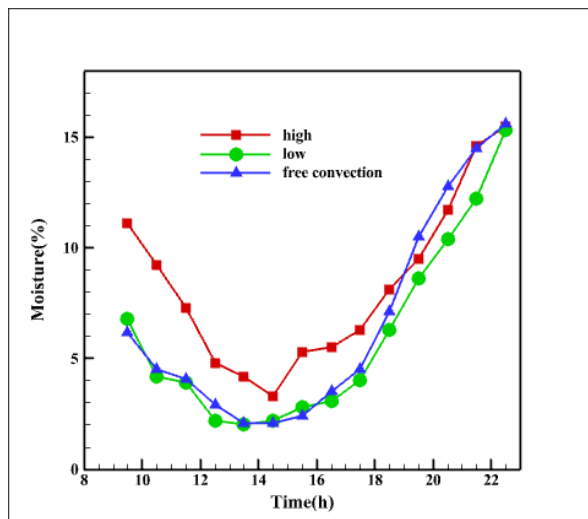


شکل ۱۳: میانگین دمای محفظه بر حسب زمان بدون مواد تغییرفازدهنده



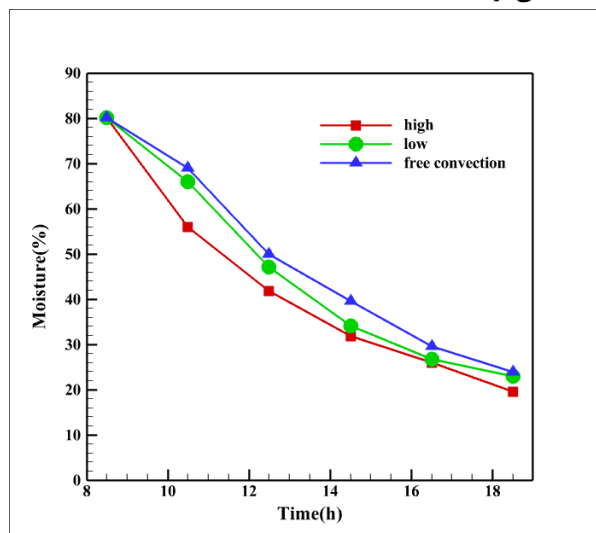
شکل ۱۴: میانگین دمای محفظه بر حسب زمان با مواد تغییرفازدهنده

شکل ۱۵ مقدار رطوبت ورودی به محفظه خشک کن در حضور مواد تغییرفازدهنده را نشان میدهد. همانطور که مشخص است، رطوبت ورودی در سرعت فن زیاد بیشتر از سرعت فن کم و جابجایی آزاد می باشد.

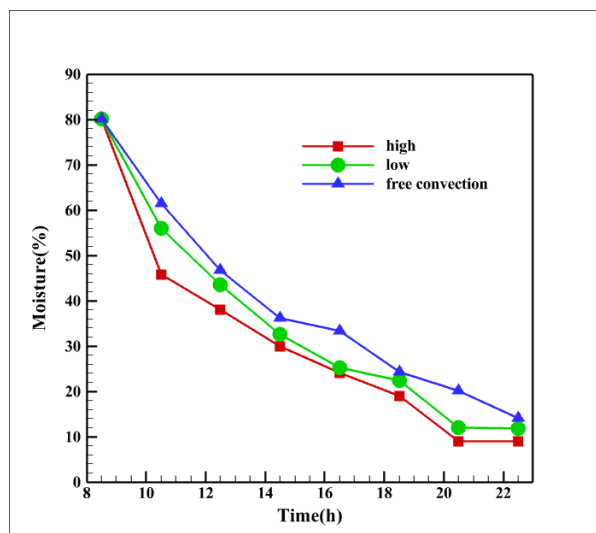


شکل ۱۵: مقدار رطوبت ورودی به محفظه خشک کن

شکل ۱۱ مقدار کاهش رطوبت محصولات در طی فرآیند خشک کردن بدون مواد تغییرفازدهنده را نمایش می دهد. همانطور که مشاهده می شود رطوبت محصول مورد نظر در طول روز به حد مطلوب (۱۰-۱۲ درصد) نرسیده است و عملاً نمی توان گفت که محصول مورد نظر خشک شده است. اما همانطور که در شکل ۱۲ مشخص می باشد، فرآیند خشک شدن با استفاده از مواد تغییرفازدهنده در طول یک روز اتفاق می افتد و محصول مورد نظر با سرعت فن زیاد، کم و جابجایی آزاد بترتیب در ۱۱، ۱۲ و ۱۵ ساعت خشک می گردد.

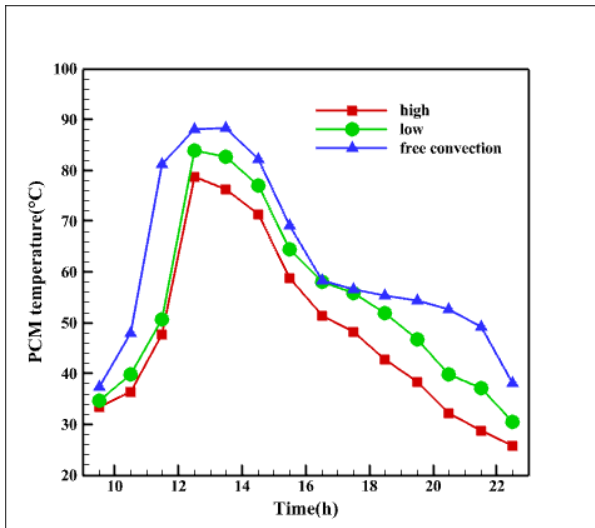


شکل ۱۱: رطوبت محصولات بر حسب زمان خشک شدن بدون استفاده از مواد تغییرفازدهنده



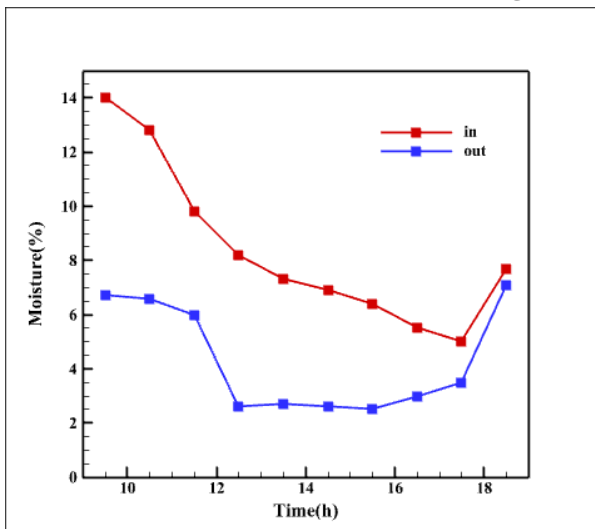
شکل ۱۲: رطوبت محصولات بر حسب زمان خشک شدن با استفاده از مواد تغییرفازدهنده

مقایسه شکل ۱۳ و ۱۴ که میانگین دمای محفظه خشک کن می باشد، نشان میدهد که در حالت کلی دمای میانگین محفظه خشک کن در حالت استفاده از مواد تغییرفازدهنده کمتر از حالت بدون مواد تغییرفازدهنده می باشد که ناشی از مرحله شارژ مواد تغییرفازدهنده می باشد.



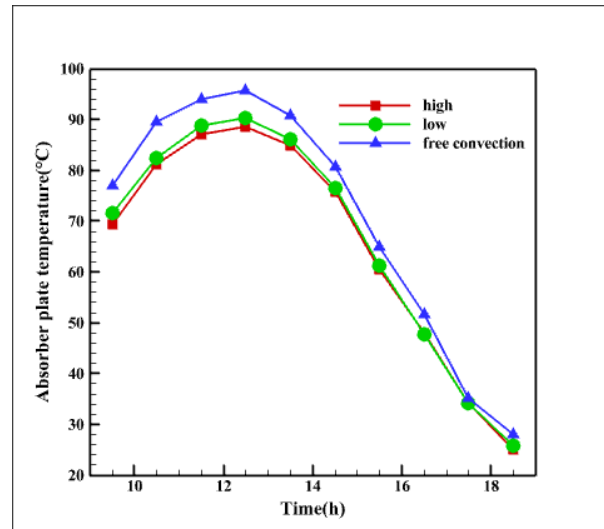
شکل ۱۸: دمای مواد تغییرفازدهنده در لوله‌های کلکتور

در شکل ۱۹ و ۲۰ رطوبت ورودی و خروجی به کلکتور هوای گرم خشک کن خورشیدی را با و بدون مواد تغییرفازدهنده نشان می‌دهد. اختلاف رطوبت ورودی و خروجی کلکتور بدون مواد تغییرفازدهنده بسیار بیشتر از حالت استفاده از مواد تغییرفازدهنده می‌باشد و این دلیل عملیات شارژ مواد تغییرفازدهنده می‌باشد که در زمان استفاده از مواد تغییرفازدهنده قسمت زیادی از انرژی خورشیدی صرف ذخیره سازی می‌شود و همان امر باعث می‌شود وقتی هوا در داخل کلکتور حرکت می‌کند رطوبت کمتری از دست بدهد.

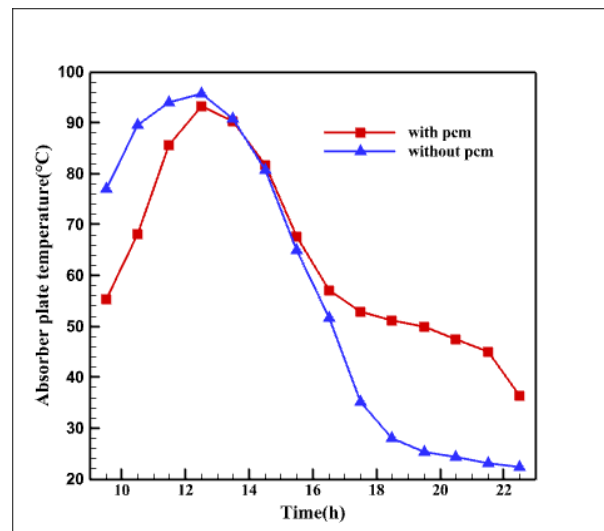


شکل ۱۹: رطوبت ورودی و خروجی به کلکتور بدون مواد تغییرفازدهنده

در شکل ۱۶ دمای صفحه جاذب در طول فرآیند خشک کردن در غیاب مواد تغییرفازدهنده را نشان می‌دهد، که در حالت جابجایی آزاد دمای صفحه جاذب به حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. در شکل ۱۷ دمای صفحه جاذب با و بدون مواد تغییرفازدهنده در حالت جابجایی آزاد نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۶: دمای صفحه جاذب بدون استفاده از مواد تغییرفازدهنده در سه حالت جابجایی آزاد، سرعت فن زیاد و کم

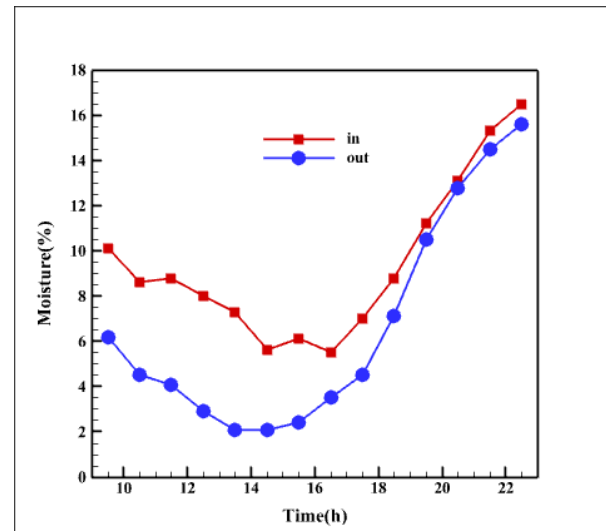


شکل ۱۷: دمای صفحه جاذب در حالت جابجایی آزاد با و بدون مواد تغییرفازدهنده

در شکل ۱۸ دمای پارافین موجود در لوله‌های کلکتور نشان داده شده است. ماکزیمم دمای پارافین در حالت جابجایی آزاد اتفاق می‌افتد و دمایی برابر ۸۸/۴۶ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد و همینطور که ملاحظه می‌شود عملیات دشارژ در ساعت ۱۶:۳۰ شروع می‌شود و پایداری دما را در محدوده مورد نظر تا ساعت ۲۲:۳۰ در پی خواهد داشت و فرآیند خشک شدن تا ساعت ۲۲:۳۰ ادامه خواهد داشت.

مراجع

- [1] D. Jain, "Modeling the system performance of multi-tray crop drying using an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage," *Journal of food engineering*, vol. 71, no. 1, pp. 44-54, 2005.
- [2] م. ر. رسولی, "بررسی تجربی عملکرد خشک کن خورشیدی با به کارگیری مواد تغییرفازدهنده," کارشناسی ارشد, صنعتی اصفهان, ۱۳۹۰.
- [3] S. Esakkimuthu, A. H. Hassabou, C. Palaniappan, M. Spinnler, J. Blumenberg, and R. Velraj, "Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications," *Solar Energy*, vol. 88, pp. 144-153, 2013.
- [4] P. Sain, V. Songara, R. Karir, and N. Balan, "Natural convection type solar dryer with latent heat storage," in *2013 International Conference on Renewable Energy and Sustainable Energy (ICRESE)*, 2013: IEEE, pp. 9-14.
- [5] A. Reyes, A. Mahn, and F. Vásquez, "Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material," *Energy Conversion and management*, vol. 83, pp. 241-248, 2014.
- [6] S. Shalaby and M. Bek, "Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium," *Energy conversion and management*, vol. 83, pp. 1-8, 2014.
- [7] S. O. Obayopo and A. Oluwasanmi, "CFD and experimental analysis of direct solar dryer for fish," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 108-117, 2019.
- [8] M. Iranmanesh and B. Jahromi, "Effect of forced convection and PCM materials on an indirect solar dryer equipped with evacuated heat pipe collector," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 11, pp. 2607-2614, 2019.
- [9] M. Iranmanesh, H. S. Akhijahani, and M. S. B. Jahromi, "CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1192-1213, 2020.
- [10] M. N. Musembi, K. S. Kiptoo, and N. Yuichi, "Design and analysis of solar dryer for mid-latitude region," *Energy procedia*, vol. 100, pp. 98-110, 2016.
- [11] خشک کن م. ص. ب. چهرمی, "طراحی و ساخت خورشیدی غیرمستقیم با دو نوع کلکتور تخت و لوله خلاء و با استفاده از ماده تغییرفازدهنده و بررسی مقایسه ای پارامترهای موثر بر عملکرد آن," کارشناسی ارشد, دانشگاه تحصیلات تکمیلی و صنعتی پیشرفته کرمان, کرمان, ۱۳۹۷.



شکل ۲۰: رطوبت ورودی و خروجی به کلکتور با مواد تغییرفازدهنده

نتیجه گیری

۱. سیستم بدون مواد تغییرفازدهنده در طول یک روز قادر به خشک کردن محصول موردنظر نیست و این بدین معنی است که نیاز به زمان بیشتری برای فرآیند خشک کردن است که نتیجه آن زمان و هزینه بیشتر و همچنین کاهش کیفیت محصول می باشد.
۲. فرآیند خشک کردن با استفاده از مواد تغییرفازدهنده در کلکتور هوای گرم در طول یک روز اتفاق می افتد و محصول با سرعت فن های زیاد، کم و جابجایی آزاد بترتیب در ۱۱، ۱۲ و ۱۵ ساعت خشک می گردد.
۳. میانگین دمای محفظه بدون مواد تغییرفازدهنده در حالت جابجایی آزاد بیشتر از جابجایی اجباری است. از طرفی زمانیکه از مواد تغییرفازدهنده در سیستم استفاده می شود در زمان دشارژ این مواد در حالت جابجایی آزاد دمای بیشتر و ثابت تری را نسبت به جابجایی اجباری داریم، بنابراین جابجایی آزاد در این سیستم برای میانگین دمای محفظه عملکرد بهتری دارد.
۴. رطوبت ورودی به محفظه ی خشک کن در سرعت فن زیاد، بیشتر از سرعت کم و جابجایی آزاد می باشد، بدین معنی است که هوا زمان لازم برای کاهش رطوبت در کلکتور را در سرعت زیاد ندارد. بنابراین کلکتور هوای گرم در سرعت فن کم و جابجایی آزاد بهترین عملکرد را در کاهش رطوبت هوا دارد.
۵. بنابراین می توان گفت سیستم در حالت استفاده از مواد تغییرفازدهنده عملکرد بهتری نسبت به عدم استفاده از مواد تغییرفازدهنده دارد، همچنین بهترین عملکرد از لحاظ فنی و اقتصادی در حالت جابجایی آزاد نسبت به جابجایی اجباری می باشد.

ACEC2021-85533

مروری بر آب شیرین کن های فتوولتائیک خورشیدی به روش اسمز معکوس

علیرضا فروغی مهر^۱، عقیق مریخی^۲، زهرا گمار^۳، یاور عنانی^۴، مرتضی امینی^۵

^۱ کارشناس فرآیند و توسعه مهندسی، بخش برق شرکت گروه مینا Foroughimehr_a@mapnagroup.com

^۲ دانشجوی مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر ahighmerrikhi@gmail.com

^۳ معاون مهندسی، بخش برق شرکت گروه مینا Gomar@mapnagroup.com

^۴ مدیر کسب و کارهای جدید، بخش برق شرکت گروه مینا Anani_y@mapnagroup.com

^۵ کارشناس کسب و کارهای جدید، بخش برق شرکت گروه مینا Amini_mo@mapnagroup.com

می شود. بنابراین استفاده از منابع انرژی مناسب برای آب شیرین کن در مناطق دور افتاده اهمیت بسیاری دارد، در این راستا انرژی های تجدیدپذیر یکی از بهترین منابع برای تامین انرژی آب شیرین کن های علی الخصوص در مناطق دورافتاده هستند. حدود ۲/۵ درصد از منابع آب روی کره زمین قابل شرب است و ۹۷/۵ درصد باقیمانده شامل دریاها و منابعی با شوری بالا است. فناوری تصفیه آب این امکان را به انسان ها می دهد تا بتوانند به ۹۷/۵ درصد از منابع بیشمار آب دسترسی داشته باشند.

روش های مختلفی برای تولید آب شیرین وجود دارد. شطات و همکاران فناوری های آب شیرین کن را در دو گروه فرآیند حرارتی و فرآیند غشایی دسته بندی کردند. روش های تقطیر ناگهانی چند مرحله ای^۲ (MSF)، تقطیر چند مرحله ای^۳ (MED)، اواپراتور بخار فشرده^۴ (VC) و آب شیرین کن خورشیدی^۵ جزو رایج ترین روش های فرآیندهای حرارتی هستند. از شناخته شده ترین روش های فرآیندهای غشایی می توان روش های اسمز معکوس^۶ (RO)، الکترودیالیز^۷ (ED) و آب شیرین کن غشایی را نام برد [۱]. بطور کلی می توان گفت که روش اسمز معکوس مصرف انرژی ویژه کمتری نسبت به روش های حرارتی دارد که این امر باعث کاهش در هزینه های تولید می شود [۲]. در شکل ۱، درصد استفاده از فناوری های مختلف تولید آب شیرین کن نصب شده در دنیا نشان داده شده است [۳]. می توان دید که رایج ترین روش آب-شیرین کن ها در دنیا نیز روش اسمز معکوس است [۴ و ۵]. بدین ترتیب در این مقاله به بررسی این روش پرداخته می شود.

چکیده

کمبود منابع آب شیرین در دنیا باعث حرکت انسان به سمت استفاده از فناوری های آب شیرین کن شد. استفاده از این فناوری ها به طور عمده در دنیا در روش های مختلف موجود است. روش اسمز معکوس یکی از رایج ترین روش ها در این حوزه است که در کاربردهای مختلفی استفاده می شود. به دلیل مسائل زیست محیطی و همچنین ویژگی های جغرافیایی، سیستم های تجدیدپذیر، به ویژه سیستم های PV، برای تامین توان این سیستم ها استفاده می شود. از چالش های این سیستم می توان هزینه بالا و همچنین مصرف انرژی زیاد را نام برد. در این مقاله به بررسی فناوری اسمز معکوس پرداخته شد و مروری بر پژوهش های انجام شده و تلاش برای کاهش مصرف انرژی و هزینه انجام شد. همچنین روش های نوینی معرفی شدند که باعث افزایش بازده و کاهش مصرف انرژی می شوند.

واژه های کلیدی: اسمز معکوس، سیستم PV-RO، دستگاه های بازیابی انرژی^۱ (ERD)

مقدمه

امروزه با توجه به مسئله کمبود آب و افزایش روزافزون مصرف آن، نیاز به استفاده از آب شیرین کن ها اهمیت بیش تری پیدا کرده است. به همین جهت در طی سال های اخیر این فناوری ها رشد زیادی داشتند، اما همچنان هزینه بالا و مصرف انرژی زیاد یکی از چالش های این فناوری ها محسوب می شود. علاوه بر این نیاز به آب شیرین بیشتر در مناطقی وجود دارد که دسترسی به شبکه برق وجود ندارد و هزینه های زیادی صرف انتقال برق و نیز سایر انرژی های فسیلی به این نواحی

⁴ Vapour-compression evaporation

⁵ Solar water desalination

⁶ Reverse Osmosis

⁷ Electrodialysis

¹ energy recovery device

² Multi-stage flash distillation

³ Multiple-effect distillation

خورشیدی به روش اسمز معکوس از نظر عملکرد، ذخیره سازی و بازیابی انرژی مورد بررسی قرار بگیرد.

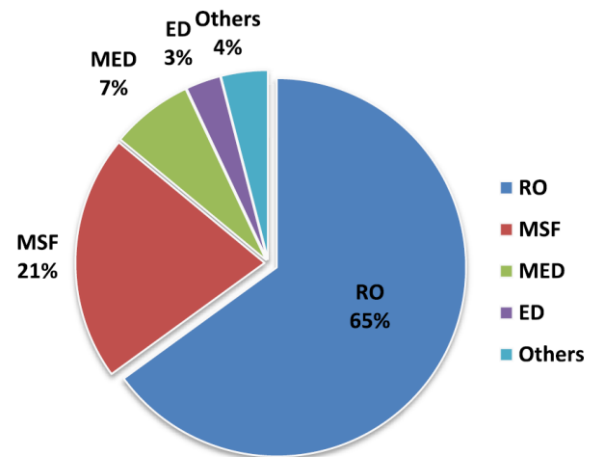
سیستم اسمز معکوس

در سیستم RO، شوری آب به وسیله یک غشای نیمه تراوا گرفته می شود. به عنوان یک اثر طبیعی، اگر دو محلول آب با غلظت های متفاوت به وسیله غشای نیمه تراوا در جوار هم باشند، آب همواره از محلول با غلظت کمتر به سمت محلول با غلظت بیشتر جریان پیدا می کند، تا در نهایت دو محلول دارای غلظت یکسان شوند. به این اثر که معمولاً در محیط های زنده اتفاق می افتد اثر اسمز گفته می شود. در طی جریان آب از غلظت کمتر به غلظت بالاتر به واسطه غشا، فشار طبیعی بر غشا وارد می شود که فشار اسمز نامیده می شود. مقدار این فشار به عوامل زیادی از جمله دمای آب ورودی، اختلاف غلظت بین دو محلول و غیره بستگی دارد، اما نوع غشا تأثیری در این مقدار ندارد. برای به دست آوردن آب شیرین لازم است تا آب از محل با غلظت بیشتر به غلظت کمتر جریان پیدا کند تا آب شیرین در سمت غلظت پایین بدست آید. بنابراین باید جهت جریان آب معکوس شود که نیازمند این است که خلاف جهت اثر اسمز حرکت کند. بر این اساس این روش اسمز معکوس نامیده می شود. برای اینکه آب خلاف جریان طبیعی خود را داشته باشد باید فشاری خارجی بیشتر از فشار اسمزی در آب ورودی با غلظت بالاتر به وسیله پمپ وارد شود.

اگر فشار وارده بر آب ورودی با غلظت بالاتر به صورت مداوم باشد، در این صورت جریان آب ثابتی از غشا به سمت ناحیه غلظت کم داریم و بدین صورت می توانیم آب شیرین را به دست آوریم و تصفیه آب را انجام دهیم. به طور کلی در این سیستم در یک سمت غشا، جریان آب شیرین شده با غلظت کم داریم و در طرف دیگر غشا، جریان آب ورودی که در نهایت شور تر از حالت اولیه آن می شود داریم که از سیستم خارج می شود [۶]. فشار عملکردی سیستم RO آب شور، معمولاً بین ۱۵ تا ۳۰ بار است و برای سیستم آب دریا، دارای مقادیر بیش تر بین ۵۵ تا ۷۰ بار است [۹ و ۸]. مفهوم مصرف انرژی ویژه^۹ (SEC) برای ارزیابی میزان مصرف انرژی سیستم RO اهمیت بسیاری دارد که معمولاً بر اساس کیلووات ساعت بر متر مکعب (kWh/m^3) بیان می شود. در حال حاضر مصرف انرژی ویژه از مقدار $20 kWh/m^3$ در سال ۱۹۸۰ به کمتر از $3 kWh/m^3$ کاهش یافته است و این نرخ نزولی همچنان ادامه دارد [۱۰ و ۱۱]. مصرف انرژی ویژه یکی از شاخصه های است که برای تشخیص سیستم بهینه تر استفاده می شود.

غشای نیمه تراوا در زمان عبور آب، مانع عبور املاح آن می شود، اما نمی تواند مانع از عبور تمام املاح شود. البته غشای نیمه تراوا اجازه عبور املاح با همان سرعت عبور آب را نمی دهد و همین موضوع باعث کاهش غلظت آن املاح در آب شیرین می شود. جنس غشا تأثیر زیادی بر روی سرعت عبور آب و املاح دارد.

به دلیل محدودیت های تاسیساتی و غیره، تنها بخشی از جریان آب ورودی می تواند از غشا عبور کند و جریان آب شیرین را تشکیل دهد. این مقدار به عنوان کسری از جریان آب ورودی تعریف می شود و نرخ



شکل ۱. درصد استفاده از فناوری های مختلف آب شیرین کن در دنیا [۳]

روش اسمز معکوس فرآیندی است که از آن برای تولید آب آشامیدنی استفاده می شود. این فرآیند می تواند با استفاده از یک غشا، آب شور یا آب دریا را به آب شیرین تبدیل کند. یکی از شاخص های اساسی برای تشخیص کیفیت آب، کل جامدات محلول^۸ (TDS) است که بر اساس میلی گرم بر لیتر (mg/l) یا تعداد در هزار (ppt) بیان می شود. این شاخص مهم ترین شاخص کیفیت آب در حوزه تصفیه آب اسمز معکوس است زیرا یکی از پارامترهای کلیدی برای تعیین فشار آب ورودی دستگاه RO است، که بدین ترتیب تأثیر زیادی روی مصرف انرژی سیستم دارد. بر اساس استانداردهای جهانی غلظت TDS آب آشامیدنی تا حداکثر $500 mg/l$ باید باشد. به طور کلی آب با غلظت TDS $500 mg/l$ تا $15000 mg/l$ به عنوان آب شور معرفی می شود و در غلظت های TDS بالاتر به عنوان آب دریا [۶]. سیستم های RO هم در تصفیه آب شور و هم آب دریا به کار می روند.

با توجه به اینکه مسئله کمبود آب شیرین بیشتر در مناطق دور از شبکه برق وجود دارد و در سال های اخیر مسئله کاهش تولید کربن اهمیت زیادی پیدا کرده است، به همین جهت استفاده از منابع تجدیدپذیر برای تامین انرژی آب شیرین کن ها مورد توجه زیادی قرار گرفته است. بوندشو و همکاران مروری بر استفاده از انواع انرژی های تجدیدپذیر اعم از انرژی خورشیدی (فتوولتائیک و خورشیدی متمرکز حرارتی)، بادی، برق آبی، بیومس، زمین گرمایی و سیستم های ترکیبی برای تامین انرژی آب شیرین کن انجام دادند. آن ها به بررسی مزایا و معایب هر کدام از روش ها پرداختند و همچنین بررسی هزینه ای نیز روی این سیستم ها انجام دادند [۷].

با توجه به اینکه مناطق دورافتاده معمولاً دارای تابش خورشیدی زیادی هستند، بنابراین استفاده از پنل های فتوولتائیک می تواند انتخاب مناسبی برای تامین انرژی آب شیرین کن اسمز معکوس در این مناطق باشد [۸]. در این مقاله سعی شده است تا با بررسی مقالات بین المللی معتبر بعد از سال ۲۰۰۰ میلادی و با تأکید بر مقالات سال ۲۰۱۵ به بعد، پیشرفت های اخیر در مورد آب شیرین کن های فتوولتائیک

⁹ specific energy consumption

⁸ total dissolved solids

انرژی و روش های نوین افزایش چشم گیری داشته است. در ادامه ابتدا پژوهش های انجام شده در سیستم های PV-RO به همراه باتری، سیستم های PV-RO بدون باتری و متصل به شبکه را مورد بررسی قرار می گیرد. سپس استفاده از دستگاه های بازیابی انرژی، روش اتصال مستقیم به موتور DC، روش استفاده از خنک کننده و در نهایت استفاده از سیستم PV-RO در مقیاس بالا مورد بررسی قرار گرفت. بررسی پژوهش ها در ادامه آمده است.

سیستم PV-RO به همراه باتری

هارولد و نسکاکیس [۱۲] سیستم RO با تامین انرژی PV همراه با باتری برای ذخیره سازی نصب کردند. ظرفیت در نظر گرفته شده برای سیستم $0.8 \text{ m}^3/\text{day}$ تا $3 \text{ m}^3/\text{day}$ بود و سیستم تامین انرژی آن هم شامل ۶۴ ماژول مونوکریستال سیلیکون با توان کلی ۴,۸ kW و باتری با ظرفیت نامی ۱۲۴۰ Ah بود. همچنین سیستم RO در نظر گرفته شده دارای ظرفیت $3 \text{ m}^3/\text{day}$ بود. در این پژوهش برای بدست آوردن پارامترهای بهینه سیستم، فشار ورودی آب را بین ۴۵ تا ۶۳ بار تغییر دادند و متوجه شدند که در فشار ۶۳ بار سیستم RO با ظرفیت $1.155 \text{ m}^3/\text{h}$ کار می کند و TDS آب شیرین برابر 330 ppm می شود و مصرف انرژی ویژه نیز برابر $15 \text{ kWh}/\text{m}^3$ می شود. الغول و همکاران [۱۳] سیستم RO با تامین انرژی PV طراحی کردند که در این سیستم TDS آب ورودی، $2000 \text{ mg}/\text{l}$ و TDS آب شیرین شده کمتر از $50 \text{ mg}/\text{l}$ در طراحی در نظر گرفته شد. توان سیستم PV، ۲ کیلووات در نظر گرفته شد و این سیستم با استفاده از نرم افزار ROSA طراحی و شبیه سازی شد. این سیستم همچنین به صورت عملی اجرا شد و نتایج مشابه با شبیه سازی نرم افزار بود. نتایج حاکی از آن بودند که این سیستم می تواند با ظرفیت $5/1$ متر مکعب در روز با نسبت $10 \text{ m}^3/\text{day}$ کار کند و مصرف انرژی ویژه آن نیز $1 \text{ kWh}/\text{m}^3$ بدست آمد.

سیستم PV-RO بدون باتری

کوماراسامی و همکاران [۱۴] با طراحی مدل بدون باتری سیستم PV-RO، سعی برای به دست آوردن پارامترهای این سیستم به وسیله نرم افزار ROSA کردند و مقایسه بین حالت های مختلف آن انجام دادند. در حالت اول سیستم را بدون باتری در نظر گرفتند و عملکرد آن را در فشارهای متغیر و ثابت پمپ ورودی ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که در حالت فشار متغیر تولید ۵ درصد افزایش می یابد. در حالت دوم از مخزن تنظیم نفوذی^{۱۱} با فشار متغیر ورودی برای ذخیره سازی استفاده کردند. آن ها مشاهده کردند که در این حالت تولید نسبت به حالت بدون باتری فشار ثابت ۳۶ درصد و نسبت به حالت بدون باتری فشار متغیر ۲۸ درصد افزایش داشته است.

بازیابی نفوذ^{۱۰} (Pr) نامیده می شود. این درصد در سیستم های RO اهمیت بسیاری دارد. به طور کلی برای سیستم های RO آب دریا، این مشخصه حدود ۵۰ درصد تنظیم می شود و برای سیستم های RO آب شور، در مقادیر بیشتری بین ۶۵ تا ۸۵ درصد تنظیم می شود. این درصد یکی از مشخصه های مهم سیستم RO است. در ادامه به بررسی عوامل موثر بر روی عملکرد سیستم RO پرداخته می شود [۶].

اثر دما بر عملکرد سیستم اسمز معکوس

کاهش گرانی آب یکی از تاثیرات بالا بردن دمای آب ورودی است و همین موضوع باعث افزایش شار نفوذی آب از غشای نیمه تراوا می شود. حدودا می توان گفت که با افزایش هر یک درجه سانتیگراد دمای آب ورودی، شار نفوذی آب ۳ درصد افزایش پیدا می کند. ناگفته نماند که ساختار غشا به دلیل مواد پلیمری آن با افزایش دما آسیب می بیند و در نتیجه باعث سرعت عبور بیشتر و دبی بیش تر املاح از غشا می شود. البته نرخ افزایش شار آب بسیار بیشتر از تخریب غشا و کاهش کیفیت آب شیرین است و به طور کلی افزایش دما می تواند برای این سیستم مفید واقع شود.

در حالات عمده، اهمیت داشتن جریان ثابت و پایداری از آب شیرین شده، بیشتر از افزایش شار است. بنابراین تاثیر افزایش دما باید طوری تنظیم شود که به جای افزایش شار عبوری، با داشتن جریانی ثابت، فشار کمتری برای ورودی آب سیستم نیاز باشد. این موضوع روی کار پمپ اثر دارد و باعث کاهش انرژی مصرفی پمپ و کل انرژی مورد نیاز می شود. در نهایت می توان گفت که سیستم RO در دماهای بالاتر از عملکرد بهتری از خود نشان می دهد [۶].

روش شناسی

همانگونه که گفته شد یکی از روش های تامین انرژی سیستم های RO استفاده از سیستم فتوولتائیک است که با توجه به موقعیت جغرافیایی نواحی دارای کمبود آب، انتخاب مناسبی است. از این سیستم در طی سال های اخیر در سیستم های RO سایز کوچک به طور عمده استفاده شده است و بررسی های زیادی در این حوزه انجام گرفته است که تلاش برای رسیدن به هزینه واحد و مصرف انرژی ویژه کمتر بوده است. می توان گفت که ارزیابی های صورت گرفته تا حد زیادی منجر به کاهش هزینه ها و مصرف انرژی شده اند. روش های مختلفی برای تامین انرژی سیستم های RO با استفاده از PV وجود دارد معمول ترین روش اتصال سیستم PV با RO، از ماژول های PV، شارژ کنترلر، باتری و اینورتر تشکیل شده است. استفاده از باتری برای ذخیره سازی در این سیستم یکی از روش هاست که معمولا هزینه بیشتری نسبت به باقی روش ها دارد. برای همین طراحی و استفاده از سیستم بدون ذخیره سازی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. همچنین برای کاهش هزینه واحد و مصرف انرژی واحد تلاش برای استفاده از سیستم های بازیابی

¹¹ permeate buffer tank

¹⁰ permeate recovery rate

است. سیستم در نظر گرفته شده شامل ۸۰۰۰ ماژول با توان کلی ۷۲۰ کیلووات و اینورتر با ظرفیت ۶۸۴ کیلووات بود. با بررسی امکان سنجی سیستم زمان بازگشت سرمایه ۲۳/۳ سال و هزینه تولید هم برابر $3/m^3$ \$، ۰،۸۲۵ بدست آمد.

دستگاه‌های بازیابی انرژی^{۱۶} (ERD)

با توجه به نرخ بازیابی پایین و فشار بالای مورد نیاز برای آب ورودی فرآیند RO یک فرآیند بسیار انرژی‌بر است. تلاش عمده در این حوزه بدین صورت است که نرخ بازیابی افزایش پیدا کند و مصرف انرژی ویژه کاهش پیدا کند. به همین منظور دستگاه‌های بازیابی انرژی در سیستم‌های RO به صورت عمده استفاده می‌شوند [۱۹]. این دستگاه‌ها برای کاهش مصرف انرژی در سیستم RO استفاده می‌شوند و از بازیابی انرژی جریان غلیظ خروجی سیستم RO برای کاهش مصرف انرژی استفاده می‌شود. جریان غلیظ خروجی قبل از خارج شدن از سیستم از دستگاه بازیابی انرژی عبور می‌کند و از فشار این جریان برای بازیابی انرژی استفاده می‌شود. در واقع از فشار جریان غلیظ خروجی برای کاهش فشار مورد نیاز برای پمپ‌های ورودی استفاده می‌شود [۲۰] و [۲۱].

برای اولین بار دستگاه بازیابی انرژی در سیستم RO آب دریا استفاده شد که دارای بازده ۷۷ درصد بود اما بازده این سیستم‌ها تا به حال با وجود پیشرفت‌های بسیار در این حوزه افزایش چشمگیری داشته است، به طوری که پمپ‌های جدید دارای بازدهی تا ۹۷ درصد اند. این دستگاه‌ها شامل دو نوع گریز از مرکز^{۱۷} و فشار ثابت^{۱۸} هستند. پمپ‌های گریز از مرکز محدودیت ظرفیت دارند و همچنین بازدهی خیلی بالایی ندارند. توربین‌های پلتون^{۱۵}، فرانسیس^{۱۶} و توربوشارژرها جزو پمپ‌های گریز از مرکز هستند. پمپ‌های فشار ثابت دارای بازده بسیار بالا حدود ۹۸ درصد هستند و محدودیت ظرفیت ندارند مبدل‌های کار^{۱۷} و مبدل‌های فشار^{۱۸} جزو این گروه هستند. پمپ کلارک^{۱۹} (جزو فشار ثابت‌ها)، توربین پلتون، موتور پیستون عمودی و مبدل‌های فشار جزو معمول‌ترین دستگاه‌های بازیابی انرژی هستند [۲۲]. در یک پژوهش در اندونزی سیستم PV-RO آب شور توسط رومرو بررسی شد و او به این نتیجه رسید که برای سیستم‌های سایز کوچک دستگاه بازیابی انرژی باعث افزایش هزینه تولید آب می‌شود [۲۳].

بررسی امکان سنجی اقتصادی برای سیستم RO برای مناطق ساحلی دورافتاده در ابوظبی امارات، در سه حالت مختلف توسط هلال و همکاران [۱۵] انجام شد. آنها سه حالت سیستم PV-RO، سیستم PV-RO در کنار سیستم دیزل و سیستم RO فعال با فقط سیستم دیزل هرکدام با ظرفیت $3/day m^3$ را در نظر گرفتند. در بین این سه حالت سیستم PV-RO بیشترین هزینه اولیه برابر 182777 \$/year را نسبت به بقیه داشت. اما در مورد هزینه عملکرد سالانه کمترین هزینه برای سیستم PV-RO برابر 29938 \$/year بود و برای سیستم PV-RO در کنار سیستم دیزل برابر 32469 \$/year و برای سیستم RO فعال با فقط سیستم دیزل برابر 35309 \$/year بود. همچنین هزینه تولید آب شیرین نیز برای سیستم PV-RO برابر $34/7$ \$/m³ بدست آمد که در مقایسه با سیستم RO فعال با سیستم دیزل که برابر $21/7$ \$/m³ بدست آمد، کاملاً قابل رقابت است.

با استفاده از نرم‌افزار HOMER، جونز و همکاران [۱۶] به طراحی سیستم PV-RO بدون باتری پرداختند و با استفاده از نرم‌افزار متلب به بهینه‌سازی اقتصادی و عملکردی آن پرداختند. آن‌ها سیستم PV-RO بدون باتری را با سیستم RO فعال با دیزل و همچنین سیستم فعال با برق شبکه مقایسه کردند و دریافتند که اقتصادی‌ترین روش استفاده از سیستم با برق شبکه است بعد از آن PV-RO و در نهایت سیستم RO فعال با دیزل [۱۵].

سیلوا و شرقوی [۱۷] سیستم PV-RO سایز کوچک را در منطقه‌ای از برزیل از نظر فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. این سیستم صورت جدا از شبکه و بدون باتری طراحی شد و با استفاده از نرم‌افزار GIS مناطق مناسب برای نصب انتخاب شدند. ظرفیت سیستم 10 m³/day پیش‌بینی شد که این مقدار برای دو روز 250 نفر کافی بود. در نهایت هزینه تولید آب با توجه به منطقه و شرایط $3/m^3$ \$، ۱،۴۴ تا $3/m^3$ \$، ۱/۶۵ بدست آمد.

سیستم PV-RO متصل به شبکه

در این پژوهش الشقیری و همکاران [۱۸] راه‌حلی را مورد بررسی قرار دادند تا مسئله ماهیت تناوبی انرژی خورشیدی را حل کنند. چهار راه‌حل پیشنهاد شدند که شامل استفاده از باتری‌ها، استفاده از مخزن برای آب اضافی به عنوان ذخیره‌سازی، فروش برق اضافی PV به شبکه برق و استفاده از دستگاه RO از شبکه در زمان‌هایی که نور خورشید کم باشد و در نهایت اتصال مستقیم ماژول‌های PV به شبکه برق و اتصال مستقیم سیستم RO به شبکه برق و تغذیه از آن می‌باشد. آن‌ها ظرفیت نیروگاه RO را $3/day m^3$ ۲۰۰ در نظر گرفتند و مصرف انرژی ویژه هم $3/m^3$ kWh ۶/۹۹ پیشنهاد شد. برای بدست آوردن بهترین راه حل چهار روش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بهترین روش از نظر عملکرد و امکان‌سنجی روش چهارم

¹⁶ Francis turbines

¹⁷ work exchangers

¹⁸ rotary pressure exchangers

¹⁹ Clark pump

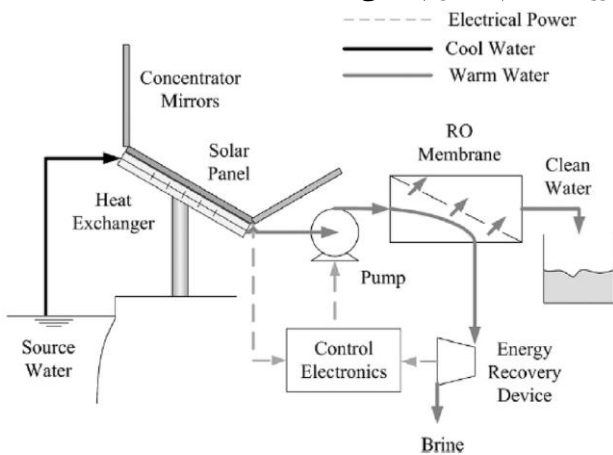
^{۱۲} energy recovery device

¹³ centrifugal

¹⁴ isobaric

¹⁵ Pelton wheels

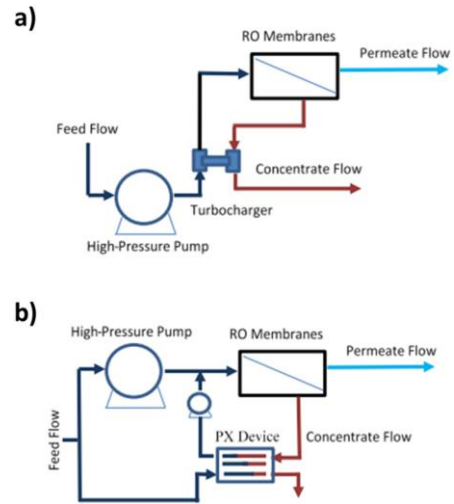
با توجه به بررسی های صورت گرفته، افزایش دما باعث کاهش توان تولیدی ماژول های PV می شود و همان طور که قبلاً گفته شد افزایش دمای آب باعث افزایش شارژ عبور آب از غشا و به طور کلی بهبود عملکرد سیستم RO می شود. پژوهش های زیادی در این زمینه انجام شده اند که برای خنک کردن ماژول های PV، آب ورودی سیستم RO از روی پنل ها عبور داده شود. این حرکت هم باعث خنک شدن پنل ها می شود و هم باعث افزایش دمای آب ورودی. کلی و دوبواسکی از این روش استفاده کردند و با استفاده از آینه های متمرکز کننده به بررسی عملکرد سیستم پرداختند. آن ها متوجه شدند که با این روش، میزان تولید آب ۵۷ درصد افزایش پیدا می کند که بدون استفاده از سیستم خنک کننده ممکن نبود [۲۹ و ۲۸]. در شکل ۳ سیستم مورد استفاده نشان داده شده است و آب ورودی ابتدا از روی ماژول های PV عبور داده شده و گرم می شود، سپس وارد سیستم RO می شود. همچنین با استفاده از متمرکز کننده خورشیدی و دستگاه بازیابی انرژی، مصرف انرژی سیستم کاهش پیدا می کند.



شکل ۳ سیستم PV-RO با استفاده از متمرکز کننده خورشیدی و سیستم خنک کننده [۲۸]

سیستم PV-RO در مقیاس بزرگ

با توجه به طبیعت غیر دائمی انرژی خورشیدی استفاده از این انرژی در مقیاس بزرگ دشوار است و مشکلات زیادی به همراه دارد. لیسائوبی و همکاران [۳۰] برای رفع مشکل تناوبی بودن انرژی خورشیدی در کشور الجزایر دو سناریو در نظر گرفتند. در سناریو اول یک سیستم یکپارچه RO در نظر گرفتند که تولید آن با نوسانات قدرت تغییر می کرد و در سناریو دوم ۱۰ زیر سیستم در نظر گرفتند که با نوسانات خاموش یا روشن می شدند. همچنین با در نظر گرفتن دستگاه های بازیابی انرژی توربین بازیابی ویلز و مبدل فشار هم، این سیستم ها را با هم مقایسه کردند. ظرفیت نظر گرفته شده برای این سیستم برابر $15000 \text{ m}^3/\text{day}$ بود. نتایج حاکی از آن بودند که هم از نظر تولید آب شیرین و هم از نظر هزینه های سناریوی اول برتری داشت. همچنین استفاده از دستگاه های بازیابی انرژی نیز باعث کاهش هزینه تولید شدند. کمترین هزینه برای مبدل فشار است که برابر $1/32 \text{ \$/m}^3$ است.



شکل ۲ دیگرام جریان برای دو سیستم آب شیرین کن با دو سیستم بازیابی انرژی (ا) توربو شارژر و (ب) مبدل فشار [۲۴]

در شکل ۲، دو سیستم آب شیرین کن با دستگاه بازیابی انرژی توربو شارژر و مبدل فشار نشان داده شده اند. در قسمت اول سیستم توربو شارژر نشان داده شده است و در آن به وسیله روتور، انرژی آب شور خروجی به شاخه اصلی آب ورودی منتقل می شود. در قسمت دوم سیستم مبدل فشار نشان داده شده است و در آن آب خروجی با فشار بالا در جوار شاخه ای از آب ورودی قرار می گیرد و انرژی بین آن ها با زدهی بالا منتقل می شود [۲۴].

تامسون و اینفیلد [۲۵] به وسیله نرم افزار متلب سیستم PV-RO را طراحی کردند که ظرفیت در نظر گرفته شده برای آن برابر ۳ مترمکعب در روز بود. توان سیستم PV برابر ۲,۴ kw با سیستم دنبال کننده یک محوره در نظر گرفته شد. همچنین برای کاهش مصرف انرژی از پمپ کلارک به عنوان دستگاه بازیابی انرژی استفاده شد. آن ها بررسی هزینه ای چرخه حیات و طول عمر ۲۰ ساله پروژه را انجام دادند. بر اساس فرضیات، پمپ ها و غشای RO هر کدام طول عمر ۵ و ۱ ساله داشتند و به نوبت باید تعویض می شدند. در نهایت هزینه تولید آب شیرین $2,8 \text{ \$/m}^3$ بدست آمد. با توجه به نتایج [۲۶] پمپ کلارک باعث بدست آمدن مصرف انرژی ویژه برابر $3/5 \text{ kWh/m}^3$ را دارد.

سیستم PV-RO بدون باتری مستقیماً متصل به موتور DC

استفاده از سیستم های PV به همراه آینه های متمرکز کننده خورشیدی توسط ویاس و همکاران [۲۷] آزمایش شد. آن ها سیستم RO ای را طراحی کردند که به صورت مستقیم بدون اینورتر به موتور DC متصل می شد. برای مشخص شدن اثر سیستم های متمرکز کننده خورشیدی از ۳۲ ماژول PV استفاده کردند که ۱۶ ماژول بدون متمرکز کننده استفاده شد. همچنین در این سیستم برای بازیابی انرژی از توربین تورگو استفاده شد. آن ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از متمرکز کننده های خورشیدی و توربین تورگو می تواند ۶۵ درصد انرژی الکتریکی مورد نیاز را کاهش دهد.

سیستم PV-RO با سیستم خنک کننده

کتانی و بندلر [31] نیروگاه RO را در مقیاس بزرگ در صحرای مراکش از نظر اقتصادی بررسی کردند. ظرفیت در نظر گرفته شده برای سیستم $275000 \text{ m}^3/\text{day}$ بود. آن‌ها سه سیستم PV اتصال به شبکه، فقط سیستم اتصال به شبکه و سیستم PV همراه اتصال شبکه و ذخیره‌سازی را با هم مقایسه کردند. کمترین هزینه مربوط به سیستم PV به همراه برق شبکه بود که برابر $0.98 \text{ \$/m}^3$ بود. بیش‌ترین نیز برای سیستم PV به همراه برق شبکه و ذخیره‌سازی بود که برابر $1.14 \text{ \$/m}^3$ بود.

نتایج

به منظور بررسی بهتر در جدول ۱ خلاصه نتایج تمام سیستم‌های بررسی شده در این مقاله آورده شده است

جدول ۱ مشخصات سیستم‌های PV-RO بررسی شده

| نام نویسنده | مکان مورد بررسی | نوع بررسی | ذخیره انرژی | بازیابی انرژی | توضیحات | ظرفیت (m^3/day) | مصرف انرژی واحد (kWh/m^3) | هزینه تولید ($\text{\$/m}^3$) |
|----------------------------|-----------------------------|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|
| هارولد و نسکاکیس [12] | جزیره گران کاناریا، اسپانیا | تجربی | باتری | ندارد | همراه با پیش تصفیه آب ورودی | ۰.۸-۳ | ۱۵-۱۶.۳ | ذکر نشده |
| الغول و همکاران [13] | ذکر نشده | تئوری | باتری | ندارد | همراه با پیش تصفیه آب ورودی | ۵.۱ | ۱.۱ | ذکر نشده |
| کوماراسامی و همکاران [14] | ذکر نشده | تئوری | مخزن تنظیم نفوذی | ندارد | بررسی تاثیر استفاده از پمپ فشار متغیر یا ثابت | ۲.۴-۶ | ذکر نشده | ذکر نشده |
| هلال و همکاران [15] | ابوظبی، امارات | تئوری | بدون باتری | ندارد | مقایسه سیستم PV-RO با سیستم دیزل و برتری سیستم اول | ۲۰ | ۷.۳۳ | ۷.۳۴ |
| جونز و همکاران [16] | ذکر نشده | تئوری | ندارد | ندارد | سیستم PV-RO | ۱۳-۶۳ | ۶.۹-۱۰.۵ | ۰.۷-۱.۵۵ |
| سیلوا و شرقوی [17] | برزیل | تئوری | ندارد | ندارد | سیستم PV-RO | ۱۰ | ذکر نشده | ۱.۴۴-۱.۶۵ |
| الشقری و همکاران [18] | موسسه مصدر، ابوظبی، امارات | تئوری | ندارد | ندارد | PV به شبکه متصل شده و آب شیرین کن از طریق شبکه برق تغذیه می شود | ۲۰۰ | ۶.۹۹ | ۰.۸۲۵ |
| تامسون و اینفیلد [25] [26] | ذکر نشده | تئوری | ندارد | پمپ کلارک | سیستم PV-RO با استفاده از دنبال کننده های خورشیدی تک محوره | ۳ | ۳.۵ | ۲.۸ |
| ویاس و همکاران [27] | ذکر نشده | تجربی | ندارد | توربین تورگو | سیستم PV-RO با استفاده از متمرکزکننده های V شکل و بازیابی انرژی | ذکر نشده | ۶۵ درصد کم تر از حالت بدون موارد ذکر شده | ذکر نشده |
| کلی و دوبواسکی [28] | آمریکا | تجربی | ندارد | میدل فشار دو پیستونی | سیستم PV-RO با استفاده از متمرکزکننده های V شکل و خنک کننده پنل با جریان ورودی | ۰.۳-۰.۴۵ | ذکر نشده | ذکر نشده |
| لیسائویی و همکاران [30] | الجزایر | تئوری | ندارد | میدل فشار | مقایسه دو سیستم PV-RO تولید متغیر و ۱۰ زیر سیستم و برتری هزینه سناریو اول | ۱۵۰۰۰ | ذکر نشده | ۱.۳۲ |
| کتانی و بندلر [31] | مراکش | تئوری | بدون باتری با باتری | ندارد | سیستم PV-RO همراه با شبکه و سیستم PV-RO همراه با شبکه و ذخیره سازی | ۲۷۵۰۰۰ | ذکر نشده | ۰.۹۸ ۱.۱۴ |

نتیجه گیری و جمع بندی

کمبود منابع آب شیرین در بسیاری از نواحی دنیا باعث افزایش علاقه برای استفاده از سیستم های آب شیرین کن شده است. روش های زیادی برای تبدیل آب شور به شیرین وجود دارند که از معمول ترین آن ها می توان سیستم اسمز معکوس را نام برد، که در بیشتر سیستم های آب شیرین کن استفاده می شود. با توجه به نگرانی های زیست محیطی که در دنیا وجود دارد، استفاده از انرژی های تجدیدپذیر رواج بیشتری یافته است. همچنین به دلیل وجود بیشتر کمبود آب در مناطق بیابانی و صحرایی انرژی خورشیدی مخصوصاً PV منبع بسیار مناسبی برای استفاده در آب شیرین کن های اسمز معکوس است. از چالش های بزرگ سیستم PV-RO، می توان هزینه بالا و مصرف انرژی زیاد را نام برد. در این مقاله به ابتدا به بررسی فرآیند اسمز معکوس و عوامل تاثیرگذار روی آن پرداخته شد. در ادامه هم مروری بر روی پژوهش های انجام شده و روند کاهش هزینه و انرژی مصرفی این سیستم انجام شد:

- پژوهش های انجام شده در حوزه سیستم PV-RO همراه با باتری و بدون باتری مرور شدند.
- مروری بر کارهای انجام شده در حوزه استفاده از دستگاه های بازیابی انرژی در سیستم PV-RO و مشاهده تاثیر آن انجام شد.
- استفاده از روش های نوین برای بالا بردن بازدهی سیستم مورد بررسی قرار گرفت.
- و در نهایت مروری بر پژوهش های انجام شده در مقیاس بزرگ سیستم های PV-RO و بررسی چالش های آن ها انجام شد.

راه حل های مناسب پیدا شوند و زمینه را برای ساخت نیروگاه های بزرگ در این حوزه فراهم کنند.

- همچنین استفاده از ذخیره سازی مانند باتری در مقیاس های بالا در سیستم PV-RO دارای چالش های بیشتری است و بررسی های زیادی در این حوزه انجام نگرفته است.
- بیش تر سیستم های آب شیرین کن در مناطق صحرایی و بیابانی با دمای بالا مورد نیاز هستند که معضل دما به شدت می تواند بر روی بازده سیستم PV تاثیر منفی بگذارد، که این موضوع با استفاده از خنک کننده ماژول های PV به وسیله آب ورودی آب شیرین کن تا حد زیادی حل شد و حتی باعث افزایش بازدهی تولید با گرم تر شدن آب ورودی می شود.

با توجه به اینکه در کشورمان ایران مناطقی مانند سمنان و قم وجود دارند که دارای مشکل کمبود آب شیرین هستند، و بیش تر این مناطق، مناطق بیابانی هستند، می توان گفت که استفاده از سیستم PV-RO می تواند گزینه بسیار مناسبی برای این مناطق باشد. حتی می توان مشکل دمای بالا را با استفاده از خنک کننده ماژول های PV حل کرد. البته هنوز معضل هزینه بالا می تواند یک عامل بازدارنده باشد به طوری که منتقل کردن آب شیرین از مناطق دور به صرفه تر باشد. این بررسی ها می تواند در کشورمان انجام بگیرد و با بهینه سازی سیستم PV-RO، هزینه بصره برای این سیستم بدست آید و باعث نصب و استفاده از سیستم های PV-RO و حل معضل آب شیرین در مناطقی از کشورمان شود.

مراجع

- [1] Mahmoud Shatat, Saffa Riffat, Said Ghabayen, "STATE OF ART WATER DESALINATION TECHNOLOGIES USING CONVENTIONAL AND SUSTAINABLE ENERGY SOURCES," in *The 4th International Engineering Conference -Towards engineering of 21st century*, 2012.
- [2] Manoj Chandra Garga, Himanshu Joshi, "A Review on PV-RO Process: Solution to Drinking Water Scarcity due to High Salinity in Non-Electrified Rural Areas," *Taylor & Francis*, 2014.
- [3] Abdelkareem MA, El Haj Assad M, Sayed ET, Soudan B, "Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants," *Desalination*, 2018.
- [4] Burn S, Hoang M, Zarzo D, Olewniak F, Campos E, Bolto B, Barron O, "desalination technologies—a review of the opportunities for desalination in agriculture," *Desalination*, 2015.
- [5] S. Shalaby, "Reverse osmosis desalination powered by photovoltaic and solar Rankine cycle power systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.

در نهایت به عنوان جمع بندی می توان گفت که:

- پژوهش های صورت گرفته در این حوزه در حال حرکت به سمت استفاده از روش های نوین برای کاهش هزینه ها و مصرف انرژی سیستم PV-RO است و این موضوع می تواند باعث رواج بیشتر استفاده از سیستم های آب شیرین کن و جبران کمبود آب موجود باشد.
- بررسی های انجام شده در مقالاتی که مرور شد بیش تر بررسی های تئوری بودند و در دنیای واقعی بررسی های زیادی به صورت تجربی انجام نشده است و می توان گفت که ممکن است نتایج واقعی خیلی مطابق با نتایج تئوری نباشند و بدین صورت به اندازهی مورد نیاز قابل اتکا نباشند.
- بیش تر بررسی های انجام شده در مقیاس کوچک بودند و با توجه به اینکه این سیستم در مقیاس بالا دارای چالش های بیشتری است، بررسی بیشتری مورد نیاز است تا



- [20] V. Gude, "Energy Consumption and Recovery in Reverse Osmosis," *Desalination and water treatment*, 2011.
- [21] Randy Ncube and Professor Freddie L. Inambao, "SEA WATER REVERSE OSMOSIS DESALINATION: ENERGY AND ECONOMIC ANALYSIS," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2019.
- [22] J. Rheinländer, D. Geyer, "Photovoltaic reverse osmosis and electrodialysis, in: G. Micale, L. Rizzuti, A. Cipollina (Eds.)," *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes*, 2009.
- [23] R. Romero, "A PV Powered BWRO Desalination Installation with Energy Recovery and Hydro-pneumatic Energy Storage," 2013.
- [24] M.A. Jones, "Systems Modeling and Economic Analysis of Photovoltaic (PV) Powered Water Pumping Brackish Water Desalination for Agriculture," 2015.
- [25] Thomson M, Infield D, "A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries," *Desalination*, 2002.
- [26] Thomson M, Miranda MS, Infield D, "A small-scale sea water reverse osmosis system with excellent energy efficiency over a wide operation range," *Desalination*, 2002.
- [27] Vyas H, Suthar K, Chauhan M, Jani R, Bapat P, Patel P, Markam B, Maiti S, "modus operandi for maximizing energy efficiency and increasing operate flux of community scale solar powered reverse osmosis systems," *Energy Convers Manag*, 2015.
- [28] Kelley LC, Dubowsky S, "Thermal control to maximize photovoltaic powered reverse osmosis desalination systems productivity," *Desalination*, 2013.
- [29] Mohamed T. Mito, Xianghong Ma, Hanan Albuflasa, Philip A. Davies, "Reverse osmosis (RO) membrane desalination driven by wind and solar photovoltaic (PV) energy: State of the art and challenges for large-scale implementation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019.
- [30] Mohammed Laissaoui, Patricia Palenzuela, Mohamed A. Sharaf Eldean, Driss Nehari, Diego-César Alarcón-Padilla, "Techno-economic analysis of a stand-alone solar desalination plant at variable load conditions," *Applied Thermal Engineering*, 2018.
- [31] Maryème Kettani, Philippe Bandelier, "Techno-economic assessment of solar energy coupling with large-scale desalination plant: The case of Morocco," *Desalination*, 2020.
- [6] N. Voutchkov, "Introduction to Reverse Osmosis Desalination," SunCam online continuing education course, 2010.
- [7] Jochen Bundschuh, Michał Kaczmarczyk, Noredine Ghaffour, Barbara Tomaszewska, "State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects," *Desalination*, 2021.
- [8] Farah Ejaz Ahmed, Raed Hashaikheh, Nidal Hilal, "Solar powered desalination – Technology, energy and future outlook," *Desalination*, 2019.
- [9] R. Dashtpour, S.N. Al-Zubaidy, "Energy efficient reverse osmosis desalination process," *Int. J. Environ. Sci. Dev*, 2012.
- [10] M. Elimelech, W.A. Phillip, "The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment," *Science*, 2011.
- [11] A.S. Stillwell, M.E. Webber, "Predicting the specific energy consumption of reverse osmosis desalination," *Water*, 2016.
- [12] Herold D, Neskakis A, "a small PV-driven reverse osmosis desalination plant on the island of Gran Canaria," *Desalination*, 2001.
- [13] Alghoul MA, Poovanaesvaran P, Mohammed MH, Fadhil AM, Muftah AF, Alkilani MM, Sopian K, "Design and experimental performance of brackish water reverse osmosis desalination unit powered by 2 kW photovoltaic system," *Renew Energy*, 2016.
- [14] Kumarasamy S, Narasimhan S, Narasimhan S, "Optimal operation of battery-less solar powered reverse osmosis plant for desalination," *Desalination*, 2015.
- [15] Helal AM, Al-Malek SA, Al-Katheeri ES, "Economic feasibility of alternative designs of a PV-RO desalination unit for remote areas in the United Arab Emirates," *Desalination*, 2008.
- [16] Jones MA, Odeh I, Haddad M, Mohammed AH, Quinn JC, "Economic analysis of photovoltaic (PV) powered water pumping and desalination without energy storage for agriculture," *Desalination*, 2016.
- [17] Gardenio Diogo Pimentel da Silva, Mostafa H. Sharqawy, "Techno-economic Analysis of Low Impact Solar Brackish Water Desalination System in the Brazilian Semiarid Region," *Journal of Cleaner Production*, 2019.
- [18] Alsheghri A, Sharief SA, Rabbani S, Aitzhan NZ, "Design and cost analysis of a solar photovoltaic powered reverse osmosis plant for Masdar institute," *Energy Procedia*, 2015.
- [19] Al-Karaghoul, A. and Kazmerski, L, "Economic and Technical Analysis of a Reverse-Osmosis Water Desalination Plant Using Deep-3. 2 Software," *Journal of Environmental Science and Engineering A*, 2012.

ACEC2021-89165

پارامترهای مدل سیاست انرژی ایران در الگوریتم ماشین دینامیکی انرژی-اقتصادی

محمود رودبارکی^۱، محمد صادق ولی پور^۲، امیر حسین فاکهی خراسانی^۳

^۱دانشگاه سمنان؛ rodbaraki@semnan.ac.ir

^۲دانشگاه سمنان؛ msvalipour@semnan.ac.ir

^۳موسسه مطالعات بین المللی انرژی؛ fakehi@yahoo.com

چکیده

مسئله اصلی در این تحقیق بررسی ظرفیت های تحمل (سیستم)^۱ فاکتور های اصلی مدل اقتصاد-انرژی^۲ مرجع به کمک تحلیل حساسیت کل مدل دینامیکی برای تعیین پارامترهای کلیدی پایداری سیستم است که اهمیت بسیار زیادی برای تصمیم سازان عرضه اقتصاد و انرژی کشور دارد.

روش حل مسئله استفاده از الگوریتمی است که با اجزای ماشینی مسئله را در طی زمان حل می کند. این اجزاء ماشینی شامل مکانیزم گزاره کاوی، تحلیل الگوهای پرتکرار، پیش بینی سری زمانی بوسیله مدل های آریمایی و در نهایت بلوک های تحلیل دینامیک معادلات آریمایی در نرم افزار تحلیل سیستم های دینامیک است. استخراج حد نهایی ظرفیت های سیستمی مدل سیاست-انرژی شامل شاخص های کیفیت صادرات، سرمایه گذاری مستقیم خارجی، پیچیدگی تکنولوژی محصولات داخلی، تنوع محصولات صادراتی، میزان اطمینان از درآمد نفت بر حسب درصد تولید ناخالص داخلی، سطح مبادلات تجاری بر حسب درآمد ناخالص ملی، ریسک تنش های منطقه ای و شاخص آزادی اقتصاد در افق منتهی به سال ۲۰۷۰ محاسبه و ارائه شده است.

واژه های کلیدی: ظرفیت دینامیکی سیستم، مدل اقتصاد-انرژی، داده کاوی، سیاست انرژی

مقدمه

ایران کشوری است با اقتصاد وابسته به نفت و گاز و مشتقات آنها برای کسب درآمد و تامین منابع ارزی، که در دوره های مختلف

زمانی، با چالشهایی مواجه بوده است که این بحرانها آثاری بر قیمت نفت دنیا داشته است. بعد از انقلاب و جنگ و طی دولتهای سازندگی، مسئله تحریمها اتحادیه اروپا و آمریکا بیشترین تاثیر را بر درآمد حاصل از صادرات ایران که بخش اعظم آن مربوط به نفت و مشتقات آن بوده است، داشته است [۱]. همچنین بدلیل مجاورت با ۱۵ کشور همسایه و قرار گرفتن در مرکز اقتصادی اجتماعی خاورمیانه با جمعیتی بالغ بر ۶۰۰ میلیون نفر و نیز قرار گرفتن بر تنگه هرمز بعنوان یکی از مهمترین نقاط استراتژیک جهان [۲] و همچنین قرار گرفتن در میانه جاده ابریشم، با گستردگی پهنه چین تا اروپا پتانسیل قابل تأملی برای گسترش تعاملات اقتصادی - انرژی در دهه های گذشته و آتی دارد [۲].

از آنجایی که مشکلات امروز ما اغلب عواقب ناخواسته^۳ راه حل های دیروز ما هستند [۲۳]. طراحی سیستمهای تصمیم سازی در پاسخ به پویایی سیستمهای پیچیده بمنظور بهبود پایدار در مواجهه با چالشهایی بزرگ، در افق زمانی طولانی (منشا اصلی عدم قطعیت) و ظرفیتهای سیستمی (منشا تالی عدم قطعیت) قابل حل و برنامه ریزی است [۳].

بنابراین برای هدف گذاری در برنامه ریزی در افق بلند مدت نیازمند توسعه مدل های پیش بینی تصمیم ساز، در حوزه اقتصاد و انرژی است که این اهداف را در بر گیرد؛ الف) تضمین امنیت عرضه انرژی با هدف پایداری سیستم عرضه انرژی کند ب) افزایش بهره وری انرژی با هدف استفاده بهینه از ظرفیتهای موجود داشته باشد ج) حفظ شرایط موجود محیط زیست را محقق نماید [۴].

ما از علم سایبرنتیک به سراغ الگو برداری از سیستمهای توصیه گر رفته ایم چرا که ظهور و تثبیت مراکز داده تحقیقاتی و پژوهشی

^۳ Side effect

^۱ Carrying Capacity of System

^۲ Energy-Economy Model

سیستم توصیه گر، رفتار کاربران را در یک پلتفرم تغییر می دهد، در حالی که همان طور که گفته شد در این سیستم، رفتار کاربران، توصیه های سیستم را به صورت بازگشتی تغییر می دهد. سیاست انرژی زیرمجموعه ای از سیاست اقتصادی، سیاست خارجی و سیاست امنیت ملی و بین المللی است و به طور سنتی، سیاست انرژی به دنبال امنیت عرضه، مقرون به صرفه بودن و تأثیر محدود و کنترل شده بر محیط زیست بوده است [۱۴].

ما در روش اکتشافی این پژوهش ضمن بکارگیری روش الگوریتمی تصمیم گیری، ظرفیت های حدی سیستم سیاست انرژی ایران را ارائه نمودیم که پر واضح است که برای برنامه ریزی انرژی کشور چه اهمیت فراوانی می تواند داشته باشد. روش بکار گرفته شده خاص این پژوهش است چرا که تفاوت رویکرد این تحقیق با روش متداول مدلسازی سیستم دینامیک در رفع مانع پیچیدگی دنیای واقعی در مرحله یادگیری است. در مرحله یادگیری از دنیای واقعی در روش سیستم دینامیک متداول از روش جهان کوچک برای بهبود فرایند یادگیری استفاده می شود. ولی در الگوریتم ماشین دینامیکی انرژی - اقتصادی این تحقیق هم در پارادایم تفکر سیستم های نرم یا همان پارادایم یادگیری از الگوریتم یادگیری ماشین مبتنی بر داده کاوی الگوهای ترتیبی استفاده می شود و هم در پارادایم تفکر سیستم های سخت یا همان پارادایم بهینه سازی در این تحقیق از بازخورد روش جهان کوچک در الگوریتم ماشین دینامیکی انرژی - اقتصادی با رفتار متغیرهای پیش بینی شده در نرم افزار استلا و امکان تطبیق اون با تکنیکهای آریمای سریهای زمانی پایتون به منظور پیاده سازی و اجرای مجدد مدل مورد هدف بهینه است که به این ترتیب آینده مورد هدف را برنامه ریزی زنده می کنیم [۲۴].

سیاست انرژی^۹ در مدل EPNTSU^{۱۰}

بعنوان یکی از قدیمی ترین مدل های موفق پیاده سازی شده از برنامه حساس به نام اثربخشی هزینه ای سیاست های انرژی ایالات متحده برای کاهش گرمایش جهانی استفاده شده است [۱۵].

الگوریتم ماشین دینامیکی با جمع آوری گزاره های صحیح از منابع تعیین شده شروع به کار می کند. گزاره ها در نرم افزار ونسیم^{۱۱} تبدیل به حلقه های علت و معلولی مدل اولیه می گردد. مدل اولیه مدلی است که بر اساس گزاره های استخراج شده از منتخبین بصورت گراف نمایش علت و معلول های مطرح در سطح موضوع قابل نمایش است. استخراج مدل اولیه ابتدای روش جدید بکار گرفته شده در این تحقیق برای رسیدن به مدل دینامیکی نهایی

همراه با گسترش قابلیت های سخت افزاری و نرم افزاری، اکوسیستم های جدید فناوری تحلیل اقتصادی - اجتماعی ایجاد کرده است که بر اساس موضوع، افراد و گروه های متخصصین امر در آن مشارکت دارند. چرا که توسعه مداوم سرویس های ارتباطی و برنامه های کاربردی هوشمند که به طور مداوم با عامل انسانی در تعامل هستند، ماشین های تحلیلی پیرامون موضوعات خاص ایجاد می کنند [۱۵].

هدف یک سیستم توصیه گر این است که، رفتار کاربران را در یک پلتفرم تغییر می دهد، در حالی که رفتار کاربران توصیه های سیستم را به صورت بازگشتی تغییر می دهد. به عبارتی یک بازیگر تجاری یا سیاسی فی نفسه یک سیستم تصمیم گیری الگوریتمی (ADM) را مستقر می کند تا تصمیمات آنها تحت تأثیر نتایج مدل قرار گیرد. فرآیندهای تأثیرگذار بر ماشینهای اجتماعی دائماً ظاهر می شوند و در مورد شرکت کنندگان مختلف می توانند انواع مختلفی داشته باشند [۱۰].

از دهه ی ۱۹۹۰ که توجه اقتصاددانان، به سوی توسعه ی پایدار کشیده شده، با رشد فزاینده ی تقاضای انرژی از جانب همه ی کشورها، انرژی، نقش مهم و مهمتری در اقتصاد جهانی بازی کرده است. تمرکز، از توجه انتزاعی به مسأله ی انرژی، به سمت زمینه های مهم بسیاری معطوف شده است. به علاوه، در این دوران، مدل های انرژی، مدل های انرژی - اقتصاد - محیط زیست بوده اند، مانند : مدل CGE^۴، مدل 3Es-Model^۵، مدل MESSAGE^۶ و مدل های انرژی مرکب مانند، NEMS^۷ و IASA-WEC E3^۸ ساخته و پرداخته شده است بطوریکه تا کنون مدل های انرژی زیادی در سرتاسر جهان با کمک روش های مختلف ایجاد شده است. اما اکثر این مدل ها توانایی نشان دادن اثرات همزمان بخش های مختلف یک سیستم پیچیده و بزرگ را بر روی یکدیگر ندارند. این مدل ها همچنین در به تصویر کشیدن مسیر تعادلی، دچار ضعف و کمبود هستند. اما دینامیک سیستم می تواند به عنوان یک روش مدلسازی مرکب به کار رود؛ به گونه ای که این زیرسیستمها را یکپارچه نموده و تعاملات میان تمام زیرسیستمها را به طور همزمان به نمایش بگذارد [۱۸].

تجزیه و تحلیل پویا حلقه های بازخورد، به تشخیص ویژگی های ظاهر شده سیستم های مورد مطالعه کمک می کند. این علیت آنی به سیکل تبدیل می شود که هویت نوظهور سیستم را مشخص می کند [۱۶]. این هویت (مشخصه) با قاعده های مرتبط، مسیرهای ثابت رفتارهای ویژه سیستم یا تعادل هایی موجود در سیستم، را که رفتار سیستم نامیده می شوند ایجاد می کند [۱۷] از طرفی یک

^۸ The IASA-WEC Energy Economic Environment

^۹ Energy Policy Section

^{۱۰} Energy Policy's Model, Campus of New Technologies, Semnan University

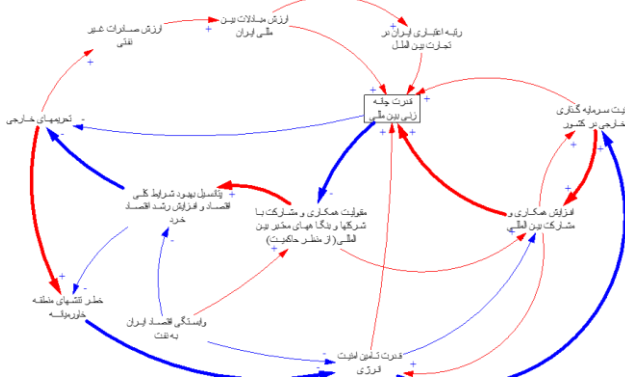
^{۱۱} Vensim PLE V 7.3.5

^۴ Computational General Equilibrium Model

^۵ Energy-Environment-Economy Model

^۶ A modeling framework for medium- to long-term energy system planning, energy policy analysis, and scenario development

^۷ The National Energy modeling Systems



شکل ۱. گراف اولیه علت و معلولی زیربخش سیاست انرژی در EPNTSU سپس خروجی گزارشی حلقه های علت و معلولی در نرم افزار ونسیم بصورت فایل متنی با مشخصه، ردیف، عنوان، طول حلقه در نرم افزار پایتون^{۱۵} تفکیک که بالغ بر ۶۵۳۷۱۷ رکورد می باشد، برای تحلیل یافتن زیردنباله های پرتکرار^{۱۶} به الگوریتم دنباله کاوی تحویل داده می شود. پس از این مرحله و کشف الگوهای بسته ای که هیچ سوپر الگویی با تکرار یکسان در آن یافت نشود، به سراغ ساخت مدل بهینه دینامیک در استلا می رویم.

برای این کار خروجی تحلیل دنباله ای، بر اساس معیارهای درصد پشتیبانی^{۱۷} و ضریب اطمینان^{۱۸} رتبه بندی شده و بر اساس استراتژی اجرا بهترین دنباله های منتخب، متمایز می گردد. پس از انتخاب دنباله های برگزیده، متغیرهای اساسی ترجیحاً، بی بعد بر اساس الگوریتم انتخاب بهترین گره شروع، در دستگاه معادلات دینامیک خاص این پژوهش، رتبه بندی می گردند. شاخص های برگزیده بر اساس دیتا بیس سالهای گذشته از مراجع بین المللی و دولتی استخراج شده و مورد تحلیل سری زمانی بکمک پکیج های زبان برنامه نویسی پایتون در رابط کاربردی ژوپیتتر^{۱۹} قرار می گیرد. در اینجا ما از پکیج اتو-آریمای^{۲۰} از طیف پی-ام-دی آریمای^{۲۱} استفاده می کنیم.

پس از تحلیل سری زمانی شاخص های برگزیده به سراغ پیاده سازی بلوکهای شبیه سازی دینامیکی^{۲۲} در استلا می رویم. حل ریاضی و تبدیل معادلات بصورت دستی انجام شده تا با بیشترین دقت بلوکهای شبیه سازی در کنار هم قرار گیرند که نهایتاً به ۳ تیپ بلوک استلا سراسری رسیدیم. برای حل دینامیکی یک پارچه ابتدا از حل استاتیکی بلوکهای شاخصهای برگزیده بصورت هر بلوک زیر شبکه جداگانه، اصلاحات فنی معادلات دیفرانسیلی، انجام شده و مدل برای اجرای یکپارچه بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی کنار هم

است که به نوعی همانند پیدا کردن نقطه اولیه در اجرای برنامه ریزی خطی است.

PEEMI مدل توسعه یافته مدل مشابهی برای شبیه سازی سیستم اقتصاد-انرژی ایران است. بخش عرضه انرژی به اکتشاف و تولید منابع انرژی (در مدل PEEMI منابع تامین انرژی نفت و گاز است)، بخش تقاضای انرژی، سرمایه گذاری انرژی، فن آوری انرژی و تجارت انرژی تفکیک شده است. از آنجایی که مدل مشابهی، اکثر متغیرهای اصلی اقتصاد کلان ایران را در خود جای داده است لذا مدل PEEMI یک مدل الحاقی است که تعاملات میان بخش انرژی با سایر بخش های دیگر اقتصاد به مدل اولیه را بررسی می کند [۱۸]. همانگونه که در فوق اشاره شده مدل PEEMI دارای هشت بخش است. ما در اینجا برای توسعه مدل فوق یکبار این مدل را برای تحلیل حلقه ها در نرم افزار ونسیم و برای پیاده سازی عددی و اجرا در نرم افزار استلا^{۱۲} مدل سازی نموده ایم.

ابتدا بر اساس مرور بر ادبیات موضوع و گزاره های بدیهی یک ساختار علت و معلولی اولیه مطابق شکل ۱ که حداکثر طول حلقه های آن ۷ گره شبکه ای باشد می سازیم. همان گونه که در فوق اشاره شد این کار شبیه تولید جواب اولیه برای الگوریتم های تکرار شوند است. سپس برای استخراج گزاره های توسعه اولیه، از مدل قبلی PEEMI و مدل مشابهی و مراجع شماره های [۶-۷-۸]، [۹-۱۰-۱۱-۱۲] و [۱۹-۲۰-۲۱]، بصورت گزاره های زنجیره ای بسته/ بازگشتی یا همان حلقه های علت و معلولی به الگوی شکل ۱ اضافه می کنیم، (در واقع تعمیم فضای مسئله انجام می دهیم) عبارتی کلیه خطوط زنجیره علت و معلولی بصورت پژوهش محور (حضور نخبه برای استخراج) به الگوی اولیه اضافه می گردد، که به نوبه خود در تحقیقات آتی می تواند با استخراج مبتنی بر هوش، مصنوعی متن کاوی^{۱۳} جایگزین روش بکار رفته در این بخش از پژوهش گردد تا بتوان ماشین مجازی ایجاد کرد. در ادامه با بهره گیری از مرور ادبیات موضوع فوق به توسعه گزاره های معتبر بر اساس مقالات و گزارشات مرجع، پرداخته و مدل بزرگ گزاره مبنای^{۱۴} را (که برای تهیه مدل گزاره مبنای می توان از متن کاوی سایتهای علمی تخصصی نیز استفاده نمود) تهیه و تدوین می نمایم. توجه داشته باشید، هر گزاره بصورت جمله شرطی اگر P آنگاه Q و بصورت یک گزاره تک یال وارد مدل بزرگ شده و ارتباط معنایی اثرات مثبت و منفی، در این مرحله از ورود اطلاعات به نرم افزار ونسیم درج نمی گردد.

^{۱۸} Coefficient of Confidence

^{۱۹} Jupyter Notebook 6.1.4

^{۲۰} AutoArima

^{۲۱} pmdarima

^{۲۲} Simulation Block

^{۱۲} Stella Architect Version 1.5.2

^{۱۳} Text Mining

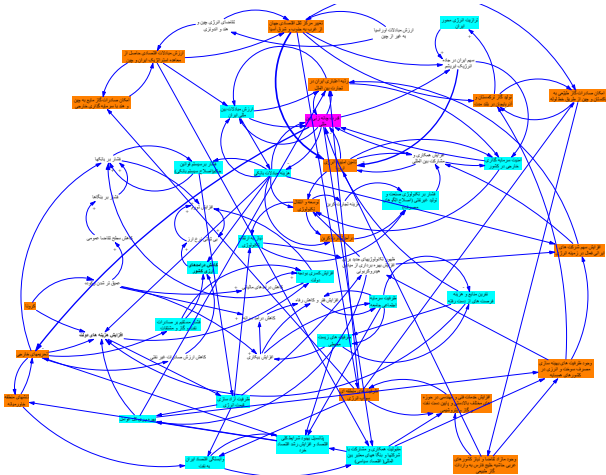
^{۱۴} Statements based

^{۱۵} Python 3.8.5

^{۱۶} Sequential Pattern Mining

^{۱۷} Percent of Support Rule

هر یک از آرگومانهای گزاره شرطی بصورت یک گره به مدل اولیه اضافه شده و بدینصورت یالهای ارتباطی برقرار می گردند. جهت یالهای به منظور بیان رابطه علت و معلولی بر اساس درخت علیت هر گره مادر و تجربه مدلسازی و اثر پیش رونده متغیرهای یک زنجیره اعمال می گردد. این مدل بزرگ در نرم افزار ونسیم بصورت شکل ۲ برای ادامه کار ترسیم شده است.



شکل ۲. گراف مدل بزرگ علت و معلولی زیربخش سیاست انرژی

استخراج الگوهای توالی^{۳۰} از حلقه های BIG MODEL

مدل های انجمنی^{۳۱} الگوهایی را در داده های ورودی به فرایند های شما، پیدا می کنند که در آن یک یا چند نهاده^{۳۲} (مانند رویدادها، تصمیمات یا ویژگی ها) با یک یا چند نهاد دیگر مرتبط هستند. مدل ها، مجموعه قوانین را ایجاد می کنند که این روابط را تعریف می کنند. در اینجا فیلدهای درون داده می توانند هم به عنوان ورودی و هم به عنوان هدف عمل کنند. شما می توانید این ارتباطات را به صورت دستی پیدا کنید، اما الگوریتم های قوانین انجمنی^{۳۳} بسیار سریعتر این کار را انجام می دهند و می توانند الگوهای پیچیده تری را کشف کنند. مدل های آپریوری^{۳۴} و کارما^{۳۵} نمونه هایی از استفاده از چنین الگوریتم هایی هستند. یکی دیگر از انواع مدل ارتباط، مدل تشخیص توالی^{۳۶} است که الگوهای متوالی^{۳۷} را در داده های ساختار یافته زمانی پیدا می کند.

مزیت الگوریتم های قانون انجمنی نسبت به الگوریتم های درخت تصمیم گیری^{۳۸} استانداردتر (C5.0 و C&RT) این است که بین هر یک از ویژگی ها^{۳۹} می تواند ارتباط وجود داشت. یک الگوریتم

قرار می گیرد. برای اصلاحات نرخ تغییر متغیرهای اصلی از منطق تحلیل خبرگان در مقالات معتبر استفاده نموده تا کلیه معادلات دیفراسیل دستگاه قابل حل و اجرا گردند.

سپس تحلیل حساسیت مدل در بازه های زمانی آزمایشی بررسی شده و مدل برای اجرای سناریوها و پایداری سیستم آماده و بهسازی می گردد. در اینجا مجدد اشاره می کنیم که برای حل دستگاه معادلات دینامیکی یکپارچه از الگوریتم انتخاب بهترین گره شروع در دستگاه معادلات دینامیک، که صرفاً، روش خاص این پژوهش است تعریف و بکارگیری می کنیم.

تولید BIG MODEL بر اساس جمله کاوی^{۲۳}

از گزارش درخت علیت^{۲۴} در نرم افزار ونسیم در مدل پایه سیاست انرژی که در شکل ۱ به آن اشاره شده است ملاحظه می کنیم که گره "قدرت چانه زنی بین المللی"^{۲۵} (BP) بصورت ریشه درخت علیت، در رتبه بندی اولویت حل مسئله در مرتبه آخر متغیرهای الگوریتم انتخاب بهترین گره شروع در دستگاه معادلات دینامیک قرار می گیرد که در بخش بعد به تشریح الگوریتم حل مسئله می پردازیم. بقیه متغیرها نیز دارای درخت علیت مخصوص خود هستند که بر اساس گزاره های استخراج شده اولیه برای تشکیل مدل بزرگ استفاده می شود. به عنوان مثال بزرگترین حلقه علیت^{۲۶} نمودار علت و معلولی که در ساختار فوق قابل تشخیص است به این صورت است که اگر "مقبولیت همکاری و مشارکت بین المللی از منظر حاکمیت"^{۲۷} (ACPIC) افزایش یابد پتانسیل بهبود شرایط اقتصادی (اقتصاد کلان) و رشد اقتصاد خرد افزایش می یابد که سبب کاهش کاهش اثر منفی تحریمهای خارجی و متعاقب آن کاهش خطر تنشهای منطقه ای می شود. وقتی خطر تنشهای منطقه ای کاهش یابد قدرت تامین امنیت انرژی افزایش یافته و در نتیجه امنیت سرمایه گذاری خارجی در کشور بیشتر می گردد. این افزایش امنیت سرمایه گذاری خارجی سبب افزایش همکاری های بین المللی و متعاقب آن افزایش قدرت چانه زنی بین ملی می گردد. بازخورد افزایش قدرت چانه زنی بین المللی سبب افزایش مقبولیت همکاریهای بین المللی از منظر حاکمیت سیاسی در سناریوی واقعیت گرایی(S1)^{۲۸} و سبب کاهش مقبولیت همکاریهای بین المللی از منظر حاکمیت سیاسی در سناریوی مطلق گرایی(S2)^{۲۹} می گردد.

^{۳۱} Association models

^{۳۲} Entity

^{۳۳} Association rule

^{۳۴} Apriori

^{۳۵} Carma

^{۳۶} Sequence detection

^{۳۷} Sequential patterns

^{۳۸} Standard decision tree

^{۳۹} Attributes

^{۲۳} Statements Mining

^{۲۴} Causes Tree Report

^{۲۵} Bargaining Power

^{۲۶} Causal Loop

^{۲۷} Acceptability of cooperation and partnership with reputable international companies and enterprises inside

^{۲۸} Political realism

^{۲۹} Political absolutism

^{۳۰} Sequential pattern mining



| کدینگ | اجزاء مفهوم سازگاره (احتمالا متغیرهای اصلی مسئله) | کدینگ | اجزاء مفهوم سازگاره (احتمالا متغیرهای اصلی مسئله) | کدینگ | اجزاء مفهوم سازگاره (احتمالا متغیرهای اصلی مسئله) |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------|
| A | قدرت چانه زنی بین مالی | N | امکان صادرات گاز طبیعی به پاکستان و چین از طریق خط لوله | 1 | افزایش سهم شرکت های ایران فعال در زمینه انرژی |
| B | تحریمهای خارجی | O | وجود مالز تقاضا و نیاز کشورهای عربی حاشیه خلیج فارس به واردات گاز طبیعی | 2 | رتبه اعتباری ایران در تجارت بین الملل |
| C | فشار مستقیم بر صادرات نفت و گاز و مشتقات | P | افزایش خدمات فنی و مهندسی در حوزه های مختلف بالادستی و پایین دست نفت و گاز و پتروشیمی | 3 | ارزش مبادلات بین مالی ایران |
| D | افزایش کسری بودجه دولت | Q | ظرفیت های منطقه ای سوآپ انرژی | 4 | هزینه مبادلات بانکی |
| E | فشار بر بانکها | R | امکان صادرات گاز مایع به چین و هند یا سرزمینهای گداری خارجی | 5 | درآمد تجارت کریپ |
| F | فشار بر سیستم قوانین حاکم (اصلاح سیستم بانکی) | S | ارزش مبادلات اقتصادی حاصل از معاهده استراتژیک ایران و چین | 6 | فشار بر تکنولوژی صنعت و تولید غیرنفتی (اصلاح الگوهای مصرف) |
| G | ظرفیت آزاد سازی قیمت انرژی | T | تغییر مرکز ثقل اقتصادی جهان از غرب به جنوب و شرق آسیا | 7 | افزایش همکاری و مشارکت بین المللی |
| H | وابستگی اقتصاد ایران به نفت | U | سهم ایران در جاده انرژی ابریشم | 8 | افزایش هزینه های دولت |
| I | مقبولیت همکاری و مشارکت با شرکتها و بنگاههای معتبر بین المللی (اقتصاد سیاسی) | V | تأمین امنیت انرژی اروپا | 9 | تنشهای منطقه خاورمیانه |
| J | بناستل بهبود شرایط کل اقتصاد و افزایش رشد اقتصاد خرد | W | اهمیت سرمایه گذاری خارجی در کشور | Q | توزیلت انرژی محور ایران |
| K | بهره وری کل عوامل وجود ظرفیت های بهینه سازی مصرف سوخت و انرژی در کشورهای همسایه | X | توسعه و انتقال تکنولوژی | 0 | هزینه تجارت کریپ |
| L | | Y | نیاز به ارتقاء تکنولوژی | | |
| M | تولید گاز ترکستان و آذربایجان در بلند مدت | Z | ظهور تکنولوژیهای جدید برای افزایش بهره برداری از مبادین هیدروکربونی | | |

جدول ۱. اجزاء مفهوم ساز، متغیرهای اصلی نهایی استخراج شده حال باید مدل دینامیکی را اصلاح منطقی محاسباتی کرد لذا ابتدا باید سری زمانی متغیرهای استخراجی را فرمول بندی کرد. متغیرهایی که استخراج سری زمانی آنها مقذور نبود به صورت مقدار ثابت برای سیستم مدلینگ با قابلیت تحلیل حساسیت گنجانده ایم. لذا به سراغ تعریف متغیرهای ترجیحا بدون بعد از متغیرهای باقیمانده برای افزایش قابلیت اندازه گیری متغیرهای تصمیم و سپس انجام تحلیل سری زمانی آنها و در نهایت ایجاد بلوک های دینامیکی آنها می رویم.

| Investment | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------|------------------------|
| Sustainable Development Index | | SDI | Stocks |
| Country & Product Complexity Index | | CPCI | " Standard converter " |
| International Cooperation | | ICI | Stocks |
| Iran's credit rating in international trade | | ICRIT | " Standard converter " |
| Trade (% of GDP) | | Trade (% of GDP) | Stocks |
| Export Diversification Index | | EDI | Stocks |
| Economic Resilience Index | | ERI | Stocks |
| Global Conflict Risk Index | | Global Conflict Risk Index | Stocks |
| Oil Revenue Reliance (% of GDP) | () | ORR | Stocks |
| Acceptability of cooperation and partnership with reputable international companies and enterprises inside | () | ACPIC | Stocks |
| Ensuring Foreign Direct Investment | | Ensuring Foreign Direct Investment | Stocks |
| Bargaining Power | | Bargaining Power | Stocks |
| Ensuring energy security | | Ensuring energy security | Standard converter |

درخت تصمیم ، قوانین را تنها با یک نتیجه گیری واحد ایجاد می کند ، در حالی که الگوریتم های انجمنی سعی می کنند قوانین زیادی را بیابند ، که هر کدام ممکن است نتیجه متفاوتی داشته باشند.

قوانین انجمنی^{۴۰} پیوند نتایج خاصی (به عنوان مثال، اخذ تصمیم خاص) با مجموعه ای از شرایط (به عنوان مثال اتخاذ چند تصمیم متعاقب دیگر) را مرتبط می کند. به عنوان مثال:

کاهش کسری بودجه => افزایش صادرات & افزایش بهره وری کل (۱۷۳، ۱۷، ۸۴٪). این قانون فوق بیان می کند که کاهش کسری بودجه اغلب زمانی اتفاق می افتد که افزایش صادرات و افزایش بهره وری در کنار هم قرار بگیرند. این قانون ۸۴٪ قابل اعتماد است و در ۱۷٪ داده ها یا ۱۷۳ گزاره اعمال شده است. نقطه ضعف الگوریتم های انجمنی این است که آنها سعی می کنند الگوها را در یک فضای جستجوی بسیار بزرگ بیابند و بنابراین ، اجرای آنها زمان بسیار بیشتر از الگوریتم درخت تصمیم نیاز دارد.

برای اجرای الگوریتم کشف قوانین انجمنی از گزاره های استخراج شده از BIG MODEL ، در شکل ۲ ، ابتدا اجزاء های مفهوم ساز تشکیل گزاره ها را بر اساس ماتریس تبدیل زیر به گزاره های کدینگ شده ساده ساز برای ورودی فرایند کشف الگوهای توالی، تبدیل می کنیم. از تکنیک های متن کاوی^{۴۱} برای تولید گزاره های مفهوم ساز کدینگ شده^{۴۲} می توان استفاده نمود. توجه داشته باشید این اجزاء مفهوم ساز که در جدول ۱ گزارش شده است، متغیرهای اصلی نهایی ما می توانند باشند.

برای تبدیل قوانین انجمنی به مجموعه قوانین طبقه بندی ، سطح دیگری از ترادیمی^{۴۳} لازم است. از این رو ، قوانین انجمنی تولید شده توسط الگوریتم های انجمنی به عنوان مدل های تصفیه نشده شناخته می شوند که در حدود ۳۲۷۶۶ گزاره توالی با طول حداکثر ۳۲ گره می باشند. به همین دلیل است ما قوانین استخراج شده از مدل BIG Model را بصورت دستی بر اساس ترکیب آیتمهای درصد پشتیبانی^{۴۴} و درصد اطمینان^{۴۵} در فایل اکسل^{۴۶} ، فیلتر و دسته بندی کرده ایم. بعد از ۴ مرتبه فیلترینگ روی آیتم های بزرگتر از میانگین ابزار اکسل، به ۱۷ متغیر با ۲۴ قاعده برگزیده رسیدیم. مجدد ماتریس تبدیل معکوس را برای فهم قاعده های اجرا کرده اجرا نموده (جدول شماره ۲)، سپس بر اساس ۲۴ قاعده استخراج شده به مدل دینامیک پایه بهینه شده نزدیک شده ایم.

^{۴۴} Support Percent

^{۴۵} Confidence Percent

^{۴۶} ExporToRanking-01.xlsx

^{۴۰} Association Rules

^{۴۱} Text Mining

^{۴۲} Coded conceptual propositions

^{۴۳} transformation

دستگاه دینامیک، در این مقاله ارائه می گردد. $EQI^{\Delta T}$ اولین متغیر شروع کننده حل دستگاه دینامیکی بر اساس الگوریتم حل پذیری مسئله است، با داده های ۳۸ ساله بصورت مدل $ARIMA(0,0,0)(0,1,1)[4]$ برازش شده است، بنابراین بر اساس معادله سراسری $ARIMA(p,q,d)(P,Q,D)[S]$ مرجع [۳۱]

$$\Phi(\beta^S) \cdot \nabla^D \cdot \nabla^d \cdot y_t = \Theta_Q(\beta^S) \cdot \theta(\beta) \cdot \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\nabla^d = (1 - \beta)^d \quad \nabla^D = (1 - \beta^S)^D \quad (2)$$

$$\text{Seasonal AR: } \Phi(\beta^S) = 1 - \Phi_1 \beta^S - \dots - \Phi_p \beta^{pS} \quad (3)$$

$$\text{Seasonal MA: } \Theta_Q(\beta^S) = 1 + \theta_1 \beta^S + \dots + \theta_Q \beta^{QS} \quad (4)$$

$$\text{AR: } \phi(\beta) = 1 - \phi_1 \beta - \dots - \phi_p \beta^p \quad (5)$$

$$\text{MA: } \theta(\beta) = 1 + \theta_1 \beta + \dots + \theta_q \beta^q \quad (6)$$

آنگاه برای متغیر EQI خواهیم داشت :

$$y_t = \frac{(1 - 0.5221 * \beta^4)}{(1 - \beta^4)} \cdot \varepsilon_t \quad (7)$$

$$\mu_{\varepsilon_t} = 0, \quad \sigma_{\varepsilon_t}^2 = 0.0063 \quad (8)$$

حال با توجه به اینکه $y_{t-1} = \beta \cdot y_t$ آنگاه $y_t = y_t - y_{t-1}$

$$(1 - \beta)y_t \Rightarrow \beta = 1 - \frac{y_t}{y_t}$$

بنابراین از معادلات (۷) و (۸) بکمک تبدیل توابع داخلی کدهای استلا زیر شبکه هر متغیر تصمیم یا گره شاخص به بلوک SD متغیر EQI در استلا تبدیل می کنیم:

$$B_of_EQI = (DELAY(EQI, 1) - EQI) / EQI \quad (9)$$

$$EQI(t) = EQI(t - dt) + (EQI_Rate) * dt \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{INIT } EQI &= 0.750 \\ \text{EQI_Rate} &= (\text{DERIVN}(\text{Ret_EQI}, 1) + \text{DERIVN}(\text{EQI_HIS}, 1)) / 2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$EQI_HIS = \text{GRAPH}(\text{TIME}) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{EQI_HIS_Delay} &= \text{DELAY}(\text{EQI_HIS}, \text{Shift_EQI}) \\ \text{ERI_Rate} &= \text{DERIVN}(\text{ERI_HIS}, 1) + \text{DERIVN}(\text{SDI}, 1) + \text{DERIVN}(\text{ICI}, 1) + \text{DERIVN}(\text{EQI}, 1) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{LAG_EQI} = 6 \quad (14)$$

$$\text{MUT_EQI} = \text{SQRT}(1 / \text{VAR_EQI}) * \text{LOG10}(1 / \text{VAR_EQI}) \quad (15)$$

$$\text{Ret_EQI} = \text{EQI_HIS_Delay} * \text{EXP}(Yt_EQI) \quad (16)$$

$$\text{Shift_EQI} = 3 \quad (17)$$

$$\text{SINW_EQI} = \text{SIN}(\text{TIME} / \text{LAG_EQI}) \quad (18)$$

$$\text{VAR_EQI} = 0.0063 \quad (19)$$

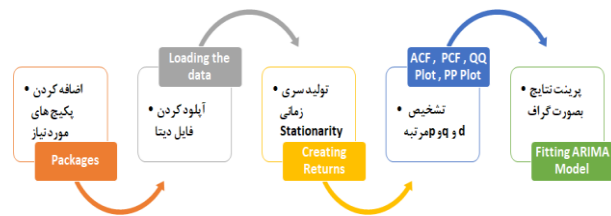
$$\text{Wnoise_EQI} = \text{NORMAL}(0, \text{VAR_EQI}, 100) * \text{SINW_EQI} \quad (20)$$

$$Yt_EQI = ((1 - B_of_EQI^4) * (\text{Wnoise_EQI} * \text{MUT_EQI}) / (1 - 0.5221 * B_of_EQI^4)) \quad (20)$$

جدول ۲. متغیر اصلی مدل بهینه شده

استخراج مدل ریاضی تحلیل سری های زمانی متغیرهای اصلی

الگوریتم اتو آریمما از مدل SARIMAX که مدل عمومی اتورگرسیو یکپارچه میانگین متحرک اتوماتیک فصلی مبالغه گر^{۴۷} است، استفاده می کند. همانگونه که در فوق اشاره شده است، معیار های انتخاب بهترین مدل AIC^{48} ، AIC^{49} ، BIC^{50} ، $HQIC^{51}$ و OOB^{52} است و $ARIMA$ مینیمم مقادیر آنها را باز می گرداند. توجه داشته باشید که به دلیل مسائل ایستایی، ممکن است اتوآریمما مدل مناسبی برای همگرا پیدا نکند. در این صورت، یک پیام Value Error ارسال می شود که پیشنهاد می کند قبل از اجرای مجدد الگوریتم، اقدامات احیا کننده ایستایی انجام شود یا محدوده جدیدی از مقادیر مورد نظر انتخاب شود. مراحل اجرای اتو آریمما در کدینگ پایتون بصورت ذیل است:



شکل ۳. مراحل اجرای Auto ARIMA در کدینگ پایتون

| Index Description | Best model | log_ret_shift | Lags | Period M | Observation | Log Likelihood | AIC | BIC | HQIC |
|------------------------------------|----------------------------------|---------------|------|----------|-------------|----------------|----------|----------|----------|
| Index of Economic Freedom | ARIMA(2,0,1)(0,0,1)[3] intercept | 2 | 6 | 3 | 23 | 30.808 | -51.617 | -45.939 | -50.188 |
| Export Quality Index | ARIMA(0,0,0)(0,1,1)[4] | 1 | 6 | 4 | 38 | 37.298 | -70.595 | -67.543 | -69.554 |
| ENERGY SECURITY RISK | ARIMA(1,0,0)(0,0,0)[5] | 1 | 6 | 5 | 38 | 93.578 | -183.157 | -179.882 | -181.992 |
| Iran foreign direct investment | ARIMA(1,0,1)(1,1,0)[2] | 2 | 6 | 2 | 20 | -24.774 | 57.548 | 61.109 | 58.039 |
| Sustainable Development Index | ARIMA(0,0,1)(0,1,1)[2] intercept | 2 | 6 | 2 | 24 | 56.099 | -106.199 | -102.525 | -105.427 |
| Country & Product Complexity Index | ARIMA(2,0,0)(3,0,1)[5] | 2 | 6 | 5 | 17 | -14.259 | 42.518 | 48.35 | 43.097 |
| International Cooperation | ARIMA(1,0,1)(0,0,0)[2] | 3 | 3 | 2 | 12 | 1.994 | 2.012 | 3.467 | 1.474 |
| Trade (% of GDP) | ARIMA(2,0,2)(1,0,0)[3] intercept | 2 | 6 | 3 | 40 | 19.762 | -27.523 | -17.39 | -23.859 |
| Export Diversification Index | ARIMA(1,0,1)(1,1,0)[2] | 3 | 6 | 2 | 34 | 52.554 | -97.108 | -91.245 | -95.164 |
| Global Conflict Risk Index | ARIMA(3,0,0)(3,1,1)[4] | 2 | 6 | 4 | 24 | -30.934 | 77.868 | 85.834 | 79.423 |
| Oil Revenue Relience (% of GDP) | ARIMA(1,0,0)(1,0,0)[3] | 4 | 6 | 3 | 36 | -20.439 | 56.879 | 68.851 | 60.907 |

جدول ۳. نتایج تایید مدل های حاصل از اجرای کدهای پایتون

کدهای ریاضی بلوکهای استلا به پیوست A ارائه شده است که بعنوان نمونه، اولین متغیر بر اساس الگوریتم قابلیت حل پذیری

^{۴۷} Bayesian Information Criterion

^{۴۸} Hannan-Quinn Information Criterion

^{۴۹} Out of bag-for validation scoring-respectively

^{۵۰} Export Quality Index

^{۴۷} Seasonality Auto Regression Integration Moving Average and Exaggerate

^{۴۸} Akaike Information Criterion

^{۴۹} Corrected Akaike Information Criterion



واریانس نویز سفید، در مجاورت نزدیک به صفر، از ضریب متغیر نمونه $Y_t EQI$ بصورتی که:

$$MUT EQI = \sqrt{SQRT(1/VAR_EQI) * LOG10(1/VAR_EQI)} \quad (21)$$

استفاده می شود بطوریکه:

$$Order^{EQI\ HIS\ EQI\ Rate} \cong Order^{Ret\ EQI\ EQI\ Rate} \quad (22)$$

یعنی Order اثر $EQI\ HIS$ در $EQI\ Rate$ برابر Order اثر $Ret\ EQI$ در $EQI\ Rate$ باشد، همچنین وزن این دو اثر برابر و $1/2$ در نظر گرفته شده، بهینه سازی ضرایب HIS و RET امکان پذیر خواهند بود، بدین ترتیب به روش فوق ۱۳ متغیر اول الگوریتم نقطه حل دستگاه دینامیکی از ۱۷ متغیر به بلوکهای استلا و زیر شبکه های خود مجهز می شود. ۴ متغیر باقیمانده متغیرهای نقطه اتصال شبکه سراسری اند که در ادامه توضیح ارائه می گردد.

متغیرهای نقطه اتصال الگوریتم قابلیت حل پذیری دستگاه دینامیک

متغیرهای این گروه شامل متغیرهای نقطه اتصال زیرشبکه ها بعلاوه متغیرهای کمکی اضافه شده مانند متغیر نرخ^{۵۶} متغیر نقطه اتصال یا متغیرهای مقدار ثابت است که در آخر جدول رتبه بندی قرار می گیرند که در ادامه به آنها می پردازیم:

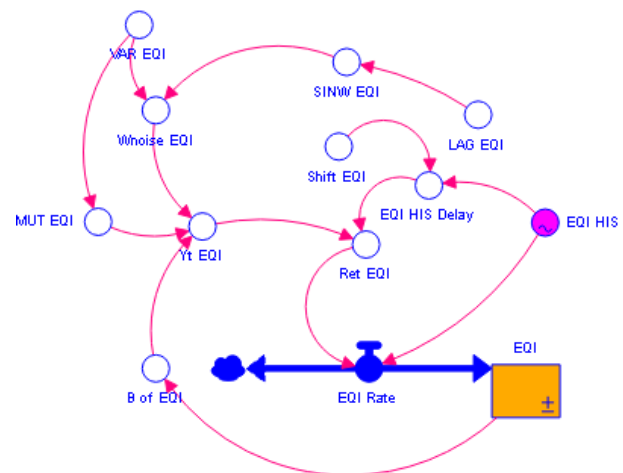
| Index Description | Single Variable (Percent) | | With Initial Data Series (Percent) | | DF (Degrees of freedom) - Interactive Relation | Rate of DR | | Ratio of NGOE With Initial Data to Total nodes in | | Ratio of Output variables NGOE to Total | | Total Score | Rank |
|------------------------------------|---------------------------|----|------------------------------------|----|------------------------------------------------|------------|-----|---------------------------------------------------|---|-----------------------------------------|------|-------------|------|
| | + | - | + | - | | + | - | + | - | = | - | | |
| Ensuring Foreign Direct Investment | 2% | 0% | 2% | 0% | 2.00 | 67% | 50% | 75% | | | 1.75 | 15 | |
| Bargaining Power Rate | 2% | 0% | 2% | 0% | 4.00 | 133% | 67% | 17% | | | 1.83 | 14 | |
| Bargaining Power | 2% | 0% | 2% | 0% | 2.00 | 67% | 50% | 75% | | | 1.75 | 15 | |

جدول ۴. ویژگیهای متغیرهای نقطه اتصال

متغیر شاخص تضمین سرمایه گذاری مستقیم خارجی (EFDI)

این شاخص از شاخص های نقطه اتصال زیر شبکه هاست که اطلاعات سری زمانی آن استخراج نشده یا موجود نمی باشد. دو ورودی از زیر شبکه های $GCRI$ و $IFDI$ دارد و دو خروجی به زیر شبکه های $EENS$ و $Bargaining Power$ دارند لذا در رتبه بالای الگوریتم حل پذیر قرار می گیرند. بر اساس گزاره های کلیدی، زیر شبکه متغیر $EFDI$ بر اساس روابط خطی دیفرانسیلی گزاره مینا به صورت ذیل در نظر گرفته می شود:

- (۱) شاخص ریسک تنشها منطقه ای $\leftarrow (-)$ تضمین سرمایه گذاری مستقیم خارجی
- (۲) سرمایه گذاری مستقیم خارجی $\leftarrow (+)$ تضمین سرمایه گذاری مستقیم خارجی



شکل ۴. زیر شبکه متغیر کیفیت صادرات در استلا

در این پژوهش بر اساس قوانین ریاضی حدی در محاسبات عددی ما به سه نوع بلوک SD ، دو نوع آن در مدلسازی ظرفیت سنجی^{۵۴} و نوع سوم در مدل سازی سناریویی^{۵۵} بکار گرفته شده، رسیده ایم.

ویژگیهای بلوک های SD زیر شبکه متغیرهای اصلی در استلا
 بلوک نوع اول: بلوک اول در مدلسازی ظرفیت سنجی تبدیل آریمما به کد استلا، بدلیل $Oeder\ y_t\ of\ \beta > 1$ است و در مراحل اجرای دینامیک دچار خطای تقسیم بر صفر بوجود نیامده است از $Y_t EQI$ استفاده کرده ایم و اصولاً این نوع رفتار در همه متغیرهایی که ماهیت ظرفیتی برای سیستم اقتصادی اجتماعی دارند ولیکن واریانس نویز سفید آنها در شبیه سازی آریمما عداد بزرگ نزدیک به ۱ باشد مشاهده شده است که در مدلسازی ظرفیت سنجی در سناریوی مرجع بکار گرفته شده است.

بلوک نوع دوم: بلوک اول در مدلسازی ظرفیت سنجی تبدیل آریمما به کد استلا، بدلیل $Oeder\ y_t\ of\ \beta > 1$ نیست و در مراحل اجرای دینامیک دچار خطای تقسیم بر صفر می شویم می توان از بلوک $1/ Y_t EQI$ بجای $Y_t EQI$ استفاده کرده ایم و اصولاً این نوع رفتار در همه متغیرهایی که ماهیت ظرفیتی برای سیستم اقتصادی اجتماعی دارند ولیکن واریانس نویز سفید آنها در شبیه سازی آریمما عداد بسیار کوچک نزدیک صفر باشد مشاهده شده است در مدلسازی ظرفیت سنجی در سناریوی مرجع بکار گرفته شده است.

بلوک نوع سوم: بلوک سوم در مدلسازی سناریویی تبدیل آریمما به کد استلا با اصلاح فرمول پیاده سازی β وقتی که استفاده از جمله معکوس $1/ Y_t EQI$ در تبدیل معادله (بخودی خود بدلیل اجبار استفاده از جمله منفی $Ret\ EQI$ در واریانس های کوچک تولیدی نویز سفید، دچار خطای تقسیم بر صفر شده و لذا نمی توان از این تبدیل استفاده نمود، در این حالت برای اجتناب از خطای حاصل از

^{۵۶} Bargaining Power Rate

^{۵۴} CP Modeling

^{۵۵} S1/S2 Modeling

$$d(\text{Bargaining Power Rate Out}) = \frac{d(\text{GCRI})}{\text{GCRI}} + \frac{d(\text{ESR})}{\text{ESR}} \quad (30)$$

و متغیر نرخ خروجی آن (Bargaining Power Rate Out) دارای ورودی از زیر شبکه های ESR و GCRI با قطبیت منفی دارند به این ترتیب شاخص قدرت چانه زنی بصورت معادلات خطی قابل محاسبه است.

$$\text{net } d(\text{Bargaining Power Rate In}) = \frac{d(\text{ERI})}{\text{ERI}} + \frac{d(\text{ICRIT})}{\text{ICRIT}} + \frac{d(\text{ICI})}{\text{ICI}} + \frac{d(\text{EFDI})}{\text{EFDI}} + \frac{d(\text{ORR})}{\text{ORR}} - \frac{d(\text{GCRI})}{\text{GCRI}} - \frac{d(\text{ESR})}{\text{ESR}} \quad (31)$$

نکته اساسی در نرمال کردن متغیرهای مرتبط با گره های نقطه اتصال از سمت زیر شبکه های سایر است. لذا بزرگی متغیر قدرت چانه زنی نرمال شده و مقادیر آن در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ در بازه زمانی ۷۰ ساله بوده است. کلیه ضرایب وزنی متغیرهای اثر گذار در حال حاضر برابر در نظر گرفته شده است که در تحلیل حساسیت تحقیقات آتی بحث و بررسی می گردد.

نتایج

در اینجا ما متغیرهای حدی را به دسته ای از متغیرهای اصلی شبکه دینامیک اطلاق کردیم که ماهیت انبارشی طی زمان دارند و به سقف حدی بر اساس نرخ رشد مثبت یا نرخ ریزش منفی در زمان می رسند. متغیرهای که به مجاورت خط افقی حد بالای خود و عبارتی به سقف ظرفیت سیستمی خود رسیده اند شامل:

(۱) متغیر کیفیت صادرات (EQI) در بازه ۷۲ ساله تا ۲۰۷۰ از سال پایه ۱۹۹۸ با مقدار ۰,۷۵٪ حداکثر به مقدار ۱,۶۸٪ می رسد که میانگین ۰,۰۲٪ سالانه را می توان برنامه ریزی کرد.

(۲) متغیر سرمایه گذاری مستقیم خارجی (IFDI) در بازه ۷۲ ساله تا ۲۰۷۰ از سال پایه ۱۹۹۸ با مقدار ۲۴۳,۷۵۰ میلیون ریال ، حداکثر به مقدار ۴۲۱,۶۱۳,۰۰۰ میلیون ریال (تقریباً معادل بودجه کل کشور در سال ۱۳۹۹) می رسد که می توان آن را در سناریوی S1 برنامه ریزی بودجه کرد.

(۳) متغیر پیچیدگی تکنولوژیکی محصولات داخلی (CPCI) در بازه ۷۰ ساله تا ۲۰۷۰ از سال پایه ۲۰۰۰ با مقدار ۰,۸۴٪، حداکثر به مقدار ۱,۵,۸۲٪ می رسد که میانگین ۰,۲۲٪ سالانه را می توان برنامه ریزی کرد.

(۴) متغیر تنوع محصولات صادراتی (EDI) در بازه ۱۰۸ ساله تا ۲۰۷۰ از سال پایه ۱۹۶۲ با مقدار ۴,۸۱٪، حداکثر به مقدار ۱۵,۸۲٪ می رسد که میانگین ۰,۲۲٪ سالانه را می توان برنامه ریزی کرد.

(۵) متغیر میزان اطمینان از درآمد نفت برحسب درصد تولید ناخالص داخلی (ORR) در بازه ۱۰۰ ساله تا ۲۰۷۰ از سال پایه ۱۹۷۰ با

$$\text{EFDI Rate} = \frac{\text{DERIVN}(\text{IFDI}, 1)}{\text{IFDI}} - \frac{\text{DERIVN}(\text{GCRI}, 1)}{\text{IFDI}} \quad (23)$$

بعبارتی نرخ تغییرات تضمین سرمایه گذاری مستقیم خارجی برابر با جمع جبری نرمال شده دیفرانسیل متغیرهای ریسک تنشهای منطقه ای با اثر منفی و حجم سرمایه گذاری مستقیم خارجی با اثر مثبت در نظر گرفته شده است.

(۳) تضمین سرمایه گذاری مستقیم خارجی ← (+) قدرت چانه زنی

$$\frac{d\text{Bargaining Power}}{dt} = \frac{d\text{ERI}}{dt} + \frac{d\text{ICRIT}}{dt} + \frac{d\text{ICI}}{dt} + \frac{d\text{EFDI}}{dt} + \frac{d\text{ORR}}{dt} \quad (24)$$

(۴) تضمین سرمایه گذاری مستقیم خارجی ← (+) تضمین امنیت انرژی

$$\frac{d\text{EENS}}{dt} = -\frac{d\text{ESR}}{dt} + \frac{d\text{CPCI}}{dt} + \frac{d\text{EFDI}}{dt} + \frac{d\text{ACPIC}}{dt} \quad (25)$$

متغیر قدرت چانه زنی

این شاخص نیز از شاخص های نقطه اتصال زیر شبکه هاست که اطلاعات سری زمانی آن استخراج نشده یا موجود نمی باشد. جزء متغیرهایی است که بیشترین تعداد ورودی و خروجی را دارند، لذا در رتبه بالای الگوریتم حل پذیر قرار می گیرند. حال برای حل این گره ها از گزاره های کلیدی استفاده می کنیم و روابط را فعلاً بصورت خطی دیفرانسیلی در نظر می گیریم. این متغیر را به کمک دو متغیر نرخ ورودی و خروجی تکمیل می کنیم، سه خروجی به سه زیر شبکه مجاور دارد لذا؛

در زیر شبکه Trade (% of GDP) از معادلات حاکم بر Trade Rate داریم:

$$\frac{d\text{Trade Rate}}{dt} = \frac{d\text{Bargaining Power}}{dt} + \frac{d\text{GCRI}}{dt} + \frac{d\text{Ret Trade}}{dt} \quad (26)$$

در زیر شبکه GCR از معادلات حاکم بر GCR Rate داریم:

$$\frac{d\text{GCR}}{dt} = \frac{d\text{Bargaining Power}}{dt} + \frac{d\text{EFDI}}{dt} \quad (27)$$

در زیر شبکه ACPIC از معادلات حاکم بر ACPIC Rate داریم:

$$\frac{d\text{ACPIC}}{dt} = -\frac{d\text{Bargaining Power}}{dt} + \frac{d\text{IEF}}{dt} \quad (28)$$

همچنین متغیر نرخ ورودی آن (Bargaining Power Rate In) پنج ورودی از طریق زیر شبکه های IFDI ، ICRIT ، ORR ، ERI و ICI با قطبیت مثبت بصورت دیفرانسیلی زیر دارد:

$$d(\text{Bargaining Power Rate In}) = \frac{d(\text{ERI})}{\text{ERI}} + \frac{d(\text{ICRIT})}{\text{ICRIT}} + \frac{d(\text{ICI})}{\text{ICI}} + \frac{d(\text{EFDI})}{\text{EFDI}} + \frac{d(\text{ORR})}{\text{ORR}} \quad (29)$$



نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق ما بر اساس مکانیزم گزاره کاوی^{۵۷} از متد داده کاوی^{۵۸}، مبتنی بر تجمیع مقالات و منابع مرتبط با موضوع، مدل بدیهی اولیه دینامیک موضوع، به مدل انتزاعی بزرگ تبدیل می‌شود. از مدل انتزاعی بزرگ، گزاره های اولیه برای استفاده در تحلیل الگوهای پرتکرار سری^{۵۹} در پایتون^{۶۰}، برای استخراج گزاره‌های معتبر و رتبه بندی آنها استفاده می‌گردد. بر اساس سری گزاره های معتبر، شاخصهای برجسته اثرگذار به صورت متغیرهای تصمیم اصلی استخراج گردیده که به شاخص های قابل اندازه گیری تبدیل شد. برای تحلیل سری های زمانی و استخراج معادلات حاکم مقادیر به الگوریتم آریما^{۶۱} پایتون تحویل داده شود. سپس بر اساس مدل ریاضی تحلیل آریما سری زمانی شاخصهای استخراج شده، بلوکهای تحلیل دینامیکی ساخته و اصلاحات برای مدلسازی ایستا بصورت بلوکهای جداگانه ارزیابی رفتار گردید. شبکه بلوکهای ارزیابی رفتار سیستم های دینامیکی^{۶۲} تایید شده بعنوان بخش جدید مدل، تحت عنوان Energy Policy به مدل پایه PEEMI^{۶۳} برای اندازه گیری ظرفیتهای سیستمی دستگاه سیاست انرژی و محاسبه شاخصهای قدرت چانه زنی^{۶۴} بین المللی و مقبولیت مشارکت بین المللی ACPIC در دستگاه سیاست انرژی کشور به عنوان کلید اجرای پایدار گامهای اجرایی برنامه ریزی انرژی کشور بصورت بازگشتی، کمک الگوریتم ماشین دینامیکی انرژی - اقتصادی اندازه گیری و ارائه شده است.

مراجع

- [1] Kevin Cashman and Cavan Kharrazian Jacobin, September 1, 2019. "US Sanctions Are Designed to Kill". CEPR, See also URL <https://cepr.net/us-sanctions-are-designed-to-kill>.
- [2] Johannes Reissner & dagger, Eugene Whitlock, Working Paper, 15.03.2004, 59 Pages, Iran and Its Neighbors: Diverging Views on a Strategic Region - Vol. II.
- [3] The Energy Transition and the Economy A System Dynamics Approach, John David Sterman, 1977, MIT
- [4] Strategy of economic development in Iran : a case of development based on exhaustible resources, Ali Naghi Mashayekhi, 1978, MIT.
- [5] Political machines: machine learning for understanding the politics of social machines, Papakyriakopoulos, 2020.
- [6] Designing a Model for the **Global Energy System** GENeSYS-MOD: An Application of the Open-Source Energy Modeling System (OSeMOSYS), Konstantin Löffler, Karlo Hainsch, Thorsten

مقدار ۱۳،۵۶٪، حداکثر به مقدار ۶۷،۹۹٪ می‌رسد که میانگین ۰،۹۴٪ سالانه را می‌توان برنامه ریزی کرد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که اگر زمانی ما با سطح اطمینان ۹۵٪ وابستگی به اتکای ۶۸٪ درآمدهای نفتی رسیدیم دیگر بیش از آن مقدور نخواهد بود و سیر نزولی آن آغاز خواهد شد.

متغیر سطح مبادلات تجاری بر حسب درآمد ناخالص ملی (ORR) در بازه ۱۱۰ ساله تا ۲۰۷۰ از سال پایه ۱۹۶۰ با مقدار ۴۳،۱۹٪، حداکثر به مقدار ۸۹،۱۸٪ می‌رسد که میانگین ۱،۲۴٪ سالانه را می‌توان برنامه ریزی کرد.

شاخص ریسک تنشها (GCRI) در بازه ۶۴ ساله تا ۲۰۷۰ از سال پایه ۲۰۰۶ با مقدار ۱،۶۵٪، حداکثر به مقدار ۱۴،۳۵٪ می‌رسد که میانگین افزایش ۰،۲۰٪ سالانه را می‌توان پیش بینی و برنامه ریزی کرد.

شاخص آزادی اقتصاد (IEE) در بازه ۶۸ ساله تا ۲۰۷۰ از سال پایه ۲۰۰۲ با مقدار ۳۶،۴٪، حداکثر به مقدار ۶۳،۹۵٪ می‌رسد که میانگین ۰،۸۹٪ سالانه را می‌توان برای توسعه طرحها برنامه ریزی کرد.

در جدول زیر ماکزیمم حد سقفی متغیر و میانگین رشد قابل دسترس ارائه می‌گردد که فاکتور مهم برای برنامه ریزی طرحهای دولت بعنوان اهداف استراتژیک است، ارائه شده است:

| ردیف | عنوان متغیر | نماد یا اختصار | گرایش تغییرات | ظرفیت سیستمی (سقف رشد سالانه) |
|------|------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|
| ۱ | کیفیت صادرات | EQI | ماکزیمم تا سال ۱۹۹۸ ۰-۷۵٪ ۱-۶۸٪ | ۰-۲٪ |
| ۲ | سرمایه گذاری مستقیم خارجی | IFDI | ماکزیمم تا سال ۱۹۹۸ ۲۴۳،۷۵۰ ۴۲۱،۶۱۳،۰۰۰ | ۵،۸۵۵،۷۳۶ |
| ۳ | بیجیدگی تکنولوژیکی محصولات داخلی | CPCI | ۲۰۰۰ ۱۵،۸۳٪ --۸۴۰ | ۰-۲۲٪ |
| ۴ | تنوع محصولات صادراتی | EDI | ۱۹۶۲ ۴-۸۱٪ ۶-۱۴٪ | ۰-۰۹٪ |
| ۵ | میزان اطمینان از درآمد نفت (درصد تولید ناخالص داخلی) | ORR | ۱۹۷۰ ۱۳-۵۶٪ ۶۷-۹۹٪ | ۰-۹۴٪ |
| ۶ | سطح مبادلات تجاری بر حسب درآمد ناخالص ملی | (%) Trade of GDP | ۱۹۶۰ ۴۳-۱۹٪ ۸۹-۱۸٪ | ۱-۲۴٪ |
| ۷ | شاخص ریسک تنشها | GCRI | ۲۰۰۶ ۱-۶۵٪ ۱۴-۳۵٪ | ۰-۲۰٪ |
| ۸ | شاخص آزادی اقتصاد | IEF | ۲۰۰۲ ۳۶-۴۰٪ ۶۳-۹۵٪ | ۰-۸۹٪ |

جدول ۵. متغیرهای حدی سیستم دینامیکی

^{۵۷} Autoregressive integrated moving average

^{۵۸} System Dynamics

^{۵۹} Preliminary Energy-Economy Model of Iran

^{۶۰} Bargaining Power

^{۵۷} Propositions mining

^{۵۸} Data Mining

^{۵۹} Sequential Pattern Mining

^{۶۰} Python

- [۱۸] پورمعصومی لنگرودی، بوشهری، شیرانی، مشایخی، ”یک مدل دینامیک سیستم برای تجزیه و تحلیل سیستم اقتصاد انرژی ایران، پورمعصومی لنگرودی، بوشهری، شیرانی، مشایخی“، پایان نامه دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی صنایع، کارشناسی ارشد ۱۳۸۵.
- [۱۹] محمدی، میبدی، جوان، فاکهی، ”شبه سازی ترازنامه انرژی ایران برای سال ۱۴۲۰ و طراحی سناریوهای مدیریت طرف تقاضا و عرضه با استفاده از مدل ساز LEAP“، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، دوره ۸، شماره ۲۹، زمستان، ۱۳۹۸.
- [۲۰] شبه سازی تقاضا و عرضه حاملهای انرژی تا سال ۲۰۳۵ در ایران با استفاده از مدل ساز LEAP، اشراقی، ملکی، وکیلی، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، دوره ۸، شماره ۲۹ - شماره پیاپی ۱، زمستان ۱۳۹۷.
- [۲۱] توسعه مدل تقاضای انرژی در سطح ملی با استفاده از مدل ساز LEAP، مرادی، احمدی، عمیدپور، پژوهش های برنامه ریزی و سیاست گذاری انرژی / سال اول / شماره ۳ / پاییز ۱۳۹۲.
- [22] Viktor Katona. "How Iran Plans To Bypass The World's Main Oil Chokepoint". Oilprice.com. Archived from the original on 11 September 2018. Retrieved 11 September 2018.
- [23] Jamie Billingham, "The 11 Laws of Systems Thinking and Stakeholder Engagement", April 20, 2013
- [24] Michael C Jackson, "Critical Systems Thinking and Practice" February 2001 European Journal of Operational Research 128:233-244
- Burandt, Pao-Yu Oei, Claudia Kemfert and Christian von Hirschhausen, 2017.
- [7] <https://systemdynamics.org/>
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/System_dynamics
- [9] The Art of Problem Solving: Accompanied by Ackoff's Fables, Russell L. Ackoff, Wiley, 1978
- [10] Political machines: machine learning for understanding the politics of social machines, Papakyriakopoulos, 2020
- [11] Neuroeconomic and Behavioral Aspects of Decision Making, Kesra Nermend, Małgorzata Łatuszyńska, Springer, 2016
- [12] <https://fidelity.github.io/seq2pat/index.html>
- [13] https://alkalineml.com/pmdarima/modules/generated/pmdarima.arima.auto_arima.html
- [14] Wilfrid L. Kohl, in Encyclopedia of Energy, 2004, National Security and Energy
- [15] A system dynamics model for national energy policy planning, Roger F. Naill, System Dynamics Review 8, by John Wiley & Sons, 1992
- [16] R. Glanville. Second order cybernetics. Systems Science and Cybernetics, 3:59-85, 2002.
- [17] J. Hendler and A. M. Mulvehill. Social machines: the coming collision of artificial intelligence, social networking, and humanity. Apress, 2016.

ACEC2021-92634

معرفی ساختار جدید در طراحی مبدل های dc/dc چندسطحی به عنوان رابط در انرژی های تجدیدپذیر

ابراهیم سیفی نجمی^۱، امین رهبر فتوحی^۲

^۱استادیار، گروه مهندسی برق موسسه آموزش عالی رشدیه تبریز، ایران، ebrahimseifinajmi@gmail.com
^۲کارشناس ارشد، گروه مهندسی برق موسسه آموزش عالی رشدیه تبریز، ایران، aminrahbar11@gmail.com

چکیده

امروزه تقاضای بالایی برای استفاده از انرژی های تجدیدپذیر نظیر پنل های خورشیدی، توربین های بادی و پیل های سوختی ایجاد شده است و این امر سبب شده تا مبدل های الکترونیک قدرت در توان های مختلف استفاده شود. بدلیل اینکه منابع تجدیدپذیر دارای ولتاژ پایینی هستند، مبدل های dc/dc بهره بالا به عنوان واسط بین منابع تجدیدپذیر و شبکه قرار می گیرند. مبدل های بهره بالای dc/dc در کاربردهایی نظیر خودروهای برقی، تجهیزات پزشکی و لامپ های تخلیه ای و سیستم های پشتیبان باتری در UPS استفاده می شوند. بدلیل اینکه استرس ولتاژ روی کلید در مبدل های متداول بالا و برابر ولتاژ خروجی است، این مبدل ها با چالش روبرو هستند.

در این مقاله، یک مبدل DC/DC غیر ایزوله بهره بالا با کمک مبدل های شبه منبع امپدانس با سلف تزویج بررسی شده است. مهمترین ویژگی های این مبدل جریان ورودی پیوسته، زمین مشترک بین ورودی و خروجی و استرس پایین روی کلید می باشد. همچنین افزایش ضریب نسبت تبدیل محدودیتی در دیوتی سایکل مبدل نیز ایجاد نمی کند. برای ارزیابی مبدل و تحلیل ساختار، نتایج شبیه سازی با کمک نرم افزار MATLAB/Simulink صورت گرفت که نتایج صحت عملکرد را نشان داد.

واژه های کلیدی: مبدل شبه منبع امپدانس، مبدل dc/dc، بهره بالا، سلف تزویج

مقدمه

کاهش ذخایر سوخت های فسیلی، مسائل زیست محیطی، افزایش قیمت سوخت های فسیلی و... منجر به ظهور چشمگیر منابع تولید توان غیر متمرکز مانند سیستم های فتوولتائیک، پیل سوختی، باتری، توربین های بادی و... در سیستم های قدرت امروزی شده است. برخلاف منابع سنتی تولید توان در سیستم های قدرت که مبتنی بر ژنراتورهای سنکرون با ولتاژ خروجی AC هستند، منابع تولید انرژی پراکنده

غالباً منابعی با ولتاژ خروجی DC هستند (سیستم های فتوولتائیک، باتریها و پیل سوختی) که قادر نیستند به صورت مستقیم به شبکه الکتریکی متصل شوند و در آنها لازم است ولتاژ DC خروجی آنها از طریق یک یا چند مبدل به شبکه اصلی متصل شود [۱-۷]. با پیشرفت فناوری در زمینه سیستم های نیمه رسانا و همچنین امکان تولید سویچ های کنترل شونده در قدرتها و فرکانس های بالا، مبدل های الکترونیک قدرت کنترل شونده برای اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه سراسری بسیار مورد توجه قرار گرفتند. این مبدل ها قادر هستند تا با تبادل توان کنترل شده با شبکه، پایداری منابع تولید پراکنده را افزایش داده و حتی به بهبود کیفیت توان شبکه اصلی نیز کمک کنند. همچنین این مبدل های الکترونیک قدرت واسط قادر هستند با تنظیم توان تزریق شده به شبکه، شرایط عملکرد بهینه ای را برای منابع خود فراهم کنند [۸]. به عنوان مثال این مبدل ها امکان اجرای الگوریتم های تعقیب نقطه توان حداکثر (MPPT) را در سیستم های فتوولتائیک و توربین های بادی فراهم می آورند [۶]. منابع انرژی تجدید پذیر مانند سلول های خورشیدی و پیل های سوختی عموماً در ولتاژ پایین کار می کنند (۲۵~۵۰V). برای کاربردهایی مانند شبکه های توزیع بدلیل ضرورت افزایش ولتاژ توسط مبدل های الکترونیک قدرت، راندمان کاهش می یابد [۸-۹].

مطالعات نشان می دهد که کاهش تلفات و افزایش راندمان مبدل های DC-DC در کاربردهای منابع تولید انرژی پراکنده علی الخصوص سیستم های فتوولتائیک از اهمیت ویژه ای برخوردار است. دلیل این امر پایین بودن ولتاژ تولیدی توسط این منابع می باشد که جهت تامین توان مورد نیاز مصارف می بایستی توسط مبدل های DC-DC به سطوح ولتاژ بالایی تبدیل شوند، لذا با توجه به محدود بودن توان تولیدی این منابع ضروریست مبدل های مورد استفاده در آنها ضمن داشتن گین ولتاژ بالا از تلفات پایینی برخوردار باشد [۱۰]. در این راستا مطالعاتی صورت گرفته است که در آنها یک یا چند روش جهت رسیدن به ولتاژ خروجی بالا در خروجی مبدل ارایه شده

حالت کاری اول

مسیرهای جریان در این مد کاری در شکل ۲ نمایش داده شده است. کلید S روشن و دیودهای D_1, D_2 و D_4 خاموش هستند ولی D_3 هدایت می‌کند. مطابق مدار، منبع ورودی و خازن C_2 سبب شارژ سلف L_{in} می‌گردد و جریان آن به صورت خطی افزایش می‌یابد. با اعمال قانون kvl در حلقه‌ای که شامل خازن C_3 ، دیود D_3 ، خازن C_5 و C_2 است رابطه زیر بدست می‌آید. همچنین خازن C_1 سبب شارژ سلف مغناطیس کنندگی و سلف نشتی L_{lk} می‌گردد.

$$V_{Lin} = V_{in} + V_{C2} \quad (1)$$

$$V_{Lp} = V_{C1} \quad (2)$$

$$V_{Lm} = \frac{L_m}{L_m + L_k} V_{C1} = k V_{C1} \quad (3)$$

$$V_{Llk} = V_{C1} - V_{Lm} = (1 - k) V_{C1} \quad (4)$$

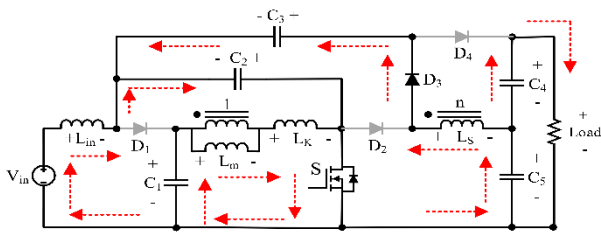
$$V_{Ls} = V_{C3} - V_{C2} - V_{C5} \quad (5)$$

در این روابط $n = N_p / N_s$ ضریب تبدیل سلف تزویج است و همچنین ضریب تزویج به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$k = \frac{L_m}{L_m + L_k} \quad (6)$$

همچنین ولتاژ ثانویه سلف تزویج به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{Ls} = n V_{Lm} = nk V_{C1} \quad (7)$$



شکل ۲. حالت کاری اول مبدل پیشنهادی

حالت کاری دوم

این بازه بسیار کوچک بوده و در محاسبات مداری قابل صرف نظر کردن می‌باشد. وقتی کلید S خاموش می‌گردد، سلف L_{lk} به صورت لحظه‌ای شروع به کاهش می‌کند و جریان ثانویه I_{ns} کاهش می‌یابد. همچنین دیودهای D_1 و D_4 شروع به هدایت کرده و دیود D_3 زمانیکه به I_{Lk} رسیده، به صورت طبیعی خاموش می‌گردد و این بازه به اتمام می‌رسد.

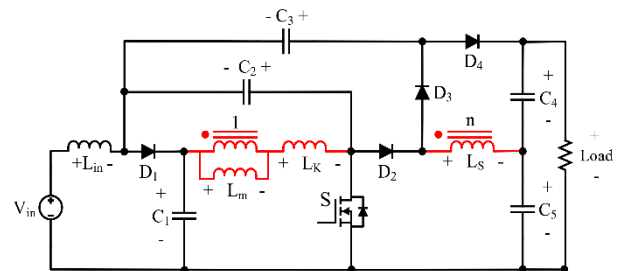
حالت کاری سوم

در این حالت کلید S خاموش است و دیودهای D_1, D_2 و D_4 روشن هستند که در شکل ۳ مدار معادل این حالت نمایش داده شده است. منبع ورودی و اندوکتانس ورودی L_{in} خازن C_1 را شارژ می‌کند.

است [۲-۵]. این روشها عبارتند از: ۱. افزایش ولتاژ DC با استفاده از ترانسفورماتور فرکانس بالا ۲. استفاده از سلف تزویج برای بازیابی انرژی ذخیره شده در اندوکتانس مغناطیسی هسته برای افزایش سطح ولتاژ با استفاده از نسبت تبدیل سلف تزویج. ۳. مدار حلقه اکتیو و پسیو برای بازیابی انرژی نشتی در سلف تزویج بر اساس گین بالای مبدلها برای کاهش تلفات در اندوکتانس نشتی. مبدلهای مبتنی بر ترانسفورماتور فرکانس بالا مبدل ساده ای با قابلیت کنترل آسان می باشد که جهت دست یابی به بهره بالای ولتاژ استفاده می شود [۱۰]. عیب عمده این نوع مبدلها، جرقه در دو سر سویچ (با توجه به اندوکتانس نشتی) و ریلپهای بزرگ جریان در سمت اولیه ترانس می باشد، بطوریکه نسبت تبدیل در ترانسفورماتور فرکانس بالا افزایش می یابد. سیستمهای ایزوله نسبتاً گران قیمت بوده و عموماً راندمان پایینی دارند. از مزایای این مبدلها ایمنی بالا و رفع مسائلی مانند جریان نشتی به زمین و توانایی ارایه خروجی های متعدد را می توان نام برد. بسیاری از مبدلهای غیر ایزوله DC-DC با استفاده از سلف تزویج نسبت به مبدلهای مبتنی بر ترانسفورماتور فرکانس بالا قابلیت بهتری جهت رسیدن به بهره ولتاژ بالا دارند. از دیگر مزایای این نوع مبدلها نسبت به مبدلهای ایزوله، کاهش استرس جریان، استفاده از قطعات با Rate پایین و ساختار ساده سیم پیچ می باشد [۱۰]. یک مشکل عمده این نوع سیستم ها، اندوکتانس نشتی بالای سلف تزویج می باشد که موجب ایجاد اسپایک ولتاژ در سویچ اصلی در زمان خاموش بودن و اسپایک جریان در زمان روشن بودن می شود. نتایج بدست آمده در برخی مراجع [۱۰]، راندمان اینگونه مبدلها را تا ۹۶٪ بیان می نماید. گین ۱۰ برابری ولتاژ نیز از دیگر نتایج مهم بدست آمده از این مبدلها است.

بررسی ساختار

ساختار مبدل dc/dc بررسی شده در شکل ۱ نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود مبدل از یک شبکه QZ-Source شامل L_{in} ، C_1 و C_2 ، یک کلید S، یک دیود D_1 و یک سلول چندبرابرکننده براساس سلفهای تزویج تشکیل شده است. این ساختار دارای ۴ حالت کاری است. برای سادگی تحلیل المانها ایده آل فرض می‌شود. سلف ها، خازن ها و مقاومت ها خطی فرض شده و خازن ها به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده اند که ولتاژ آنها تقریباً ثابت فرض شده است. منحنی های خروجی در شکل ۴ نمایش داده شده است. در ادامه تحلیل مبدل در حالت های مختلف بررسی می‌شود.



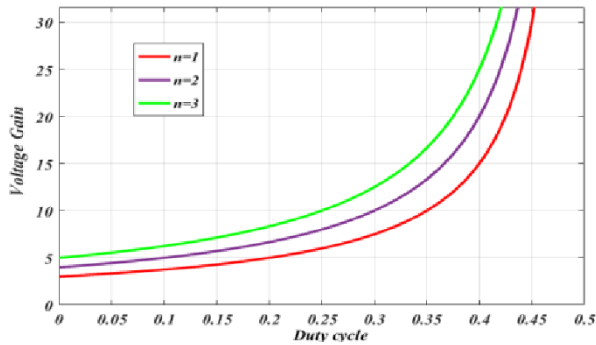
شکل ۱: مبدل پیشنهادی بهره بالا



$$V_{C4} = \frac{1+n-nD}{1-2D} V_i \quad (15)$$

$$V_{C5} = \frac{nD+1}{1-2D} V_i \quad (16)$$

شکل ۵ منحنی بهره به ازای n های مختلف را نشان می دهد. مشاهده می گردد که با افزایش n در D های یکسان بهره بالاتر ایجاد می شود. همچنین D بایستی زیر 0.5 باشد. زیرا سبب ناپایداری سیستم می شد.



شکل ۵. منحنی بهره به ازای n های مختلف

همچنین با اعمال قانون تعادل آمپر ثانیه روی خازن های C_1 تا C_5

داریم:

$$I_{in} = \frac{2+n}{1-2D} I_o = I_{Lm} \quad (17)$$

نتایج

شبیه سازی در نرم افزار MATLAB و محیط سیمولینک صورت گرفته است. این نتایج برای صحت سنجی عملکرد مبدل پیشنهادی ارائه می شود. ساختار می تواند بهره بالایی را ایجاد کند. پارامترهای شبیه سازی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای شبیه سازی

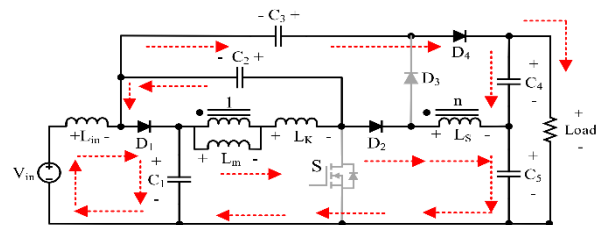
| پارامتر | مقدار |
|---------------------|---------------------------------|
| ولتاژ ورودی | ۶۴ ولت |
| دیوتی سایکل D | ۳۰ درصد |
| سلف L_{in} | ۱ میلی هانری |
| سلف L_k و L_m | ۳۰۰ میکرو هانری و ۳ میکرو هانری |
| خازن C_1 تا C_5 | ۴۷۰ میکرو فاراد |
| خازن C_0 | ۴۰۰ میکرو فاراد |
| بار خروجی | ۳۰۰ اهم |

سلف مغناطیس کنندگی L_m و سلف نشتی L_k از طریق خازن C_2 و دیود D_1 دشارژ می شوند. در این حالت روابط مداری زیر برقرار است:

$$V_{Lm} = V_{in} - V_{C1} \quad (8)$$

$$V_{Lp} = -V_{C2} \quad (9)$$

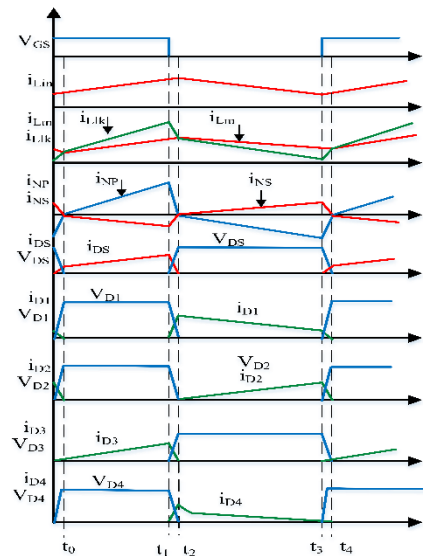
$$V_{Ls} = nV_{Lm} = -nkV_{C2} \quad (10)$$



شکل ۳. حالت کاری سوم مبدل پیشنهادی

حالت کاری چهارم

در این بازه، دیود D_3 شروع به هدایت کرده و دیودهای D_1 و D_2 و D_4 همچنان خاموش هستند. بدلیل اینکه $i_{Lk} < i_{Lm}$ می باشد، i_{NS} شروع به کاهش می کند. زمانی که $i_{Lm} = i_{Lk}$ شود، این بازه تمام می گردد. بدلیل اینکه مدت این بازه کوتاه است، در محاسبات لحاظ نمی گردد.



شکل ۴. منحنی های خروجی مبدل پیشنهادی بهره بالا

با اعمال قانون تعادل ولت ثانیه روی سلف های L_m ، L_k و L_{in} روابط زیر ایجاد می گردد.

$$V_o = \frac{2+n}{1-2D} V_i \quad (11)$$

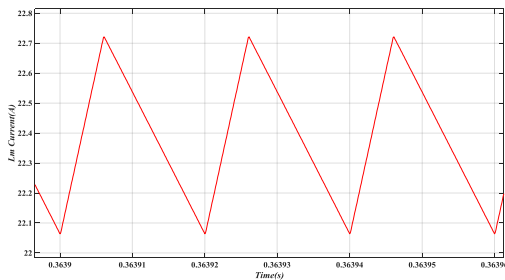
$$V_{C1} = \frac{1-D}{1-2D} V_i \quad (12)$$

$$V_{C2} = \frac{D}{1-2D} V_i \quad (13)$$

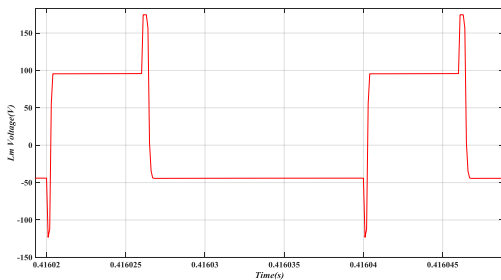
$$V_{C3} = \frac{1+n+D}{1-2D} V_i \quad (14)$$

شکل ۸. جریان L_{in}

شکل ۹ جریان I_{lm} را نمایش می دهد. مشاهده می گردد که متوسط جریان ورودی و سلف L_m با هم برابر است.


 شکل ۹. جریان L_m

شکل ۱۰ ولتاژ روی سلف مغناطیس کنندگی را نمایش می دهد. علت ایجاد اسپایک روی ولتاژ وجود سلف نشتی است. در حالت کلید وصل ولتاژ این سلف برابر ولتاژ خازن C_1 و در قطع برابر ولتاژ خازن C_2 می باشد.


 شکل ۱۰. ولتاژ L_m

شکل ۱۱ تا شکل ۱۵ ولتاژ خازن C_1 تا C_5 را نشان می دهد. با کمک روابط زیر ولتاژ این خازن ها محاسبه می شود:

$$V_{C1} = \frac{1-D}{1-2D} V_i = \frac{1-0.3}{1-2 \times 0.3} \times 64 = 112V \quad (20)$$

$$V_{C2} = \frac{D}{1-2D} V_i = \frac{0.3}{1-2 \times 0.3} \times 64 = 48V \quad (21)$$

$$V_{C3} = \frac{1+n+D}{1-2D} V_i = \frac{1+2+0.3}{1-2 \times 0.3} \times 64 = 528V \quad (22-0)$$

$$V_{C4} = \frac{1+n-nD}{1-2D} V_i = \frac{1+2-0.3}{1-2 \times 0.3} \times 64 = 432V \quad (23-0)$$

$$V_{C5} = \frac{nD+1}{1-2D} V_i = \frac{2 \times 0.3 + 1}{1-2 \times 0.3} \times 64 = 256V \quad (24)$$

علت وجود اختلاف نبود توزیع کامل می باشد.

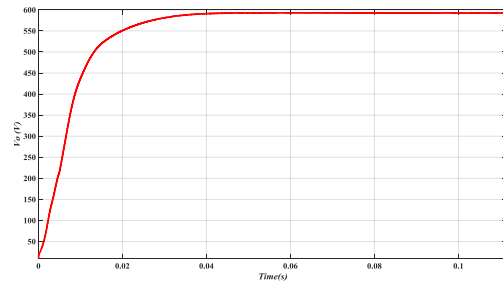
۵۰ کیلوهرتز

فرکانس کلیدزنی

ولتاژ خروجی با رابطه زیر تعیین می شود:

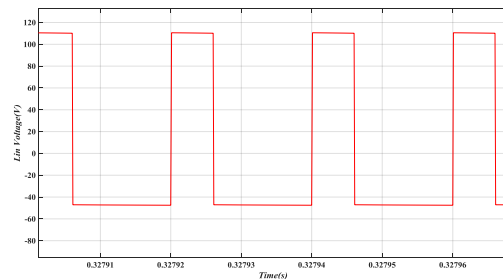
$$V_o = \frac{2+n}{1-2D} V_i = \frac{2+2}{1-2 \times 0.3} \times 64 = 640V \quad (18)$$

شکل ۶ ولتاژ خروجی را نشان می دهد که دارای مقدار حدودی ۵۹۰ ولت می باشد. علت ایجاد اختلاف بین نتایج شبیه سازی و تئوری وجود تلفات و سلف نشتی است.



شکل ۶. ولتاژ خروجی

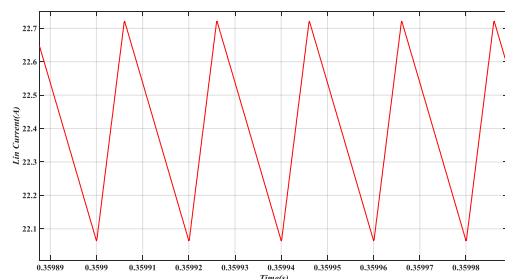
شکل ۷ ولتاژ سلف L_{in} را نمایش می دهد. در حالت وصل کلید مجموع ولتاژ ورودی و خازن C_2 که برابر ۱۱۰ ولت است و در حالت قطع کلید اختلاف ولتاژ ورودی و خازن C_1 که برابر ۴۵- ولت است روی آن می افتد.


 شکل ۷. ولتاژ L_{in}

بنابراین در حالت وصل کلید سلف L_{in} شارژ و در حالت قطع دشارژ می گردد. متوسط جریان نیز بایستی برابر باشد با:

$$I_{in} = \frac{2+n}{1-2D} I_o = \frac{2+2}{1-2 \times 0.3} \times \frac{640}{300} = 21.3A \quad (19)$$

شکل ۸ جریان ورودی را نمایش می دهد که حدود ۲۲ آمپر جریان و ۰/۶ آمپر ریپل دارد.

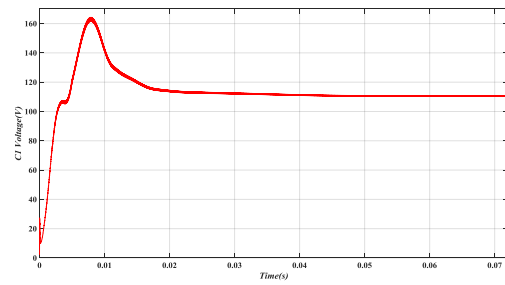




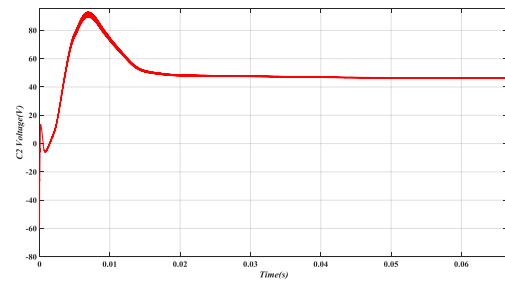
شکل ۱۶ تا شکل ۲۳ جریان گذرنده از کلیدها و دیودها و ولتاژ آنها رو نمایش می‌دهد.

جدول ۲. محاسبه استرس المانها

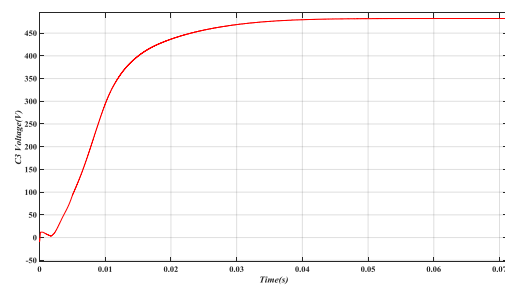
| ولتاژ و جریان | المان |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| $V_{D1} = \frac{1}{1-2 \times 0.3} \times 64 = 160V$ $I_{D1} = \frac{(2+2) \times 0.3}{(1-0.3)(1-2 \times 0.3)} \times \frac{640}{300} = 9.14A$ | دیود D1 |
| $V_{D2} = \frac{3}{1-2 \times 0.3} \times 64 = 480V$ $I_{D2} = \frac{1}{(1-0.3)} \times \frac{640}{300} = 3.04A$ | دیود D2 |
| $V_{D3} = \frac{3}{1-2 \times 0.3} \times 64 = 480V$ $I_{D3} = \frac{1}{0.3} \times \frac{640}{300} = 7.11A$ | دیود D3 |
| $V_{D4} = \frac{1}{1-2 \times 0.3} \times 64 = 160V$ $I_{D4} = \frac{1}{(1-0.3)} \times \frac{640}{300} = 3.04A$ | دیود D4 |
| $V_s = \frac{1}{1-2 \times 0.3} \times 64 = 160V$ $I_s = \frac{1+2 \times 0.3(2+1)}{0.3(1-2 \times 0.3)} \times \frac{640}{300} = 49.77A$ | کلید S |



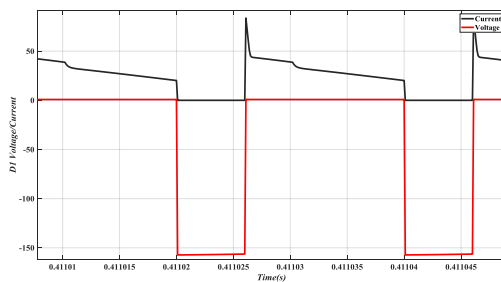
شکل ۱۱. ولتاژ خازن C₁



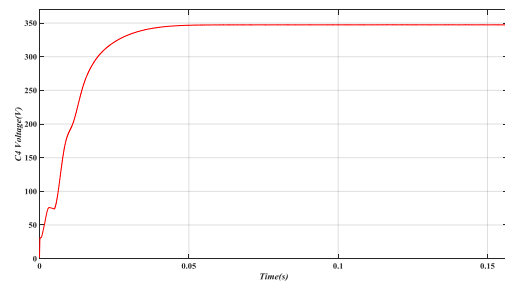
شکل ۱۲. ولتاژ خازن C₂



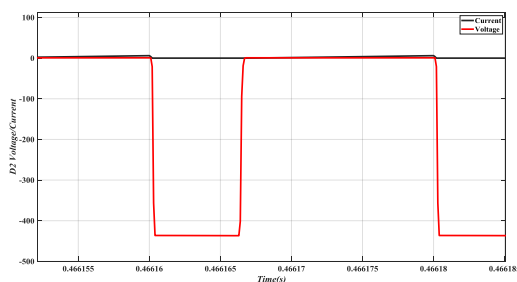
شکل ۱۳. ولتاژ خازن C₃



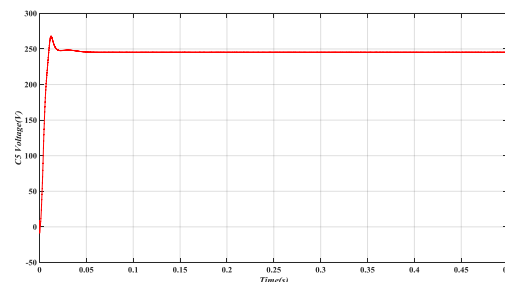
شکل ۱۶. جریان و ولتاژ دیود D₁



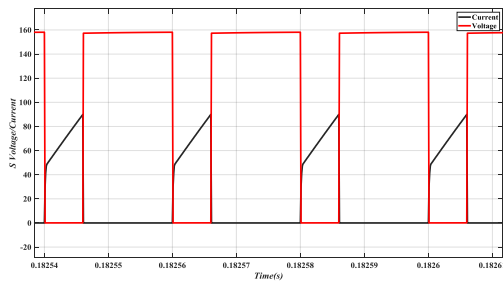
شکل ۱۴. ولتاژ خازن C₄



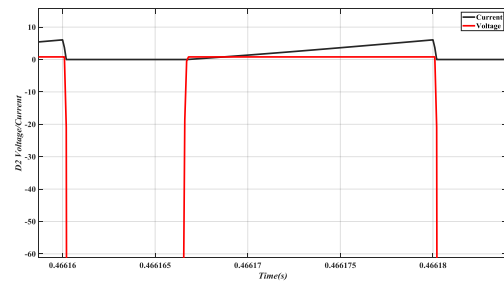
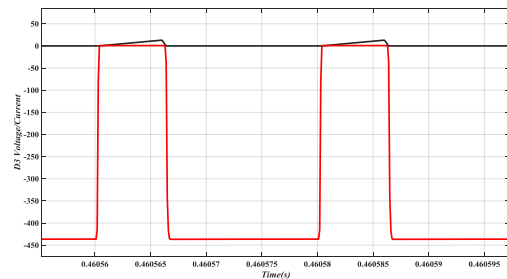
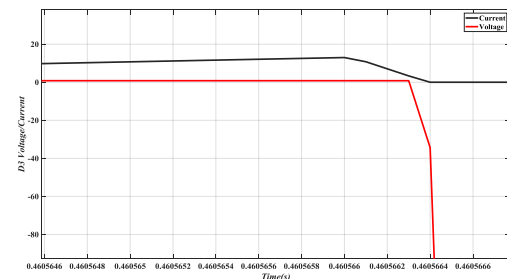
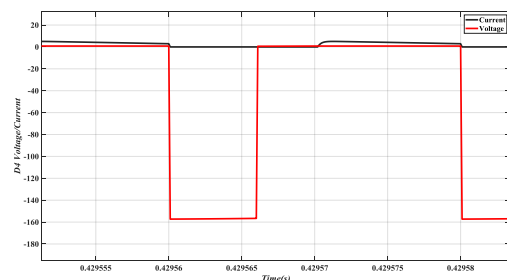
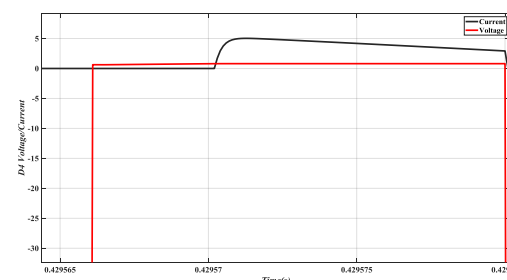
شکل ۱۷. جریان و ولتاژ دیود D₂



شکل ۱۵. ولتاژ خازن C₅



شکل ۲۳. جریان و ولتاژ سویچ S

شکل ۱۸. جریان و ولتاژ دیود D₂شکل ۱۹. جریان و ولتاژ دیود D₃شکل ۲۰. جریان و ولتاژ دیود D₃شکل ۲۱. جریان و ولتاژ دیود D₄شکل ۲۲. جریان و ولتاژ دیود D₄

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به مسایل زیست محیطی، حضور منابع تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشیدی روز بروز در شبکه‌ها بیشتر می‌گردد. یکی از مشکلات بهره‌برداری از این منابع انتخاب واسط الکترونیک قدرت مناسب می‌باشد. در انتخاب مبدل الکترونیک قدرت (dc/dc) موارد ذیل بایستی مورد توجه قرار گیرد: کاهش تعداد کلیدهای الکترونیک قدرت، کاهش تعداد مدارهای درایو کلیدهای الکترونیک قدرت، افزایش بهره ولتاژ، افزایش قابلیت اطمینان، سادگی در پیاده سازی، افزایش راندمان. در این مقاله با از یک مبدل بهره بالا dc/dc استفاده شد و بهره بالایی نیز بدست آمد. برای اثبات صحت عملکرد سیستم شبیه سازی زمانی در نرم افزار MATLAB/Simulink صورت گرفته که نتایج صحت عملکرد مبدل مورد تایید قرار داد.

مراجع

- [1] W. Li, and X. He, "Review of Non-isolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 4, pp. 1239-1250, April 2011.
- [2] K. W. Ma and Y. S. Lee, "An integrated fly-back converter for dcuninterruptible power supply," IEEE Trans. Power Electron., vol. 11, pp. 318-327, March 1996
- [3] Q. Zhao and F. C. Lee, "High-efficiency, high step-up dc-dcconverters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 18, no. 1, pp. 65-73, Jan. 2003.
- [4] G. C. Silveira, F. L. Tofoli, L. D. S. Bezerra and R. P. Torrico-Bascope, "A Nonisolated DC-DC Boost Converter With High VoltageGain and Balanced Output Voltage," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 12, pp. 6739-6746, Dec. 2014
- [5] C. T. Pan, C. F. Chuang and C. C. Chu "A Novel Transformer-lessAdaptable Voltage Quadrupler DC Converter with Low Switch Voltage Stress", IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 9, pp.4787-4796, Sept. 2014.
- [6] J. H. Lee, T. J. Liang and J. F. Chen, "Isolated Coupled-Inductor- Integrated DC-DC Converter With NondissipativeSnubber for Solar Energy Applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 7, pp. 3337-3348, July 2014.
- [7] M. Das and V. Agarwal, "A novel, high efficiency, high gain, front end DC-DC converter for low input



- Energy Applications Requiring High Voltage Gain”, “IEEE Transactions on Industrial Electronics”, November 22, 2015.
- [10] Moumita Das; Vivek Agarwal, “Design and Analysis of a High-Efficiency DC–DC Converter With Soft Switching Capability for Renewable Energy Applications Requiring High Voltage Gain”, “IEEE Transactions on Industrial Electronics”, (Volume: 63, Issue: 5, May 2016), Page(s): 2936 – 2944.
- voltage solar photovoltaic applications," in Proc. IEEE IECON, pp.5744-5749, 25th-28th Oct. 2012.
- [8] Power Electronics / A First Course /NED MOHAN / Oscar A. Schott Professor of Power Electronics and Systems Department of Electrical and Computer Engineering University of Minnesota Minneapolis, MN USA
- [9] Moumita Das; Vivek Agarwal, “Design and Analysis of a High-Efficiency DC– DC Converter with Soft-Switching Capability for Renewable

ACEC2020-93194

بادسنجی و تحلیل پتانسیل انرژی باد در منطقه رفسنجان از استان کرمان

مریم معین الدینی^۱، سیدعبدالرضا گنجعلیخان^۲

^۱ کارشناس ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ m.moeinadini@empl.uk.ac.ir

^۲ استاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ ganj110@uk.ac.ir

چکیده

رفسنجان یکی از شهرستانهای واقع در استان کرمان بوده که بدلیل داشتن باغات گسترده پسته از اهمیت اقتصادی زیادی در کشور و در کل جهان برخوردار می باشد. با توجه به بادخیز بودن منطقه، استفاده از انرژی باد جهت تولید الکتریسیته می تواند جایگزین بسیار مناسبی بجای موتورهای دیزل مورد استفاده در مزارع باشد. در این مقاله بمنظور امکان سنجی احداث نیروگاههای بادی، از داده های پنج ساله سرعت باد که با پروندههای سه ساعته در طول شبانه روز بدست آمده است؛ برای تعیین چگالی انرژی باد و دیگر مشخصات باد ناحیه مورد نظر استفاده شده و تابع احتمال باد از طریق تعیین پارامترهای تابع ویبول و رایلی مشخص گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می دهند که این توابع به طور نسبتاً مطلوبی داده های اندازه گیری شده را برازش نموده و مقدار چگالی انرژی باد محاسبه شده در منطقه، نشان دهنده وجود شرایط مناسب جهت نصب نیروگاه بادی با توجه به ضرورت امر می باشد.

واژه های کلیدی: انرژی باد، نیروگاه بادی، توابع رایلی و ویبول

مقدمه

انرژی باد در حال حاضر به عنوان یک منبع سرشار و تجدید پذیر مورد توجه بسیاری از کشورهای جهان بمنظور تولید برق قرار گرفته است. امروزه استفاده از توربین های بادی به عنوان مولد انرژی الکتریسیته در مناطق بادخیز کشورهای مختلف به یک فرآیند کاملاً تجاری و اجتناب ناپذیر تبدیل شده است. باد به عنوان یک منبع انرژی پاک و رایگان محسوب می شود اما از آنجا که دانسیته هوا کم است بنابراین حجم عظیمی از این سیال جهت تولید انرژی مورد نیاز می باشد. لذا شناخت دقیق پارامترهای باد در یک منطقه خاص جغرافیایی از اهمیت خاصی برخوردار است.

قدم اول در طراحی و ساخت یک نیروگاه بادی جمع آوری اطلاعات باد در مناطق مستعد و سپس آنالیز این اطلاعات با استفاده از روشهای آماری معمول می باشد. این روشها شامل گستره وسیعی از

تئوریهای موجود در زمینه تحلیل آماری است. تاکنون تحقیقات بسیاری در دنیا جهت مدلسازی داده های باد به گونه ای که با واقعیت تطابق داشته باشد انجام رسیده است [۱-۳]. هدف اصلی تمامی این مطالعات، خلاصه سازی داده های باد و بیان آنها بر اساس چند پارامتر اصلی و استخراج معیارهایی برای بدست آوردن هزینه و میزان تولید انرژی الکتریکی بادی می باشد.

بدیهی است که برای تعیین دقیق رفتار باد، نیاز به اطلاعات بسیاری شامل سرعت باد و جهت آن بوده که آنالیز این اطلاعات بجز از طریق تهیه و اجرای کد کامپیوتری انجام پذیر نمی باشد. در حال حاضر نرم افزارهایی در زمینه تحلیل داده های انرژی باد نظیر Winpro, WasP, Wind farm در دنیا، مورد استفاده قرار می گیرند. اکثر این نرم افزارها چند منظوره بوده و استخراج نتایج مورد نظر از آنها کار ساده ای نیست. در کار حاضر بمنظور آنالیز اطلاعات مربوط به رفتار باد در منطقه رفسنجان کرمان با نوشتن یک کد کامپیوتری اقدام به این کار شده است. دلیل انتخاب منطقه رفسنجان، اهمیت اقتصادی بسیار زیاد این منطقه و ضرورت بسیار بالای وجود نیروگاههای بادی کوچک بمنظور تامین انرژی الکتریکی مورد استفاده در باغات پسته می باشد. در حال حاضر در بسیاری از این مزارع از موتورهای دیزل با حداقل توان 100 Kw بمنظور آبکشی استفاده می شود که علاوه بر مسئله آلودگی هوا، مشکلات عدیده دیگری را نیز بدنبال دارد و کشاورزان اکثراً از وضعیت سوخت رسانی ناراضی اند، چرا که نقل و انتقال سوخت به دیزلها همواره با مشکل روبروست و بدلیل نامناسب بودن وضعیت راهها هزینه سوخت برای کشاورزان بسیار بالاست. داده های بدست آمده در مورد سرعت باد منطقه نشان می دهد که وزش باد در اوایل فروردین ماه شروع شده و در فصل تابستان به اوج خود می رسد و مجدداً در اواخر پاییز رو به کاهش می گذارد و این دقیقاً زمانی است که کشاورزان بیشترین نیاز به آبیاری مزارع خود را دارند، بنابراین پمپاژ چاههای آب کشاورزی موجود در منطقه را، در صورت داشتن پتانسیل مناسب می توان از طریق توربین های بادی انجام داد.

رده سرعت تعیین شده است. لازم به ذکر است بدلیل تراکم زیاد سرعتها در محدوده ۴ تا ۶ متر بر ثانیه در این فاصله دو رده سرعت در نظر گرفته شده است. با استفاده از داده های جدول ۱، سرعت متوسط و انحراف معیار را می توان از روابط زیر بدست آورد.

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i v_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (5)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N f_i (v_i - \bar{v})^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

جدول ۱: فراوانی سرعتهای باد اندازه گیری شده در مدت ۵ سال با پروود ۳ ساعتی

| i | v m/s | v _i m/s | f _i | p(v _i) % |
|----|----------|-----------------------|----------------|-------------------------|
| ۱ | ۰-۲ | ۱ | ۱۹۹۸ | ۱۳/۷ |
| ۲ | ۲-۴ | ۳ | ۲۳۶۹ | ۱۶/۲ |
| ۳ | ۴-۵ | ۴/۵ | ۳۰۸۷ | ۲۱/۱ |
| ۴ | ۵-۶ | ۵/۵ | ۲۸۱۹ | ۱۹/۳ |
| ۵ | ۶-۸ | ۷ | ۲۰۷۷ | ۱۴/۲ |
| ۶ | ۸-۱۰ | ۹ | ۱۰۳۹ | ۷/۱ |
| ۷ | ۱۰-۱۲ | ۱۱ | ۵۵۲ | ۳/۷ |
| ۸ | ۱۲-۱۴ | ۱۳ | ۲۹۸ | ۲/۱ |
| ۹ | ۱۴-۱۶ | ۱۵ | ۱۹۰ | ۱/۳ |
| ۱۰ | ۱۶-۱۸ | ۱۷ | ۱۱۲ | .۸ |
| ۱۱ | ۱۸-۲۰ | ۱۹ | ۵۹ | .۴ |

| C | k | v _{mec} | v _{mp} | \bar{v} | v _{mean} | p _a / A |
|-----|----|------------------|-----------------|-----------|-------------------|--------------------|
| /۲۶ | ۴۵ | ۴/۷۶ | /۴ | /۴۳ | /۷۶ | ۱۸۴ |
| ۵ | ۱/ | | ۲ | ۵ | ۴ | |

در ستون پنجم جدول ۱، درصد احتمال هر کدام از سرعت های v_i از رابطه (۴) محاسبه و آورده شده است. مقادیر تابع احتمال تجمعی نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$P(v_j) = \sum_{i=1}^j p(v_i) \quad (7)$$

که در این معادله j و p(v_i) احتمال هر کدام از سرعت های v_i برای i=1,2,3,...,N می باشد. از تابع احتمال تجمعی می توان برای بدست آوردن مدت زمان بهره برداری یک توربین بادی در طول سال استفاده نمود. برای تخمین و مدلسازی تابع احتمال باد که بصورت یک تابع پیوسته بتواند رفتار باد را مشخص نماید؛ از چند تابع توزیع می توان استفاده نمود که از جمله رایج ترین و دقیق ترین آنها که جهت برازش رفتار باد قابلیت خوبی دارد تابع احتمال ویبول (Weibull) و تابع احتمال رایلی (Rayleigh) می باشند که بعنوان یک مدل ریاضی در شرایط داده های مناسب (اندازه گیری در

در مطالعه حاضر، داده های مربوط به سرعت باد که در فواصل سه ساعته در شبانه روز اندازه گیری شده اند و در طول ۵ سال اخیر مداومت داشته، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهند که برازش داده های سرعت باد در حد قابل قبولی، با توابع توزیع بکار گرفته شده انطباق دارد، بطوریکه پتانسیل بالایی برای انرژی باد منطقه پیش بینی می شود.

تئوری آماری سرعت باد

بمنظور بررسی رفتار باد در یک منطقه تعیین تابع احتمال باد با استفاده از داده های اندازه گیری شده ضروری است. چنانچه فرض شود p(v) چنین تابعی است خواهیم داشت:

$$\int_0^{\infty} p(v) dv = 1 \quad (1)$$

که v سرعت باد و بر حسب m/s می باشد. با داشتن تابع احتمال p(v) می توان احتمال اینکه سرعت باد در حد قابل قبول برای برپایی نیروگاههای بادی (5m/s < v < 20m/s) باشد را از رابطه زیر بدست آورد:

$$p(v_1 < v < v_2) = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv \quad (2)$$

مقدار چگالی انرژی باد بر واحد سطح که ناشی از انرژی جنبشی جریان هوا می باشد برابر خواهد بود با:

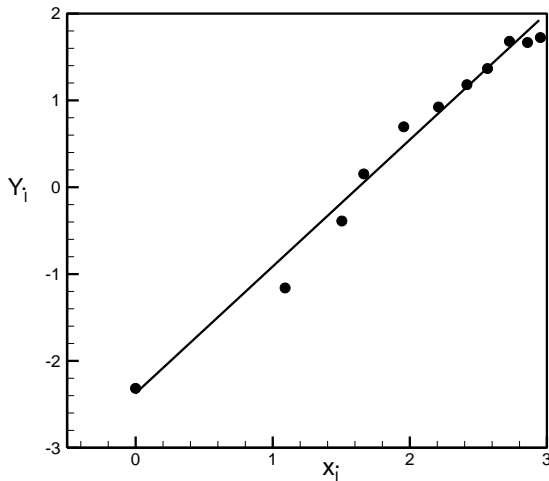
$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 p(v) dv \quad (3)$$

توانی که از رابطه فوق محاسبه می شود کل توانی است که در جریان باد موجود است. بدیهی است که بخشی از این انرژی به صورت انرژی مکانیکی در شافت خروجی توربین تبدیل می شود، محاسبات بعمل آمده نشان دهنده مقداری در حدود ۵۰٪ برای این نسبت است [۲]. به علت تغییرات پیوسته سرعت باد با زمان، لازم است که در مقاطع زمانی مشخص، اندازه گیری توسط دستگاه ثبات انجام پذیرد. بدین ترتیب سرعت باد در هر لحظه مشخص شده و با مطالعه آن می توان سرعت حداقل، حداکثر، سرعت متوسط و دیگر رفتار آماری باد را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. معمولاً برای تعیین رفتار باد و اعمال آنالیزهای آماری، چند رده سرعت را در نظر می گیرند؛ بطوریکه در کار حاضر محدوده سرعت بین صفر تا ۲ متر بر ثانیه بعنوان رده اول و در نهایت محدوده سرعت بین ۱۸ تا ۲۰ متر بر ثانیه بعنوان رده یازدهم سرعت در نظر گرفته شده است.

اگر تعداد رده های سرعت N و فراوانی هر کدام از رده ها f_i, i=1,2,3,...,N باشد تابع احتمال هر کدام از رده های سرعت از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$p(v_i) = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} = \frac{f_i}{n} \quad (i=1,2,3,\dots,N) \quad (4)$$

که در رابطه فوق n تعداد کل داده های اندازه گیری شده و v_i میانگین سرعت مربوط به هر رده می باشد. در جدول ۱، فراوانی f_i مربوط به ۱۴۶۰۰ داده بدست آمده در طی پنج سال متوالی، برای هر


 شکل ۱: چگونگی پراکندگی متغیرهای X_i و Y_i

یکی از مهمترین مشخصه های باد، چگالی میانگین انرژی آن می باشد. برای محاسبه چگالی میانگین انرژی بر واحد سطح می توان از رابطه زیر استفاده نمود.

$$\frac{P_a}{A} = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 p(v) dv \quad (15)$$

بعد از انتگرال گیری از تابع احتمال ویبول خواهیم داشت:

$$\frac{P_a}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (16)$$

که در اینجا c و k پارامترهای تابع ویبول و Γ تابع گاما می باشد. در صورت مشخص بودن پارامترهای تابع ویبول باد منطقه، می توان مشخصه های بسیار مهمی از قبیل سرعت متوسط V_{mean} ، محتمل ترین سرعت باد منطقه v_{mp} و سرعتی که حداکثر انرژی را برای توربین دارد v_{mec} ، را بصورت زیر محاسبه نمود [۴].

$$v_{mean} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (17)$$

$$v_{mp} = c \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{1/k} \quad (18)$$

$$v_{mec} = c \left(1 + \frac{2}{k}\right)^{1/k} \quad (19)$$

که این پارامترها، در انتخاب نوع توربین باد برای هر منطقه مورد نیاز می باشند.

نتایج

سرعت وزش باد در فواصل سه ساعته به مدت ۵ سال متوالی در منطقه رفسنجان کرمان توسط بادسنج اندازه گیری شده است و اطلاعات آن که شامل ۱۴۶۰۰ داده می باشد، بصورت فایل ورودی در اختیار کد کامپیوتری که توسط نویسندگان مقاله تهیه شده قرار گرفته است. نمودارهای مورد نظر و مقادیر سرعت و توان متوسط باد با استفاده از توابع ویبول و رایلی محاسبه گردیده است.

پریودهای کوتاه و طی مدت زمان طولانی) به شکل تابع قابل قبولی می تواند بر اطلاعات باد منطبق شوند. تابع توزیع ویبول به صورت زیر تعریف می گردد:

$$P_w(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (8)$$

که c و k به ترتیب پارامترهای تماس و فرم هستند [۴]. لازم بذکر است که برای $k=2$ و $c = \frac{2\bar{v}}{\sqrt{\pi}} = 1.284\bar{v}$ این تابع به فرم تابع رایلی در خواهد آمد.

$$P_r(v) \equiv \frac{\pi v}{2\bar{v}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right] \quad (9)$$

هر دو توابع توزیع احتمال ویبول و رایلی روابط مفیدی برای توجیه توزیع سرعت باد می باشند. بدیهی است که برای استفاده از تابع ویبول تعیین پارامترهای k و c لازم است که بایستی با استفاده از داده های جمع آوری شده مورد محاسبه قرار گیرند.

یکی از روشهای تعیین مقادیر k و c برازش توزیع سرعت های دیده بانی شده به روش حداقل مربعات (Method Least Square) است [۴] که در کار حاضر از این روش استفاده شده است. به این منظور از رابطه (۱) داریم:

$$\int_0^{\infty} p(v) dv = \int_0^v p(v) dv + \int_v^{\infty} p(v) dv = 1 \quad (10)$$

$$\int_v^{\infty} p(v) dv = 1 - P(v) \quad (11)$$

بعد از انتگرال گیری از تابع $p(v)$ از v تا ∞ خواهیم داشت:

$$\exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] = 1 - P(v) \quad (12)$$

که در این معادله $P(v)$ تابع احتمال تجمعی توزیع ویبول می باشد. برای خطی نمودن رابطه (۱۲) بعد از دو مرتبه لگاریتم گرفتن از طرفین خواهیم داشت:

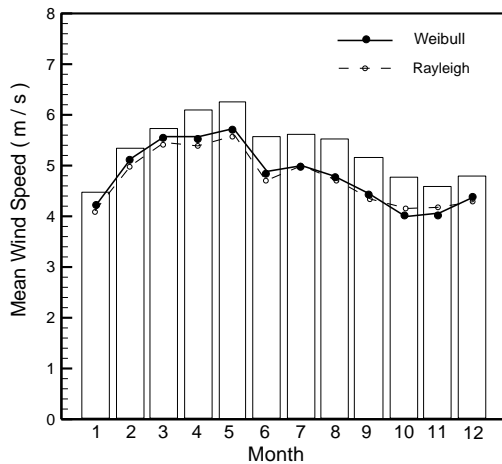
$$k \ln(v) - k \ln(c) = \ln(-\ln[1 - p(v)]) \quad (13)$$

با فرض $x = \ln(v)$ و $y = \ln(-\ln[1 - p(v)])$ رابطه فوق را می توان بصورت خطی $y = Ax + B$ نوشت که در آن $A = k$ و $B = -k \ln c$ می باشد. بدین طریق پارامترهای تابع ویبول به پارامترهای A بعنوان ضریب زاویه و B بعنوان عرض از مبدا مرتبط می شود. بدین ترتیب با داشتن مقدار سرعت میانگین هر رده v_i و تابع احتمال $P(v_i)$ مربوطه، متغیرهای x_i و y_i بدست آمده و با استفاده از روش LSQM مقادیر A و B از روابط زیر حاصل می شود [۴]:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad B = \bar{y} - A\bar{x} \quad (14)$$

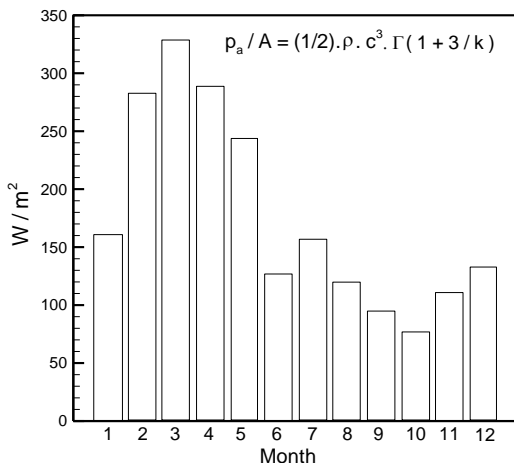
با محاسبه پارامترهای A و B می توان مقادیر ثابتهای تابع ویبول k و c را تعیین نمود.

در شکل ۱، چگونگی برازش متغیرهای x_i و y_i توسط یک خط راست که بر اساس داده های کار حاضر رسم شده نشان داده شده است که نتیجه کاملاً رضایت بخش می باشد.



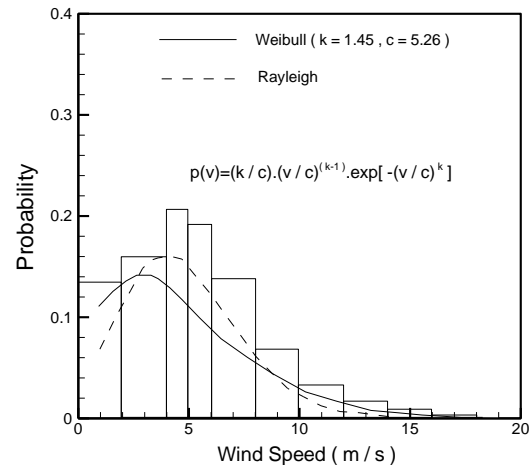
شکل ۴: توزیع ماهانه سرعت متوسط باد

سرعت متوسط باد برای ماههای مختلف سال در شکل ۴، نشان داده شده است. مقدار متوسط سرعت باد را می توان به سه طریق، از رابطه (۱۷) با استفاده از پارامترهای تابع ویبول و رایلی و همینطور از رابطه (۵) با استفاده از فراوانی داده ها محاسبه نمود. مشاهده می شود که انطباق بین نتایج ناشی از این سه روش (استفاده از تابع ویبول، رایلی و استفاده از مقادیر فراوانی باد) رضایت بخش می باشد. بعلاوه شکل مذکور نشان می دهد که بیشترین سرعت باد در مرداد ماه و در فصل تابستان با سرعت متوسط $6/2$ متر بر ثانیه و کمترین مقدار مربوط به ماه بهمن و با مقدار $4/5$ متر بر ثانیه می باشد. از این نمودار می توان برای انتخاب توربین های بادی در ماههای موردنظر استفاده نمود.



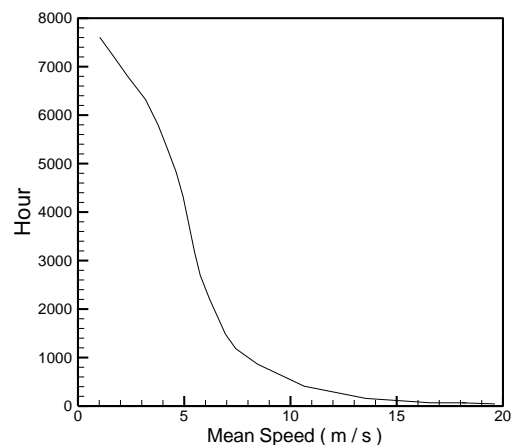
شکل ۵: توزیع ماهانه چگالی متوسط انرژی باد

در شکل ۵، بر اساس روابط مربوط به تابع توزیع احتمال ویبول، چگالی متوسط باد برای تمامی ماههای سال و بر اساس داده های پنج ساله محاسبه و بصورت نمودار ستونی نمایش داده شده است. بیشترین مقدار انرژی باد در ماه خرداد و معادل 330 W/m^2 بوده که مقدار قابل توجهی است و کمترین مقدار انرژی، مربوط به دی ماه و حدود 80 W/m^2 می باشد.



شکل ۶: توزیع احتمال باد

در شکل ۶، درصد احتمال سرعت باد برای تمامی رده های سرعت بصورت نمودارهای ستونی نمایش داده شده است و منحنی های مربوط به توزیع احتمال توسط تابع ویبول و رایلی نیز رسم شده اند. همانطور که دیده می شود این توابع با دقت قابل قبولی توانسته اند توزیع داده های جمع آوری شده در طول ۵ سال را برازش نمایند؛ بطوریکه در این ارتباط تابع رایلی موفق تر نشان می دهد. لذا می توان با استفاده از روابط مربوط به این توابع توزیع، مشخصه های باد منطقه را از جمله محتملترین سرعت، سرعت متوسط، چگالی انرژی باد منطقه و پارامترهای مشابه را که در انتخاب منطقه برای نصب نیروگاه بادی مهم می باشند مورد محاسبه و بررسی قرار داد.



شکل ۷: مداومت جریان باد

در شکل ۷، نمودار تداوم جریان باد که بمنظور تعیین مدت زمان بهره برداری یک توربین بادی در طول سال استفاده می شود نشان داده شده است. محور قائم معرف تعداد ساعات سال از صفر تا مقدار ماکزیمم ۸۷۶۰ ساعت و محور افقی نشان دهنده سرعت باد است. برای مثال شکل ۳، نشان می دهد که جریان باد بالغ بر 5000 ساعت در سال، با سرعت متوسط 5 m/s وزش دارد. لازم به توضیح است که داده های مربوط به شکل ۳، از برازش رفتار باد در کل ۵ سال عاید شده است و مربوط به سال خاصی نمی باشد.

و با توجه به اینکه بیشترین مصرف و نیاز به پمپاژ آب در خرداد ماه و اوایل تابستان است نتایج بدست آمده نشان دهنده مساعد بودن منطقه برای استفاده از انرژی باد می باشد. به عنوان مثال در صورت نصب توربین 550 Kw ساخت شرکت صبا نیرو (کشور ایران) که شعاع پره آن ۲۳ متر می باشد کل توان جریان باد عبوری از سطح جاروب شده توسط پره ها در ماه خرداد معادل است با:

$$660 \times (\pi) \times (23)^2 = 1100 \text{ Kw}$$

که با در نظر گرفتن ضریب تبدیل ۵۰٪ [۳،۲] این توربین توانی معادل توان نامی 550 Kw را خواهد داشت.

مراجع

- [1] Justus, C. G., 1978. "Methods for estimating wind speed frequency distribution". *Journal of Applied Meteorology*, 17, pp. 350-353.
- [2] Johnson, G., 1985. "Wind energy system". Prentice Hall Inc.
- [3] Jamil, M., 1994. "Wind power statistics and evaluation of wind energy density". *Journal of Wind Engineering*, 2(5), pp. 227-240.
- [4] Jamil, M., Parsa, S., and Majidi, M., 1995. "Statistical analysis of wind speed and wind power". *Journal of Renewable Energy*, 6(5/6), pp. 623-628.

قابل ذکر است که اندازه گیریهای بعمل آمده در مورد سرعت باد در ارتفاع استاندارد ۱۰ متری از سطح زمین بوده است در حالیکه نصب توربین های بادی با توانهای مختلف نظیر 250 Kw ، 550 Kw و 650 Kw در ارتفاعی بین ۵۰ تا ۶۰ متر از سطح زمین صورت می گیرد. بدیهی است که بواسطه ایجاد لایه مرزی در جریان هوا، سرعت باد با ارتفاع رشد صعودی دارد. نظر به آشفتگی بودن طبیعت جریان باد و انتخاب توزیع سرعت توانی $1/7$ که از دقت قابل قبولی برخوردار است $[\frac{u}{u_{\infty}} = (\frac{y}{\delta})^{1/7}]$ می توان داده های بدست آمده را از طریق رابطه زیر از ارتفاع ۱۰ متر به ارتفاع ۵۰ متر منتقل نمود.

$$\frac{v_{50}}{v_{10}} = \left(\frac{50}{10}\right)^{1/7} = 1.26 \quad (20)$$

و از آنجا که انرژی جریان باد با توان سوم سرعت تغییر می کند لذا در صورت نصب توربین باد در ارتفاع ۵۰ متری متوسط انرژی جریان باد در ماه خرداد و ماه دی بصورت زیر بدست می آیند:

$$\left(\frac{P_a}{A}\right)_{\max} = 330 \times (1.26)^3 = 660 \text{ W} / \text{m}^2$$
$$\left(\frac{P_a}{A}\right)_{\min} = 80 \times (1.26)^3 = 160 \text{ W} / \text{m}^2$$

ACEC2021-95268

بررسی تاثیر منابع تجدید پذیر بر هماهنگی حفاظتی شبکه توزیع

اسما سلیمانی ساردو^۱

^۱ دانشگاه جیرفت؛ a_soleimani@sbu.ac.ir

چکیده

بیشتر منابع تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های خورشیدی، پیل‌های سوختی و مزارع بادی از طریق یک رابط الکترونیک قدرت به سیستم قدرت متصل می‌شوند و با نام تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر شناخته می‌شود. اتصال این منابع موجب تغییر جریان خطا و در نتیجه عدم هماهنگی‌های حفاظتی اصلی شبکه قدرت می‌شود. این مقاله روش جدیدی را برای حذف اثر مخرب این منابع بر هماهنگی‌های حفاظتی موجود بین رله‌های دیجیتال در یک شبکه که تنها با منابع تجدید پذیر تجهیز شده است پیشنهاد می‌کند. این روش سهم جریان خطای تولیدات پراکنده را توسط رابط الکترونیک قدرت آنها به گونه‌ای مدیریت می‌کند که دستگاه‌های حفاظتی دیجیتال بتوانند آن را تشخیص داده و نادیده بگیرند. این روش به هیچ زیرساخت مخابراتی نیاز ندارد و مستقل از سطح نفوذ و مکان تولیدات پراکنده است. اثربخشی روش پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی سیستم قدرت IEEE 33-Bus در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC تأیید شده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع MV، تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر، هماهنگی حفاظتی

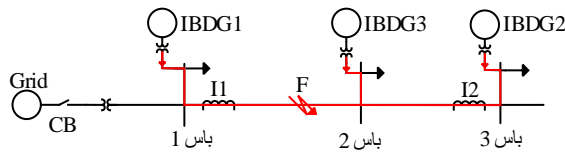
مقدمه

نفوذ تولیدات پراکنده در شبکه‌های توزیع با توجه به ذات تغییر پذیر منابع تجدیدپذیر و در نظر گرفتن قابلیت پلاگ اند پلی^۱ آنها جریان خطایی متغیر و دو جهته بوجود آورده است. این اثرات پیچیدگی سیستم‌های حفاظتی را افزایش داده و احتمال ناکارآمد شدن تنظیمات حفاظتی و بروز مشکلاتی مانند خاموشی کاذب و عدم هماهنگی بین دستگاه‌های حفاظتی را بالا برده است [۱]-[۳]. بیشتر منابع تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های خورشیدی، پیل‌های سوختی و مزارع بادی از طریق اینورتر به شبکه متصل می‌شوند و با نام تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر^۲ شناخته می‌شوند. در این بین

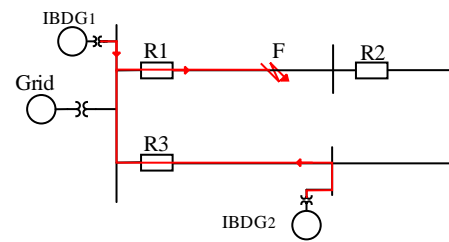
رویکرد جهانی به سمت جایگزینی سوخت‌های فسیلی با این منابع است بطوریکه برخی از کشورها به شبکه قدرت ۱۰۰٪ تجدیدپذیر نزدیک شده‌اند [۴]. در این شرایط، با وجود ظرفیت محدود جریان خطای این نوع از منابع، تأثیرات آنها بر حفاظت سیستم تبدیل به یک چالش شده است [۵، ۶]. قطع فوری IBDGها در مواجهه با خطا دیگر قابل اعتماد نیست و احتمال بوجود آمدن مشکلات سنکرونیزاسیون در عملیات قطع و وصل آنها بالا می‌رود [۷]. برای فائق آمدن بر این مشکلات، روش‌های متعددی تاکنون توسط محققان معرفی شده است. برخی از روش‌ها سعی می‌کنند با کاهش سهم جریان خطای این منابع، جریان خطای کل را به مقدار اولیه قبل از اتصال آنها به شبکه بازگردانند و از این طریق تنظیمات حفاظتی را همچنان پس از اتصال نیز حفظ کنند. استفاده از محدود کننده‌های جریان خطا یک راه حل معرفی شده در این حوزه می‌باشد [۹]-[۸]. محدود کننده‌ها جریان خروجی تولیدات پراکنده را در شرایط خطا محدود می‌کنند و از این طریق تنظیمات اصلی رله‌های حفاظتی را حفظ می‌کنند. با این حال، اضافه کردن محدود کننده‌ها یک راه حل پرهزینه به خصوص در شرایط نفوذ بالای تولیدات پراکنده می‌باشد. از دیگر روش‌ها در این دسته می‌توان به استراتژی‌های کنترلی ارائه شده در [۴، ۱۰]-[۱۱] اشاره کرد که می‌توانند سهم خطای تولیدات پراکنده را در جریان خطا کاهش دهند. مرجع [۴] جریان خروجی IBDGها را بگونه‌ای مدیریت می‌کند که جریان خطای کل بدون تغییر بماند. در [۱۰]، جریان خروجی IBDGها با توجه به ولتاژ پایانه‌ای آنها کنترل و اثر آن بر هماهنگی‌ها کنترل می‌شود. در [۱۱] از یک مدار دشارژ برای کاهش اثر ژنراتورهای سنکرون بر سیستم حفاظتی استفاده شده است. گروه دیگری از محققان سعی می‌کنند تنظیمات و هماهنگی رله‌ها را با شرایط و سطح جریان خطا تطبیق دهند. در [۱۲] از یک حفاظت اضافه جریان جهت دار تطبیقی که بر اساس مولفه‌های توالی مثبت و منفی عمل می‌کند استفاده شده است. در [۱۳]، یک حفاظت ترکیبی دیفرانسیل به همراه یک طرح تطبیقی استفاده

^۱ plug and play

^۲ Inverter Based Distributed Generation (IBDG)



شکل ۲. اثر اتصال تولیدات پراکنده بر حفاظت دیفرانسیل



شکل ۱. جریان خطای متغیر و دو طرفه ناشی از اتصال تولیدات پراکنده

جدول ۱: جریان عبوری از دو انتهای ناحیه‌ی حفاظتی

| | شرایط خطا | شرایط نرمال |
|----------|-----------|-------------|
| $I_1(A)$ | ۱۲ | ۴۴ |
| $I_2(A)$ | ۲۰ | ۱۲ |

فیدر بالا بر اساس سطح جریان خطای تغذیه شده از شبکه‌ی بالادست صورت گرفته است، درحالی‌که پس از اتصال، سطح کل جریان خطای عبوری از R_1 و R_2 افزایش یافته و می‌تواند منجر به از دست رفتن هماهنگی‌های انجام شده شود.

مسئله‌ای که مشکل را دو چندان می‌کند، ویژگی پلاگ اند پلی تولیدات پراکنده و ماهیت تغییر پذیر واحدهای تجدیدپذیر است که باعث وجود جریان‌های خطای غیرقابل پیش‌بینی شده و تنظیم رله‌ها را چالش‌برانگیزتر کرده است. در موارد ذکر شده، در نظر گرفتن مقادیر تنظیمات ثابت حفاظتی، علی‌رغم تغییرات جریان خطا، منجر به عملکرد نامناسب سیستم حفاظتی می‌شود.

حفاظت دیفرانسیل

حفاظت دیفرانسیل به‌عنوان یکی از مطمئن‌ترین طرح‌های حفاظتی مورد استفاده در سیستم قدرت شناخته می‌شود. با این حال، این استراتژی حفاظتی زمانی که تولیدات پراکنده در داخل منطقه حفاظت شده دیفرانسیل متصل شوند، کارایی‌اش با مشکل مواجه می‌شود، به خصوص زمانی که شبکه امکان عملکرد در حالت جزیره ای هم داشته باشد. در این حالت، رله دیفرانسیل بین وضعیت خطا و حالت نرمال نمی‌تواند تمایز قائل شود. شبکه سه فاز ساده نشان داده شده در شکل ۲ را در نظر بگیرید که بصورت جزیره ای بارها را تغذیه می‌کند. سه تولید پراکنده شماره‌گذاری شده از ۱ تا ۳، به ترتیب با ظرفیت‌های ۱،۲، ۰،۸ و ۰،۱۸ مگاوات بارها را تغذیه می‌کنند. هر IBDG از طریق ترانسفورماتور ۱۲،۶۶/۰،۴ کیلوولت به شبکه متصل شده است. منطقه حفاظت دیفرانسیل توسط ترانسفورماتورهای جریان واقع در دو انتها مشخص شده و با I_1 و I_2 نشان داده شده است. اتصال IBDG3 در منطقه حفاظتی صورت گرفته است. مقدار جریان عبوری از I_1 و I_2 در شرایط خطا و نرمال در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، I_1 و I_2 به‌ترتیب در شرایط عادی ۴۴ و ۱۲ آمپر هستند که منجر به جریان دیفرانسیل ۳۲ می‌شود. در شرایط خطای سه فاز به زمین واقع شده در محل F، جریان عبوری از I_1 و I_2 به ترتیب ۱۲ و ۲۰ آمپر است. در این حالت، جریان دیفرانسیل همانند شرایط غیر خطا و نرمال ۳۲ است. در نتیجه، حفاظت دیفرانسیل قادر به رفع خطا نمی‌باشد.

شده است. در [۱۴]، یک حفاظت تطبیقی انعطاف پذیر ارائه شده است که به صورت خودکار تنظیمات حفاظتی رله‌های اضافه جریان را اصلاح می‌کند. در [۱۵]، یک حفاظت تطبیقی پیشرفته مبتنی بر یک پلت فرم انعطاف پذیر، هماهنگی بین وسایل حفاظتی را بهبود می‌دهد. مرجع [۱۶] یک طرح حفاظتی ارتباط محور است که از حفاظت اضافه جریان در حالت متصل به شبکه و از توالی ولتاژ پایانه در حالت جزیره ای استفاده می‌کند. با این حال، این روش‌ها به زیرساخت‌های مخابراتی نیاز دارند و علاوه‌بر هزینه‌بر بودن عملکرد آنها به عملکرد سیستم ارتباطی وابسته است [۱۷].

رله دیفرانسیل راه حل دیگری است که توسط برخی محققان برای حفاظت شبکه ارائه شده است [۱۸]-[۲۰]. این طرح با یک مشکل عمده برای شبکه‌های توزیع با تعداد بالای انشعاب مواجه است. وجود انشعاب در ناحیه‌ی حفاظتی دیفرانسیل حساسیت آن را کاهش می‌دهد، به طوری که سیستم حفاظتی نمی‌تواند وضعیت خطا را از حالت عادی تشخیص دهد.

طرح حفاظتی پیشنهادی در این مقاله، رله‌های دیجیتال را قادر می‌سازد که با وجود تغییرات جریان خطای ناشی از اتصال IBDGها، با تنظیمات یکسان در حالت‌های مختلف، بدون نیاز به پیوندهای ارتباطی، به طور صحیح عمل کنند. به عبارت دیگر در روش پیشنهادی، عملکرد رله‌های دیجیتال نسبت به سهم جریان خطای IBDGها غیر حساس است.

اثرات جریان خطای متغیر و دو طرفه روی تنظیمات حفاظتی

در این قسمت، تأثیر جریان خطای متغیر و دو طرفه‌ی ناشی از اتصال تولید پراکنده بر تنظیمات حفاظتی دو نوع پرکاربرد طرح حفاظتی شامل اضافه جریان و دیفرانسیل بررسی شده است.

رله‌های اضافه جریان

جریان‌های خطای متغیر و دو طرفه منجر به عملکرد نامناسب رله‌های اضافه جریان و هماهنگی نادرست بین آنها می‌شود. یک شبکه توزیع ساده را همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده در نظر بگیرید. برای حفاظت فیدر بالا از رله‌های R_1 و R_2 و برای فیدر پایین از R_3 استفاده شده است. قبل از اتصال IBDG2، مقدار جریان عبوری از R_3 برای خطای رخ داده در محل F صفر در نظر گرفته می‌شد، درحالی‌که، جریان خطای عبوری از آن پس از اتصال غیر صفر خواهد بود که می‌تواند باعث عملکرد نادرست رله R_3 شود. همینطور قبل از اتصال IBDGها هماهنگی بین R_1 و R_2 در

از حد استفاده می‌شود [۲۱]. بنابراین، فرکانس غیرنامی در هارمونیک هفتم فرکانس اصلی انتخاب شده است. این فرکانس نباید عملکرد ترانسفورماتورهای قدرت و همچنین ترانسفورماتورهای جریان را که برای کاربردهای حفاظتی استفاده می‌شود، مختل کند. اثر اصلی فرکانس غیرنامی بر ترانسفورماتورها مربوط به اشباع است. اشباع ترانسفورماتور به طور مستقیم با نسبت ولتاژ به فرکانس (U/f) مرتبط است. بنابراین با توجه به افت ولتاژ در شرایط خطا، از آنجا که فرکانس غیرنامی بالاتر از فرکانس نامی انتخاب شده، اشباع ترانسفورماتور رخ نمی‌دهد.

به‌علاوه، وجود جریانی با فرکانس غیرنامی در شبکه باعث تلفات توان قابل توجهی نمی‌شود چرا که خطاها به سرعت توسط دستگاه‌های حفاظتی تعبیه شده در شبکه برطرف می‌شوند و شرایط خطا کوتاه است.

نتایج شبیه سازی

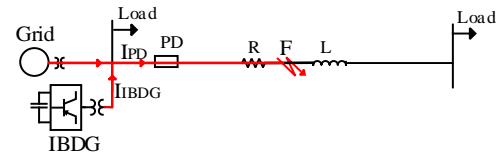
روش پیشنهادی در محیط نرم افزار PSCAD/EMTDC آزمایش و پیاده سازی شده است. برای بررسی اثربخشی روش پیشنهادی از چندین سناریوی مختلف استفاده شده است.

ارزیابی روش با استفاده از شبکه با یک IBDG

در اولین مورد، یک شبکه ساده با یک IBDG برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده انتخاب شده است. IBDG از طریق یک ترانسفورماتور قدرت با نسبت تبدیل $12,66/0,4$ کیلوولت به شبکه متصل می‌شود. R و L نشان دهنده مقاومت و اندوکتانس خط مربوطه هستند که به ترتیب ۲ اهم و ۵ میلی‌هانری هستند. خط توسط یک رله‌ی دیجیتال (PD) در برابر خطا محافظت می‌شود. IBDG با یک منبع ولتاژ ثابت به موازات یک اینورتر از نوع منبع ولتاژ کنترل شده جریان ($CC-$ VSI) مدل شده است.

یک خطا در زمان $t=0,5$ s و مکان F رخ می‌دهد و سپس کنترلر اینورتر مشابه روش سنتی برای حفاظت از ادوات کلیدزنی نیمه‌هادی خود جریان را محدود می‌کند که با مد عملکردی محدود کنندگی جریان شناخته می‌شود [۲۳]-[۲۲]. در این مد عملکردی، جریان مرجع کنترلر داخلی حلقه‌ی کنترل اینورتر با یک مقدار از پیش تعریف شده جایگزین می‌شود. تنها تفاوت روش پیشنهادی با روش سنتی این است که فرکانس جریان مرجع در یک مقدار غیرنامی برای چند سیکل محدود در طول خطا در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط، جریان خروجی IBDG و جریان عبوری از PD به ترتیب در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، IBDG به عنوان یک منبع کنترل شده با جریان، خطا را با یک جریان محدود شده به جریان نامی و در فرکانس هارمونیک ۷ تغذیه می‌کند. از طرف دیگر، کل جریان خطا که از PD عبور می‌کند شامل فرکانس‌های اصلی ۵۰ هرتز

شکل ۴. جریان خروجی IBDG به ازای خطا رخ داده در $t=0,5$ s



شکل ۳. شبکه ساده شامل یک IBDG

روش پیشنهادی

اگر رله‌ها قادر باشند جریان خطای تولید شده توسط IBDGها را از کل جریان خطای شبکه تمیز دهند و آن را نادیده بگیرند، اتصال IBDGها به شبکه منجر به اختلال در تنظیمات اولیه و هماهنگی رله‌های دیجیتال نمی‌شود. روش پیشنهادی این امکان را برای رله‌ها با تنظیم فرکانس خروجی IBDGها در یک مقدار غیرنامی و تنها در شرایط خطا فراهم می‌کند. به این ترتیب کل جریان خطا را به صورت زیر قاب بیان است.

$$i(t) = I_0 e^{-t/\tau} + I_{1m} \cos(\omega t + \theta_1) + \sum_{k=2}^p I_{km} \cos(k\omega t + \theta_k) + \sum_{j=1}^n I_{IBDGj} \cos(r\omega t + \theta_j) \quad (1)$$

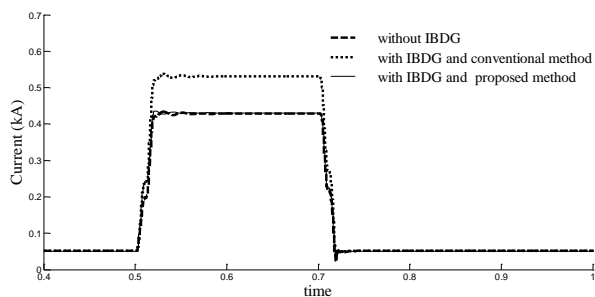
جایی که ω فرکانس زاویه ای اصلی شبکه، I_{1m} ، I_{km} و I_{IBDGj} به ترتیب دامنه‌ی مولفه اصلی جریان شبکه، دامنه‌ی مولفه‌های هارمونیک، دامنه‌ی جریان تولیدات پراکنده و θ_1 ، θ_k ، θ_j به ترتیب، زوایای فاز مولفه‌های مربوطه هستند. I_0 ، τ ، به ترتیب ثابت زمانی و مقدار اولیه‌ی مولفه‌ی DC جریان خطا، p حداکثر مرتبه‌هارمونیک، n تعداد IBDGها و r مرتبه‌ی هارمونیک مربوط به فرکانس غیرنامی می‌باشد.

رله‌های دیجیتال می‌توانند مولفه‌های فرکانسی جریان خطا را توسط تبدیل فوریه استخراج کنند، از اجزای مورد نظر خود استفاده کرده و سایر اجزای فرکانس را نادیده بگیرند. بنابراین، اگر فرکانس جریان IBDG با فرکانس اصلی جریان خطا یکسان باشد، رله‌ها نمی‌توانند جریان آن را از جریان شبکه تشخیص دهند، اما اگر متفاوت باشد، رله‌ها می‌توانند آن را تشخیص داده و نادیده بگیرند. به این ترتیب تنظیمات هماهنگی رله‌ها که قبل از نصب IBDG انجام شده بود همچنان پس از نصب هم حفظ خواهند شد.

لازم به ذکر است که روش پیشنهادی باعث اختلال در عملکرد رله‌هایی که از مولفه‌ی هارمونیک جریان برای تشخیص خطا استفاده می‌کنند نمی‌شود، در صورتی که مقدار فرکانس غیرنامی با آن فرکانس‌ها متفاوت باشد.

ملاحظات فرکانس غیرنامی

مقدار فرکانس غیرنامی باید مضرر صحیحی از فرکانس نامی باشد تا با تبدیل فوریه‌ی تعبیه شده در رله‌های دیجیتال بدون تأثیر بر اندازه‌ی مولفه‌ی اصلی فیلتر شود. علاوه بر این، فرکانس غیرنامی نباید با برخی از فرکانس‌هایی که در سیستم حفاظتی استفاده می‌شود برابر باشد. هارمونیک دوم معمولاً برای تمایز بین جریان هجومی و خطا و مولفه‌ی هارمونیک پنجم برای تشخیص شار بیش



شکل ۶. مولفه اصلی جریان عبوری از PD تحت سه سناریو

جدول ۲: اندازه مولفه اصلی جریان عبوری از PD بر حسب آمپر برای محل خطای F

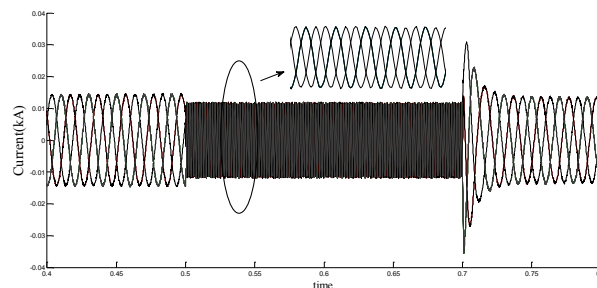
| نوع خطا | سناریو ۱ | سناریو ۲ | سناریو ۳ |
|----------------|----------|----------|----------|
| تکفاز به زمین | ۵۴۷ | ۶۶۸ | ۵۴۷ |
| دو فاز به زمین | ۵۴۱ | ۶۶۱ | ۵۴۱ |
| | ۵۱۳ | ۶۲۸ | ۵۱۳ |
| سه فاز به زمین | ۴۳۰ | ۵۲۶ | ۴۳۰ |
| | ۴۳۰ | ۵۲۶ | ۴۳۰ |
| | ۴۳۰ | ۵۲۶ | ۴۳۰ |
| فاز به فاز | ۳۹۷ | ۴۸۵ | ۳۹۷ |
| | ۳۹۷ | ۴۸۵ | ۳۹۷ |

آن، اندازه‌ی مولفه‌ی اصلی جریان در نظر گرفته شده توسط رله‌ی دیجیتال قبل و بعد از اتصال IBDG برابر است و هماهنگی‌های انجام شده بر اساس سناریو ۱ در سناریو ۳ هم همچنان پابرجا و صحیح می‌باشند.

ارزیابی روش با استفاده از شبکه ۳۳ باس IEEE با چندین IBDG

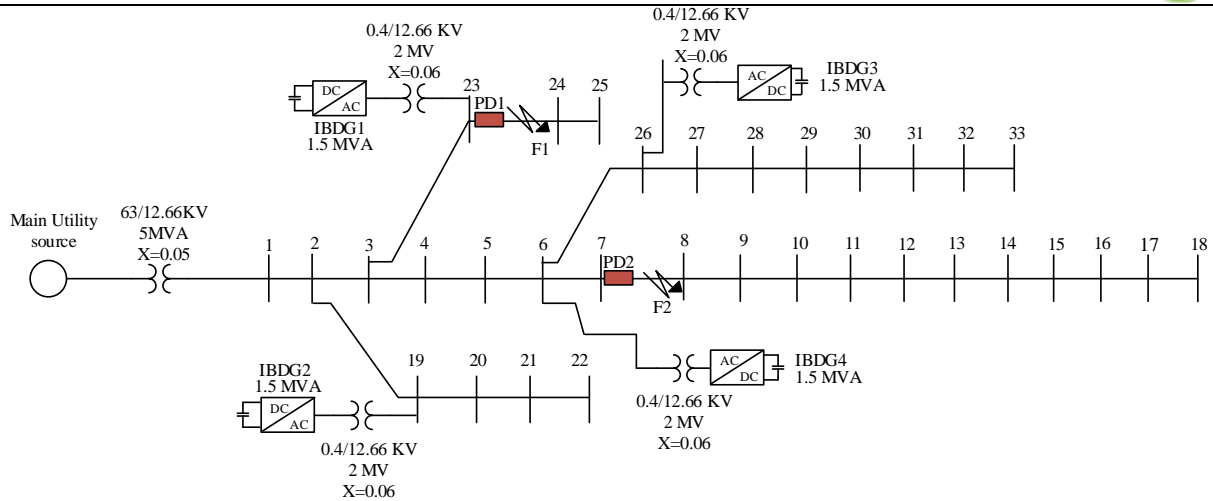
عملکرد روش پیشنهادی در سیستم IEEE 33-Bus شامل چهار IBDG ارزیابی شده است. اطلاعات بار و خطوط شبکه را می‌توان در [۲۴] یافت. IBDGها از طریق ترانسفورماتورهای رابط خود با نسبت تبدیل $12,66/0,4$ کیلوولت در باس‌های ۲۳، ۱۹، ۶ و ۲۶ همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده، به شبکه متصل شده‌اند. ظرفیت نامی IBDGها در شکل نشان داده شده است. روش پیشنهادی تحت سه سناریو آزمایش می‌شود: سناریوی اول زمانی است که هیچ IBDG در شبکه وجود ندارد، سناریو دوم هنگامی است که چهار IBDG به شبکه متصل شده‌اند که با روش سنتی کنترل می‌شوند و سناریو سوم زمانی است که چهار IBDG اضافه شده با روش پیشنهادی کنترل می‌شوند. اندازه‌ی جریان خروجی IBDGs در هر دو سناریو ۲ و ۳ یکسان و به جریان نامی محدود شده است. سناریوها تحت انواع مختلف خطای تک فاز به زمین، فاز به فاز، سه فاز به زمین و دو فاز به زمین و مکان خطاهای مختلف آزمایش و ارزیابی شده است.

شکل ۷. شبکه توزیع IEEE 33-Bus


 شکل ۵. جریان عبوری از PD به ازای خطا رخ داده در $t=0,5$ S

و ۳۵۰ هرتز غیرنامی است و در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شرایط، PD قادر است جریان IBDG را شناسایی کند و نادیده بگیرد و تنها از مولفه ۵۰ هرتز استفاده کند. این مولفه اصلی در شکل ۶ تحت سه سناریو شامل شبکه بدون IBDG، شبکه با یک IBDG کنترل شده با روش سنتی و شبکه با یک IBDG کنترل شده با روش پیشنهادی نشان داده شده است. بر خلاف فرکانس، اندازه‌ی جریان خروجی IBDG در دو سناریوی آخر یکسان و در محدوده‌ی جریان نامی در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که مولفه ۵۰ هرتز در هر دو سناریوی اول و سوم تا حدود ۰,۴ کیلو آمپر افزایش می‌یابد در حالی که در سناریوی دوم به حدود ۰,۵ کیلو آمپر افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که رله‌ی دیجیتال می‌تواند سهم IBDG را در جریان خطا با استفاده از روش پیشنهادی نادیده بگیرد.

عملکرد روش پیشنهادی برای انواع مختلف خطا، متقارن و نامتقارن شامل تک فاز به زمین، فاز به فاز و سه فاز به زمین مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج در جدول ۲ خلاصه شده است. مقایسه‌ی بین نتایج به دست آمده از سناریوهای ۱ و ۲ نشان دهنده‌ی افزایش اندازه‌ی مولفه اصلی جریان هنگام اتصال IBDG به شبکه است. به طور مثال، برای خطای تکفاز به زمین، اندازه‌ی جریان از ۵۴۷ آمپر در سناریوی ۱ به ۶۶۸ آمپر در سناریوی ۲ افزایش می‌یابد و یا برای خطای فاز به فاز جریان از ۳۹۷ آمپر به ۴۸۵ آمپر افزایش می‌یابد. این افزایش‌ها در جریان می‌تواند منجر به عدم هماهنگی‌ها شود. از طرفی با مقایسه نتایج سناریوی ۱ با ۳ مشاهده می‌شود که با استفاده از روش پیشنهادی، اندازه‌ی مولفه‌ی اصلی در دو سناریو با یکدیگر یکسان است. به طور مثال، برای خطای تکفاز، اندازه‌ی جریان در هر دو سناریو ۵۴۷ آمپر است و یا برای خطای دو فاز اندازه‌ی جریان در هر دو سناریو ۳۹۷ آمپر است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از روش پیشنهادی و کنترل IBDG مطابق



جدول ۳: مقدار جریان عبوری از PD2 بر حسب آمپر برای محل خطای F2

| نوع خطا | سناریو ۱ | سناریو ۲ | سناریو ۳ |
|----------------|----------|----------|----------|
| تکفاز به زمین | ۱۱۸۱ | ۱۴۰۸ | ۱۱۸۱ |
| دو فاز به زمین | ۱۲۴۷ | ۱۴۸۷ | ۱۲۴۷ |
| | ۱۰۰۶ | ۱۱۹۸ | ۱۰۰۶ |
| سه فاز به زمین | ۹۳۱ | ۱۱۱۰ | ۹۳۱ |
| | ۹۳۱ | ۱۱۱۰ | ۹۳۱ |
| | ۹۳۱ | ۱۱۱۰ | ۹۳۱ |
| فاز به فاز | ۸۰۶ | ۹۶۱ | ۸۰۶ |
| | ۸۰۶ | ۹۶۱ | ۸۰۶ |

جدول ۴: مقدار جریان عبوری از PD1 بر حسب آمپر برای محل خطای F1

| نوع خطا | سناریو ۱ | سناریو ۲ | سناریو ۳ |
|----------------|----------|----------|----------|
| تکفاز به زمین | ۱۵۴۲ | ۱۸۲۱ | ۱۵۴۲ |
| دو فاز به زمین | ۱۶۳۸ | ۱۹۳۴ | ۱۶۳۸ |
| | ۱۴۷۳ | ۱۷۳۹ | ۱۴۷۳ |
| سه فاز به زمین | ۱۱۲۸ | ۱۳۳۲ | ۱۱۲۸ |
| | ۱۱۲۸ | ۱۳۳۲ | ۱۱۲۸ |
| | ۱۱۲۸ | ۱۳۳۲ | ۱۱۲۸ |
| فاز به فاز | ۹۷۴ | ۱۱۵۳ | ۹۷۴ |
| | ۹۷۴ | ۱۱۵۳ | ۹۷۴ |

مراجع

- [1] Khederzadeh, M., Javadi, H., Mousavi, S.A.: 'Source type impact of distributed generation (Dg) on the distribution protection', Proc. IET, 10th Int. Conf. Develop. Power Syst. Protect (DPSP), Manchester, UK, 2010
- [2] Maki, k., Repo, S., Jarventausta, P.: 'Methods for assessing the protection impacts of distributed generation in network planning

اندازه‌ی مولفه فرکانسی جریان عبوری از رله PD1 برای مکان خطای F1 و مولفه‌ی عبوری از PD2 برای مکان خطای F2 به ترتیب در جدول ۳ و ۴ نشان داده شده است. به عنوان مثال، یک خطای سه فاز به زمین را در مکان F2 در نظر بگیرید. اندازه‌ی مولفه اصلی ۵۰ هرتز که توسط PD2 مشاهده می‌شود در سناریوی ۱ برابر ۹۳۱ آمپر است. این مقدار در سناریوی ۲ به ۱۱۱۰ آمپر افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در سناریوی ۳، مقدار مولفه ۵۰ هرتز ۹۳۱ آمپر خواهد بود که همان مقدار سناریوی ۱ است. برای انواع دیگر خطا در این مکان ملاحظه می‌شود که اندازه مولفه‌ی اصلی در سناریوی ۱ و سناریوی ۳ یکسان باقی می‌ماند.

جدول ۴ نتایج به دست آمده را برای خطا در محل F1 نشان می‌دهد. به عنوان مثال، خطای فاز به فاز را در نظر بگیرید، اندازه‌ی مولفه‌ی ۵۰ هرتز در سناریوی ۱ و ۳ برابر ۹۷۴ آمپر است در حالیکه در سناریوی ۲ مقدار ۱۱۵۳ آمپر است. این روند مطابق جدول ۳ برای انواع دیگر خطا هم برقرار است.

نتیجه گیری

اتصال IBDGها به شبکه قدرت و مشارکت آنها در جریان خطا می‌تواند هماهنگی حفاظتی موجود را نقض کند. طرح پیشنهادی از یک استراتژی کنترلی در رابط الکترونیک قدرت IBDGs برای مدیریت جریان خروجی این منابع تحت شرایط خطا و حفظ هماهنگی‌های موجود استفاده کرد. اجرای روش بر روی شبکه IEEE 33-Bus در نرم افزار PSCAD/EMTDC نشان داد که مولفه اساسی جریان خطا مورد استفاده توسط رله‌های دیجیتال بدون توجه به وجود یا عدم وجود IBDG در شبکه ثابت باقی می‌ماند. این بدان معنی است که هماهنگی‌های انجام شده قبل از اتصال IBDGها فارغ از مکان نصب و ظرفیت آنها، پس از نصب هم حفظ می‌شوند. روش پیشنهادی به هیچ لینک مخابراتی نیاز ندارد. نتایج شبیه‌سازی اثربخشی روش پیشنهادی را برای انواع مختلف خطا و در مکان‌های مختلف تأیید کرد.

- communications network', IEEE Trans. Smart Grid, 2015, 6, (5), pp. 2493–2500
- [14] Coffele, F., Booth, C. and Dyško, A.: 'An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks', IEEE Trans. Power Del., 2015, 30, (2), pp. 561-568
- [15] Laaksonen, H., Ishchenko, D., Oudalov, A.: 'Adaptive protection and microgrid control design for hailuoto island', IEEE Trans. Smart Grid, 2014, 5, (3), pp. 1486-1493
- [16] Zamani, M. A., Sidhu, T. S. and Yazdani, A.: 'A communication-assisted protection strategy for inverter-based medium-voltage microgrids', IEEE Trans. Smart Grid, 2012, 3, (4), pp. 2088–1883
- [17] Manditereza, P., Bansal, R.: 'Renewable distributed generation, The hidden challenges – A review from the protection perspective', Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58, pp. 1457–1465
- [18] Sortomme, E., Venkata, S. S. and Mitra, J.: 'Microgrid protection using communication-assisted digital relays', IEEE Trans. Power Del., 2010, 25, (4), pp. 2789–2796
- [19] Casagrande, E., Woon, W. L., Zeineldin, H. H. and Svetinovic, D.: 'A differential sequence component protection scheme for microgrids with inverter-based distributed generators', IEEE Trans. Smart Grid, 2014, 5, (1), pp. 29-37
- [20] Soleimanisardoo, A., Karegar, H. K. and Zeineldin, H. H.: 'differential frequency protection scheme based on off-nominal frequency injections for inverter-based islanded microgrids', IEEE Trans. Smart Grid, 2019, 10, (2), pp. 2107-2114
- [21] S. H. Horowitz, A. G. Phadk. Power system relaying. Wiley & Sons, New York, 1992.
- [22] Bottrell, N. and Green, T. C.: 'Comparison of current-limiting strategies during fault ride-through of inverters to prevent latch-up and wind-up', IEEE Trans. Power Elect., 2013, 29, (7), pp. 3786–3797
- [23] Zamani, M. A., Yazdani, A., Sidhu, T. S.: 'A control strategy for enhanced operation of inverter-based microgrids under transient disturbances and network faults', IEEE Trans. Power Del., 2012, 27, (4), pp. 1737–1747
- [24] Venkatesh, B., Ranjan, R., and Gooi, H. B.: 'Optimal reconfiguration of radial distribution systems to maximize load ability', IEEE Trans. Power Syst., 2004, 19, (1), pp. 260–266
- activities', Proc. IET 9th Inter. Conf. Develop. Power Syst. Protect, Glasgow, UK, 2008
- [3] Hooshyar, A., Iravani, R.: 'Microgrid protection', Proc. IEEE, 2017, 105, (7), pp. 1332-1353
- [4] Kroposki B, Johnson B, Zhang Y, Gevorgian V, Denholm P, Hodge P, Hannegan B. Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy. IEEE Power and Energy Magazine. 2017;15:61–73.
- [5] V. Telukunta, J. Pradhan, A. Agrawal, M. Singh, S. G. Srivani, "Protection Challenges Under Bulk Penetration of Renewable Energy Resources in Power Systems: A Review," Journal of Power and Energy Systems, vol. 3, pp. 365-379, 2017. doi: 10.1109/MPE.2016.2637122
- [6] G. Hernandez-Gonzalez, C. Abbey, "Effect of Adding Distributed Generation to Distribution Networks Case Study 3: Protection Coordination
- [7] Rajaei, N., Hassan Ahmed, M., Salama., M. M. A. and Varma, R. K.: 'Fault current management using inverter-based distributed generators in smart grids', IEEE Trans. Smart Grid, 2014, 5, (5), pp. 2183-2193
- [8] Wheeler, K., Elsamahy, M., Faried, F.: 'Use of superconducting fault current limiters for mitigation of distributed generation influences in radial distribution network fuse-recloser protection systems', IET Gene, Transm. & Distrib. , 2017, 11, (7), pp. 1605–1612
- [9] H. Radmanesh, A. Heidary, S. M. Fathi, G. Babamalek, "Dual function ferroresonance and fault current limiter based on DC reactor," IET Renewable Power Generation, vol. 10, pp. 2058–2065, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1032>
- [10] Yazdanpanahi, H., Xu, W., Wei Li, Y., Muda, H. and Jena, P.: 'A Novel fault current control scheme to reduce synchronous DG's impact on protection coordination', IEEE Trans. Power Del., 2014, 29, (2), pp. 542-551
- [11] Yazdan panahi, H., Li, Y.W. and Xu, W.: 'A new control strategy to mitigate the impact of inverter-based DGs on protection system', IEEE Trans. Smart Grid, 2012, 3, (3), pp. 1427–1436
- [12] Muda, H., Jena, P.: 'Superimposed adaptive sequence current based microgrid protection: A new Technique', IEEE Trans. Power Del., 2016, 32, (2), pp. 757 - 767
- [13] Ustun, T. S., Khan, R. H.: 'Multiterminal hybrid protection of microgrids over wireless

ACEC2021-97534

تأثیر وسایل نقلیه برقی بر روی قابلیت اطمینان سیستم قدرت شامل نیروگاه بادی و استفاده از مفهوم بار مجازی ترکیب شده جهت کاهش نوسانات

پریسا انجم شعاع^۱، سعید اسماعیلی^۲

^۱ دانشجو، دانشگاه شهید باهنر کرمان، anjomparisa@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشگاه شهید باهنر کرمان، s_esmaeili@uk.ac.ir

است. برای تامین وسایل نقلیه برقی از باتری ها استفاده می شود که این کار وابستگی مستقیم به سوخت های فسیلی را کاهش می دهد و نتیجتاً باعث کاهش آلودگی هوا می شود. مفهوم وسایل نقلیه متصل به شبکه که اخیراً پیشنهاد شده است می تواند اثر متقابل بین وسایل نقلیه برقی و سیستم قدرت را افزایش دهد. کاهش نوسانات ناشی از سیستم بادی به کمک وسایل نقلیه برقی امکان پذیر است. تحقیقات مربوط به وسایل نقلیه برقی عمدتاً بر تأثیر این وسایل بر سیستم قدرت و راهبرد شارژ هوشمند متمرکز است. در [1] روش های مدل سازی بار وسایل نقلیه برقی در شبکه توزیع داده شده است. در [2] راهبرد شارژ وسایل نقلیه الکتریکی از منظر بهبود بهره برداری از شبکه ارائه شده است. در [3] تأثیر وسایل نقلیه برقی در شبکه توزیع و تلفات شبکه در حضور وسایل نقلیه برقی ارزیابی شده است. در [4] از وسایل نقلیه برقی به عنوان سیستم ذخیره انرژی استفاده می شود. در این مقاله ابتدا مدل های ریاضی توان باد و وسایل نقلیه برقی داده شده است. سپس با توجه به نوسانات توان باد و بار معمولی مفهوم بار ترکیبی مجازی را مطرح میکنیم بر اساس این مفهوم یک راهبرد شارژ و دشارژ وسایل نقلیه برقی برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت پیشنهاد شده است.

مدلسازی ریاضی توربین بادی

برای یک توربین بادی معین، توان خروجی با سرعت باد متغیر است. طبق مطالعه مرتبط در [5] رابطه بین توان خروجی توربین بادی و سرعت باد نشان داده شده است:

$$P(V) = \begin{cases} 0 & v_{out} \leq v \text{ or } v \leq v_{in} \\ a(v - v_i)^b & v_{in} \leq v \leq v_{out} \\ pr & vr \leq v < vz \end{cases} \quad (1)$$

چکیده

نیروگاه های بادی باعث ایجاد نوسانات گسترده در سیستم قدرت می شوند. استفاده گسترده از وسایل حمل و نقل برقی این نوسانات را تشدید خواهد کرد. در این مقاله ابتدا مدل ریاضی وسایل حمل و نقل برقی تحت شارژ تصادفی آورده شده است. این مقاله به تجزیه و تحلیل تغییر در قابلیت اطمینان سیستم قدرت هنگامی که تعداد وسایل نقلیه برقی افزایش پیدا کرده است می پردازد و نشان میدهد که افزایش تعداد وسایل نقلیه برقی تحت حالت شارژ تصادفی تهدید بزرگی را برای قابلیت اطمینان سیستم ایجاد می کند. علاوه بر این، مفهوم جدیدی از بار ترکیبی مجازی برای تحقیق در مورد عوامل نوسان سیستم قدرت مطرح شده است. بر پایه فناوری وسایل حمل و نقل متصل به شبکه، یک راهبرد شارژ و دشارژ وسایل نقلیه برقی پیشنهاد شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که راهبرد پیشنهادی میتواند باعث تعدیل نوسانات بار ترکیبی مجازی شود. سرانجام براساس سیستم (IEEE-RTS) تأیید می شود که این راهبرد پیشنهادی قابلیت اطمینان سیستم را به طور قابل توجهی افزایش می دهد.

واژه های کلیدی: انرژی تامین نشده بار، بار ترکیبی مجازی، تأثیر وسایل نقلیه برقی متصل به شبکه، قابلیت اطمینان نیروگاه بادی

مقدمه

با افزایش آلودگی محیط زیست و کاهش تدریجی سوخت های فسیلی توجه به افزایش استفاده از انرژی های تجدید پذیر افزایش یافته است. انرژی باد به عنوان بخش مهمی از انرژی تجدید پذیر معرفی شده است. با این حال با توجه به نوسانات و تصادفی بودن انرژی باد عدم قطعیت زیادی برای سیستم قدرت به وجود می آید. از سوی دیگر وسایل نقلیه برقی و فناوری های مرتبط در سال های اخیر رشد یافته

انرژی شبکه شارژ شوند و در اوج مصرف انرژی شبکه دشارژ شوند. این عمل نقش موثری را در پر کردن دره و بریدن قله بار ایفا میکند و موجب کاهش نوسانات بار می شود. در این مقاله یک مفهوم جدید از بار ترکیبی مجازی به منظور تحلیل نوسانات سیستم قدرت تعریف می شود که تولید انرژی الکتریکی بادی، سایر بار های معمولی و وسایل نقلیه برقی را به عنوان بار منفی در سیستم در نظر میگیریم. با بهینه سازی شارژ و دشارژ خودرو های برقی نوسانات بار ترکیبی میتواند کاهش یابد و همچنین قابلیت اطمینان سیستم افزایش یابد. در این مقاله راهبرد کنترل با استفاده از کاهش نوسانات و تصادفی بودن بار ترکیبی مجازی قابلیت اطمینان سیستم قدرت را افزایش میدهد. انحراف استاندارد، نوسان بار مجازی را نشان می دهد و تصادفی بودن بار با جمع مقادیر مختلف بار در دوره های مختلف زمانی مقدار بار ترکیبی مجازی $p_{ldv}(t)$ به عنوان متغیر کنترل شده در نظر گرفته می شود. تابع هدف به شرح زیر است:

$$\min f = \left\{ \sqrt{\frac{\sum [p_{ldv}(t) - p_{ave}]^2}{N_T - 1}} \right\} + \left\{ \frac{\sum [p_{ld-v}(t+1) - p_{ldv}(t)] \times k}{N_T - 1} \right\} \quad (4)$$

که T مجموع زمان کنترل است، p_{ave} میانگین مقدار بار ترکیبی مجازی است، N_T متغیر های کنترل شده در یک دوره را نشان می دهد و K ضریب تاثیر نوسانات روی بار است. برای در نظر گرفتن موقعیت واقعی نیاز به اعمال محدودیت های زیر داریم:

(1) به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی فرایند شارژ و دشارژ نیاز به یک تعادل توان در زمان واقعی دارد:

$$P_{ldv_0}(t) + p_{cht}(t) = p_{ldv}(t) \quad (5)$$

که $P_{ldv_0}(t)$ مقدار اصلی بار ترکیبی مجازی است و $p_{cht}(t)$ نشانگر شارژ توان است. این معادله نشان دهنده ارتباط بین متغیر های کنترل شده شارژ و دشارژ است.

(2) وضعیت باتری توسط حالت شارژ بیان می شود. معادله حالت شارژ باتری به شرح زیر است:

$$SOC_{ev}(t) = SOC_{ev}(0) + \int_0^t \frac{p_{ch}(t) dt}{S_{ev}} \quad (7)$$

که SOC_{ev} حالت شارژ باتری و S_{ev} ظرفیت کل وسیله نقلیه است. به منظور جلوگیری از شارژ و دشارژ بیش از حد باتری باید محدودیت های زیر برقرار شوند:

$$SOC_{std_l} \leq SOC_{ev} \leq SOC_{std_h} \quad (8)$$

در این معادله SOC_{std_l} و SOC_{std_h} به ترتیب حد های بالا و پایین میزان شارژ باتری هستند و میزان مناسب برای این حدود ۰٫۹۵ و ۰٫۲ است. طبق اطلاعات [7] می توان زمان پایان سفر ها و مسافت پیموده شده روزانه را بدست آورد. با استفاده از داده های مسافت پیموده شده روزانه و با در نظر گرفتن میانگین سرعت km/h

که $p(v)$ توان خروجی توربین بادی است، pr توان مجاز V_{in} ، V_r ، V_{out} به ترتیب سرعت قطع ورودی باد، سرعت مجاز باد و سرعت قطع خروجی باد است و ضرایب a و b مربوط به پارامتر های توربین بادی است.

وسایل نقلیه برقی تحت مدل شارژ تصادفی

عوامل مرتبط با قدرت شارژ وسایل نقلیه برقی عمدتاً سه مورد بیان شده است: اول پارامتر های وسایل نقلیه از جمله قدرت شارژ، ظرفیت باتری و توان مصرفی در هر صد کیلومتر. دوم رفتار کاربران مانند زمان سفر، مسافت طی شده و زمان شروع شارژ. سوم امکانات شارژ از جمله روش های شارژ باتری.

در فاکتور های بالا زمان شروع شارژ عمدتاً زمان پایان سفر تعیین می شود در حالیکه مدت زمان شارژ بستگی دارد به مسافت پیموده شده کاربر، مصرف انرژی در هر صد کیلومتر و ظرفیت باتری.

برای سادگی شبیه سازی فرضیات زیر را در نظر میگیریم:

مصرف انرژی در هر صد کیلومتر $1.5 kWh$ ، تمام توان شارژ وسایل برقی $3.6 kW$ ، شروع شارژ بلافاصله پس از پایان رانندگی است و تا شارژ شدن کامل ادامه می یابد. زمان شروع شارژ و مسافت پیموده شده روزانه کاملاً مستقل از هم است. همچنین 1200 وسیله نقلیه برقی در سیستم فرض شده است.

مطابق تحقیقات صورت گرفته در [6] زمان پایان سفر هر کاربر با معادله زیر ارضا می شود:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu_c)^2}{2\sigma_c^2}\right] & 12 < t < 24 \\ \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t+24-\mu_c)^2}{2\sigma_c^2}\right] & 0 < t < 12 \end{cases} \quad (2)$$

که $\sigma_c = 3.3$ و $\mu_c = 17.6$ است و t زمان پایان رانندگی است. مسافت طی شده روزانه با معادله زیر ارضا میشود:

$$f(s) = \frac{1}{s \sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln s - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (3)$$

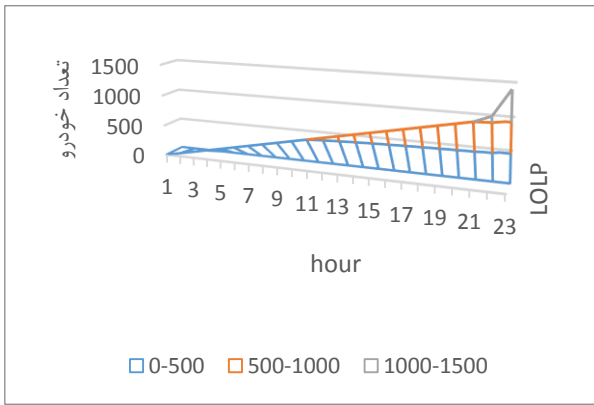
در این معادله $\sigma_s = 0.88$ و $\mu_s = 3.2$ و s مسافت سفر است. رابطه بین زمان شارژ وسایل نقلیه مسافت طی شده به ترتیب زیر است:

$$t_{ch} = \frac{s \cdot k_{100}}{100 p_{ch}} \quad (4)$$

که k_{100} مصرف انرژی در هر صد کیلومتر است و p_{ch} نشان دهنده توان شارژ است و t_{ch} زمان شارژ است.

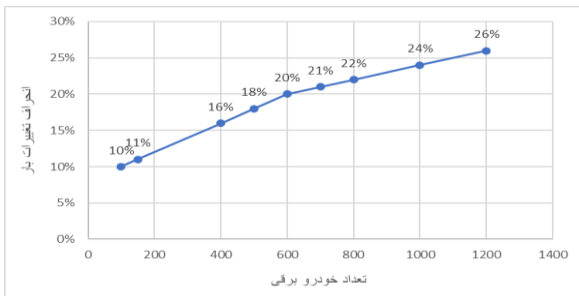
راهبرد کنترل شارژ و دشارژ

به دلیل نوسانی بودن انرژی باد، قابلیت اطمینان سیستم قدرت به چالش کشیده می شود. وسایل نقلیه برقی می توانند در دره مصرف



نمودار ۲: تغییرات شاخص های قابلیت اطمینان شبکه تحت راهبرد کنترل شارژ

راهبرد پیشنهادی نوسانات بار ترکیبی را با برش بار در اوج مصرف و پر کردن دره بار در زمان کاهش مصرف انرژی در سیستم قدرت، کاهش می دهد و به این ترتیب انحرافات تغییر بار کاهش میابد.



نمودار ۳: تغییرات انحراف بار با راهبرد کنترلی شارژ و دشارژ

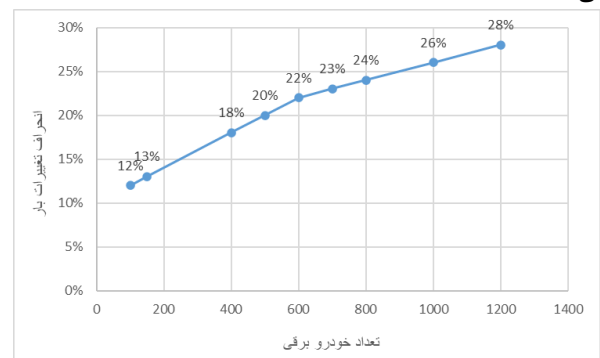
نتیجه گیری

در این مقاله منحنی توان انرژی بادی آورده شده است که نوسانات توان باد را نشان می دهد. روش مونت کارلو برای شبیه سازی شارژ و دشارژ خودرو های برقی استفاده می کنیم. بر اساس سیستم IEEE-RTS در این مقاله تاثیر خودرو های برقی تحت شارژ تصادفی روی قابلیت اطمینان سیستم بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش تعداد وسایل نقلیه برقی تحت شارژ تصادفی قابلیت اطمینان سیستم کاهش می یابد. فناوری وسایل برقی متصل به شبکه تعامل بین سیستم قدرت و وسایل حمل و نقل الکتریکی را افزایش می دهد. راهبرد شارژ و دشارژ کنترلی پیشنهادی برای تعدیل نوسانات بار ترکیبی مجازی و بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت استفاده می شود. نتایج نشان می دهد که راهبرد پیشنهادی نوسانات بار ترکیبی را با برش بار در اوج مصرف و پر کردن دره بار در زمان کاهش مصرف انرژی در سیستم قدرت، کاهش می دهد شبیه سازی نشان می دهد تعامل بین خودرو های برقی و سیستم قدرت شامل نیروگاه های تجدید پذیر، میتواند باعث افزایش قابلیت اطمینان شبکه گردد.

۳۰ و با این فرض که کاربران شارژ را بلافاصله پس از پایان رانندگی شروع کنند میتوانیم از شبیه سازی مونت کارلو برای نشان دادن شارژ وسایل نقلیه برقی استفاده کنیم. این راهبرد کنترل در یک دوره ۲۴ ساعته تعریف می شود و فرض می شود که انرژی باقی مانده باتری از روز قبل برابر با انرژی اولیه باتری در روز جدید است و انرژی اولیه باتری در روز نخست صفر در نظر گرفته می شود.

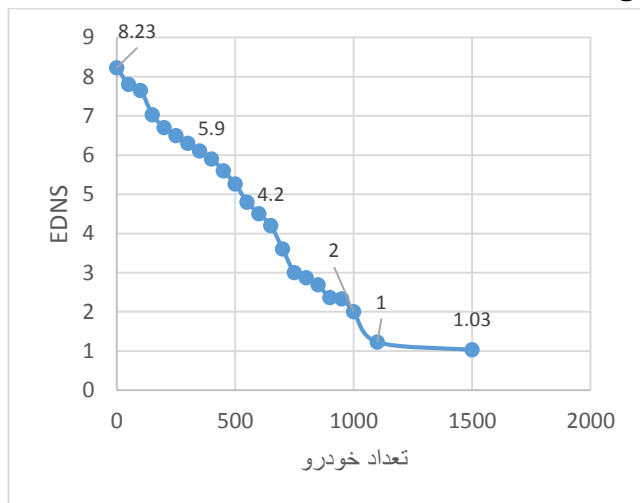
شبیه سازی

با افزایش تعداد خودرو های برقی تحت شارژ تصادفی قابلیت اطمینان سیستم کاهش می یابد و تغییرات منحنی بار افزایش می یابد شکل ۱ میزان تغییرات منحنی بار را با افزایش تعداد خودرو های برقی نشان می دهد:



شکل ۱: میزان تغییرات منحنی بار با افزایش تعداد خودرو برقی تحت شارژ تصادفی

مقایسه شاخص های قابلیت اطمینان قبل و بعد از راهبرد پیشنهادی نشان می دهد که وقتی تعداد وسایل نقلیه برقی ۱۲۰۰ است، LOLP و END کاهش چشمگیری داشته است. شکل ۲ تغییرات شاخص های قابلیت اطمینان را زمانیکه تعداد خودرو های برقی افزایش می یابد تحت راهبرد کنترل شارژ و دشارژ پیشنهادی نشان می دهد.





مراجع

- Converter-Dominated Power Systems Using Variance-Based Global Sensitivity Analysis”. *power and energy*, pp. 248-257.
- [5] Kannan Thirugnanam, Mohamed Shawky El Moursi, Vinod Khadkikar, Hatem H. Zeineldin, and Mohamed Al Hosani, 2020 “Energy Management of Grid Interconnected Multi-Microgrids based on P2P Energy Exchange: A Data Driven Approach”. *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1546-1562.
- [6] Ziwen Yao, 2018, “control-oriented energy function for generation shedding determination for transient stability control”. *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 411-421.
- [7] Kai Hou, Xiandong Xu, Hongjie Jia, Xiaodan Yu, Tao Jiang, Kai Zhang and Bin Shu, 2016, “A Reliability Assessment Approach For Integrated Transportation and Electrical Power Systems Incorporating Electric Vehicles”. *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 88-100.
- [1] F. L. Miranda, L. W. Oliveira, and B. H. Dias, L. C. Resende, E. G. Nepomuceno, 2020, “Composite Power System Reliability Evaluation Considering Stochastic Parameters Uncertainties”. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, pp. 2003-2010.
- [2] XIYUN YANG, YUWEI YANG, YUQI LIU, and ZIQI DENG, 2020, “A Reliability Assessment Approach for Electric Power Systems Considering Wind Power Uncertainty”. *IEEE Access*, pp. 12467-12478.
- [3] K. Zou, G. Mohy-ud-din, A. P. Agalgaonkar, K. M. Muttaqi, and S. Perera, 2019, “Distribution System Restoration with Renewable Resources for Reliability Improvement under System Uncertainties”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 8438-8449.
- [4] BOWEN ZHANG, MENGQI WANG, AND WENCONG SU, 2021, “Reliability Assessment of

ACEC2021-98185

بررسی تاثیر مواد تغییر فازدهنده (pcm) بر عملکرد یک آب شیرین کن خورشیدی پله ای بهبود یافته

غلامعباس احدی^۱، حسین امیری^۲، هژیر کورکی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تحصیلات تکمیلی، صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان abasahadi5769@gmail.com

^۲استادیار دانشگاه تحصیلات تکمیلی، صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان hosseinamiri2010@gmail.com

^۳استادیار دانشگاه تحصیلات تکمیلی، صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان hajir.kourki@kgut.ac.ir

چشمگیری یافته است، بنابراین آب شیرین کن های خورشیدی می تواند گزینه مناسبی برای رفع مشکل کمبود آب شیرین در این مناطق باشد. انواع مختلفی از آب شیرین کن های خورشیدی تا به حال ساخته و آزمایش شده اند. افزایش راندمان آب شیرین کن های حوضچه ای خورشیدی به دلیل ساده و کم هزینه بودن این دستگاها مورد توجه محققین بوده است. راه حل های زیادی از جمله: تغییر در ساختار و استفاده از مواد مختلف جهت بالا بردن کارایی این دستگاها ارائه شده و منجر به نتایج خوبی هم شده است.

دشتبان و همکاران در سال ۲۰۱۱ تجزیه و تحلیل یک نوع حوضچه خورشیدی پله ای کوپل شده با ذخیره ساز pcm را با دیدگاه افزایش بهره وری در شهر زاهدان مورد ارزیابی قرار دادند. روش کار به این صورت بود که ۱۸ کیلوگرم پارافین واکس در زیر صفحه جاذب قرار دادند و دریافتند که بهره وری دستگاه با pcm ۳۱ درصد بیشتر از دستگاه بدون pcm است [۱]. آرون کومار در سال ۲۰۱۳ افزایش عملکرد تقطیر با تمرکز بر کوپل متمرکز کننده خورشیدی نیم کره با آب شیرین کن حوضچه ای تک شیب خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که تولید دستگاه با متمرکز کننده بدون pcm ۳۵۲۰ میلی لیتر بر مترمربع در روز و تولید روز همان دستگاه با pcm ۴۴۶۰ میلی لیتر بر مترمربع در روز بود که افزایش ۲۶ درصدی را نشان می دهد [۲].

کابیل و همکاران در سال ۲۰۱۶ در مورد بهبود عملکرد آب شیرین کن حوضچه ای خورشیدی با استفاده از pcm جهت ذخیره سازی گرمای متوسط در شرایط آب و هوایی مصر تحقیق کردند، نتایج آن ها نشان داد که عملکرد آب شیرین کن حوضچه ای خورشیدی با مواد تغییر فازدهنده ۶۸٪/۱۸ بیشتر از آب شیرین کن حوضچه ای ساده است [۳]. محمد الهراشه و همکاران در سال ۲۰۱۷ نتایج نمک زدایی خورشیدی با حوضچه خورشیدی تقویت شده توسط جمع کننده خورشیدی خارجی و pcm را مورد مطالعه قرار دادند که با به کارگیری

چکیده

در این تحقیق اثر ماده تغییر فاز دهنده پارافین واکس بر افزایش بهره وری یک نوع آب شیرین کن پله ای بهبود یافته جدید بررسی شده است. به دین منظور ۹ کیلوگرم پارافین در زیر صفحه جاذب این دستگاه جاگذاری و دستگاه مربوطه به همراه یک آب شیرین کن شیب دار استاندارد در تابستان ۱۴۰۰ در شهر کرمان مورد آزمایش قرار گرفته اند. نتایج آزمایش نشان می دهند که آب شیرین کن بهبود یافته با ماده تغییر فازدهنده عملکرد بسیار بهتری نسبت به آب شیرین کن شیب دار استاندارد دارد و در روزهای آزمایش بین ۶۰ تا ۸۰ درصد آب شیرین بیشتری تولید نموده است.

واژه های کلیدی: آب شیرین کن خورشیدی، آب شیرین کن پله ای بهبود یافته، ماده تغییر فاز دهنده، پارافین واکس

مقدمه

بسیاری از شهرها در بیشتر مناطق جهان به ویژه کشورهای در حال توسعه که عمدتاً در منطقه خاورمیانه واقع شده اند از کمبود آب شیرین رنج می برند. یکی از راه حل های اساسی برای تأمین آب آشامیدنی برای کشورهای دارای منابع محدود آب شیرین، صنعت آب شیرین کن است. روش های متداول تولید آب شیرین که بیشترین حجم تأمین آب شیرین را در جهان برعهده دارند شامل: نمک زدایی چند مرحله ای ناگهانی^۱، تقطیر چند اثره^۲ و اسمز معکوس^۳ می باشند. انرژی مورد نیاز روش های ذکر شده در حال حاضر از طریق سوخت های فسیلی است که با توجه به محدودیت این منابع و آلودگی های زیست محیطی ناشی از مصرف آن ها، استفاده از انرژی های تجدید پذیر راه حل مناسبی برای رفع این معضل است.

از میان انرژی های تجدید پذیر انرژی خورشیدی به دلیل قابلیت استفاده بالا در ایران و سایر نقاط جهان مورد توجه است و توسعه

^۱ Reverse Osmosis

^۱ Multi-stage Flash Desalination

^۲ Multiple-Effect Distillation



شیدار جدید با عنوان آب شیرین کن شیدار بهبود یافته توسط امیری طراحی و ساخته شده است. در این آب شیرین کن منطقه تبخیر و تقطیر از هم جدا شده و هوای اشباع شده در بالای حوضچه به وسیله گردش طبیعی بین منطقه تبخیر و فضای کندانسور که در قسمت زیرین آب شیرین کن تعبیه شده گردش می نماید.

یکی از روشهایی که می توان برای بالا بردن میزان تولید آب شیرین در آب شیرین کنهای خورشیدی استفاده کرد به کارگیری مواد تغییر فازدهنده است که با ذخیره انرژی مازاد روز ادامه روند تولید در ساعاتی که نور خورشید وجود ندارد (شب) میسر می شود. در این تحقیق به بررسی اثر استفاده از مواد تغییر فازدهنده بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی بهبود یافته مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مواد تغییر فازدهنده به دو دسته کلی آلی و معدنی تقسیم می شوند. مواد آلی شامل مواد پارافینی و غیر پارافینی می باشند. مواد معدنی هم به دو گروه هیدراتهای نمک و متالیکها تقسیم می شوند.

مواد معدنی دمای ذوب بالا ولی پایداری شیمیایی کمی دارند ولی مواد آلی برعکس آنها هستند. با مرور بر تحقیقات گذشته پارافین واکس به دلیل خصوصیتی از جمله ارزانی، فراوانی، پایداری شیمیایی در سیکلهای تغییر فاز و مهمتر از همه پایین بودن نقطه ذوب که حدود ۶۵-۵۰ درجه سانتیگراد می باشد، مناسب برای استفاده در آب شیرین کنها به عنوان ماده تغییر فاز دهنده جهت ذخیره حرارت می باشد. در این تحقیق با اضافه کردن ۹ کیلوگرم پارافین به آب شیرین کن پله ای شیدار بهبود یافته، افزایش راندمان آن در مقایسه با یک آب شیرین کن شیب دار استاندارد بررسی می شود.

تشریح دستگاه و آزمایشات

از آنجاکه آب شیرین کنهای خورشیدی در اشکال و اندازه های مختلفی ساخته می شوند، طبق مطالعات صورت گرفته و مقرر شد صفحه جاذب آب شیرین کن بهبود یافته حدود ۰/۵ مترمربع باشد. جهت گردش بهتر هوا سعی شده است که طول از عرض بزرگ تر باشد، بنابراین طول صفحه جاذب ۱ متر و عرض آن ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. شکل ۱ شماتیک آب شیرین کن ساخته شده را نشان می دهد. اجزای اصلی آب شیرین کن خورشیدی:

بدنه اصلی یا قاب کلیه اجزاء آب شیرین کن داخل آن قرار گرفته و مسیرهای آب ورودی و خروجی هم به وسیله این محفظه هدایت می شوند. با توجه به اینکه صفحه جاذب آب شیرین کن حدوداً نیم متر مربع می باشد و با توجه به اینکه یک فاصله هوایی در بالا و پایین صفحه جاذب به منظور گردش هوا بین ناحیه تبخیر و کندانسور در نظر گرفته شده است ابعاد بیرونی بیشتر از ابعاد صفحه جاذب می باشد. در جدول ۱ و شکل ۱ مشخصات و ابعاد آب شیرین ارایه شده است. در شکل ۲ نمای بالای آب شیرین کن بهبود یافته نشان داده شده است. تفاوت آب شیرین کن استاندارد با آب شیرین کن بهبود یافته در این است که در این دستگاه، فاصله ۲۰ سانتی متری در بالا و فاصله ۱۰ سانتی متری در پایین صفحه جاذب حذف شده و

pcm تولید آب شیرین افزایش می یابد و ۴۰٪ آن بعد از غروب خورشید اتفاق می افتد [۴].

کومار و همکاران در سال ۲۰۱۷ تحقیقات تجربی در مورد عملکرد یک آب شیرین کن حوضچه ای خورشیدی با استفاده از مواد pcm کپسوله شده و نانو ذرات را انجام دادند، نتیجه این بود که هدایت حرارتی pcm با استفاده از نانوذره افزایش و زمان شارژ و دشارژ حوضچه خورشیدی کاهش و انتقال حرارت افزایش می یابد که حاصل آن افزایش آب شیرین خروجی است [۵]. صفایی و همکاران در سال ۲۰۰۸ بالا بردن بازده حوضچه خورشیدی با استفاده از نانو ذرات اکسید گرافن و pcm پارافین را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که بازده آب شیرین کن حوضچه ای خورشیدی با استفاده از مواد فوق ۲۵٪ افزایش می یابد [۶].

آمارلو و همکاران در سال ۲۰۱۹ بهبود عملکرد حوضچه خورشیدی با استفاده از سیستم خنک کننده تابشی و مواد تغییر فاز دهنده را بررسی کردند. روش کار به این صورت بود که از دو کندانسور pcm و هوایی جهت چگالش بخار استفاده شد و جهت جذب حرارت خورشید و تولید بخار هم از کلکتور تخت استفاده شد، نتایج نشان داد که بهترین عملکرد هنگامی است که توأم از هر دو چگالنده استفاده شود و کندانسور pcm به عنوان کندانسور اصلی و کندانسور هوایی در انتهای سیستم به عنوان مکمل استفاده شد. در این حالت تولید آب شیرین ۲/۸۰۵ کیلوگرم بر مترمربع و عملکرد روزانه را ۳۱/۲ بهبود بخشید [۷]. باچان و همکاران در سال ۲۰۲۱ افزایش بهره وری آب شیرین کن خورشیدی با مواد تغییر فازدهنده و چند ماده جاذب آب را مورد تحقیق قرار دادند و دریافتند که اثر ترکیبی صفحه جاذب فین دار، فتیله پنبه و مواد تغییر فاز دهنده حداکثر نمک زدایی را فراهم می کند، همچنین نرخ تولید آب شیرین با استفاده ترکیبی از مواد تغییر فازدهنده و لوله ماریچ مس با تأمین حرارت خارجی به pcm از طریق کلکتور سهموی به آب شور باعث تولید ۱۰/۷۷ لیتر بر مترمربع در روز در مقایسه با آب شیرین کن معمولی که ۴/۴۸ لیتر بر مترمربع در روز است [۸]. جهان پناه و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثرات مواد تغییر فازدهنده با نقطه ذوب پایین را بر یک آب شیرین کن حوضچه ای خورشیدی تک شیب مورد بررسی تجربی قرار دادند. pcm مورد استفاده هیدرات نمکی با نقطه ذوب ۲۸ درجه سانتی گراد بود. نتایج آن ها نشان داد که اضافه کردن ۶ کیلوگرم pcm بهره وری کلی را ۳۰/۳٪ افزایش می دهد [۹].

آب شیرین کنهای پلکانی خورشیدی در مقایسه با آب شیرین کنهای حوضچه ای دارای مزایایی از جمله؛ دریافت بیشتر انرژی خورشیدی توسط صفحه جاذب، عمق کمتر آب و فاصله کم میان صفحه جاذب و پوشش شفاف که باعث بالا رفتن رطوبت نسبی شده و هوای حبس شده در آن سریعاً اشباع می شود، به همین دلیل نرخ تولید آب شیرین کن پلکانی از آب شیرین کن های حوضچه ای استاندارد بالاتر خواهد بود. مطالعات زیادی در مورد آب شیرین کن های حوضچه ای خورشیدی انجام شده است اخیراً یک آب شیرین کن



صفحه جاذب از یک صفحه آهنی به ابعاد 100×50 سانتیمتر که تمام سطح آن را حوضچه‌های متعدد پوشانده‌اند (مطابق شکل ۳) تشکیل شده است. جذب انرژی خورشید توسط این صفحه انجام می‌شود و به منظور افزایش ضریب جذب، این صفحه با رنگ سیاه روغنی پوشش داده شده است. در زیر صفحه جاذب محفظه pcm تعبیه شده است و در زیر محفظه pcm یک لایه عایق از جنس الاستومتری و به ضخامت ۱ cm قرار گرفته است تا از انتقال حرارت (اتلاف حرارت) به ناحیه کندانسور جلوگیری شود. بر روی عایق یک صفحه آهنی قرار گرفته است. بر روی این صفحه یک مبدل حرارتی به صورت یک لوله مارپیچ قرار گرفته است که آب شور ورودی در آن گردش می‌نماید و هم آب و بر روی عایق و در زیر آب‌شیرین‌کن استاندارد صفحه جاذب تمام کف دستگاه را می‌پوشاند در حالی که در آب‌شیرین‌کن بهبودیافته، دو کانال ارتباطی در بالا و پایین دستگاه قرار گرفته است که باعث گردش هوا بین قسمت کندانسور و فضای ساخته‌شده کاملاً یکسان می‌باشد ولی ابعاد صفحه جاذب آن‌ها متفاوت می‌باشد. با توجه به این نکته تعداد حوضچه‌ها در آب‌شیرین‌کن شیب‌دار استاندارد برابر ۱۶ و در آب‌شیرین‌کن بهبودیافته ۱۴ عدد می‌باشد. لازم به ذکر است به منظور یکسان بودن ابعاد دو دستگاه، یک فاصله هوایی در قسمت زیرین آب‌شیرین‌کن استاندارد قرار دارد که با استفاده از چسب اکواریوم از قسمت بالای صفحه جاذب جدا و درزبندی شده است.



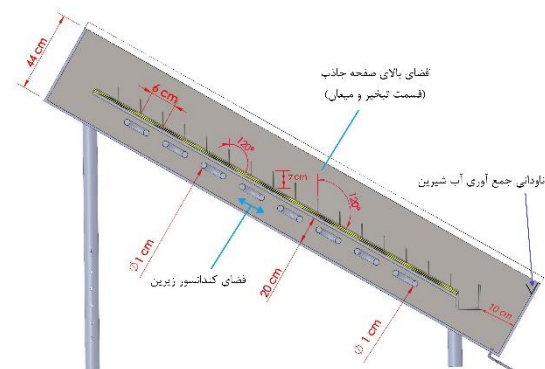
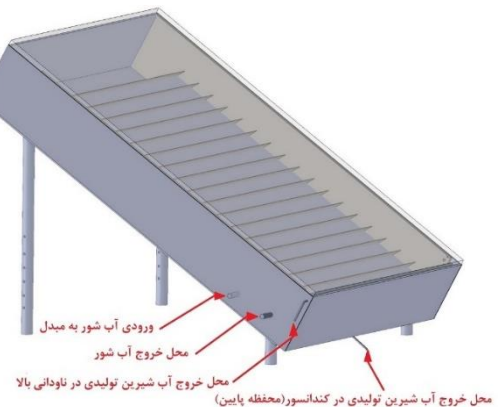
شکل ۳: عکسی از صفحه جاذب به همراه حوضچه‌ها

محفظه نگهدارنده ماده تغییر فاز دهنده: این محفظه به شکل مکعب مستطیل زیر صفحه جاذب نصب می‌شود و پس از پر شدن از ماده تغییر فاز دهنده به‌طور کامل مهر و موم و آب‌بندی شده است. (فضا برای افزایش حجم pcm باید در نظر گرفته شود). پارافین استفاده‌شده در این تحقیق ساخت شرکت ایرانی پویا است. مشخصات پارافین در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات ماده تغییر فاز دهنده

| مشخصات | مقادیر عددی |
|------------------------------------|------------------------------|
| چگالی در 15°C | 0.83 گرم بر سانتی متر مکعب |
| ویسکوزیته در 100°C | $3/8-4/2$ سانتی استوک |
| نقطه ذوب | $60-62$ درجه سانتیگراد |
| نقطه اشتعال | $190-210$ درجه سانتیگراد |

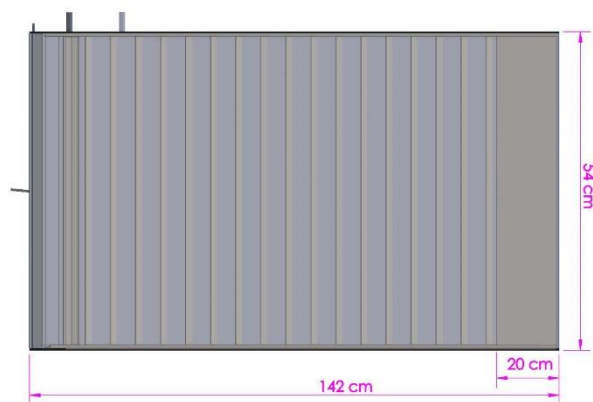
کل این فضا به صفحه جاذب اختصاص یافته است. بنابراین ابعاد صفحه جاذب در آب‌شیرین‌کن استاندارد بیشتر از آب‌شیرین‌کن بهبودیافته می‌باشد.



شکل ۱ شماتیک آب‌شیرین‌کن بهبودیافته

جدول ۱- مشخصات بدنه اصلی ساخته شده

| مشخصات بدنه اصلی | مقادیر |
|-------------------|------------------------------|
| طول، عرض و ارتفاع | $142 \times 54 \times 44$ Cm |
| ضخامت ورق | 0.7 mm |
| جنس ورق | گالوانیزه |



شکل ۲ نمای بالای آب‌شیرین‌کن بهبودیافته به همراه ابعاد

جهت اندازه گیری میزان تابش خورشید و از ترموکوپل نوع k برای ثبت داده های دمایی قسمتهای مختلف دستگاهها استفاده شده است. در شکل ۵ عکسی از آب شیرین کن های استاندارد و بهبود یافته به همراه pcm در حین آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۵: عکسی از دستگاهها در حین آزمایش

برای نشان داده وضعیت های مختلف دستگاه و کمیت های اندازه گیری شده از متغیرها و کمیت مختلفی استفاده می شود که در ادامه به توضیح آن ها می پردازیم. اولین کمیت میزان انرژی تابشی روزانه، E_S^D ، می باشد این کمیت کل انرژی تابشی خورشید که در طول روز به آب شیرین کن می رسد را نشان می دهد. برای محاسبه این پارامتر از میزان شدت تابش خورشید بر روی شیشه، $I_T(t)$ ، که به وسیله پیرانومتر نصب شده به موازات شیشه به دست آمده است، استفاده می شود:

$$E_S^D = A_S \times \int I_T(t) dt \quad (1)$$

که A_S مساحت قسمت دریافت کننده تابش یا همان مساحت شیشه و برابر $1.42 \times 0.54 = 0.767 \text{ m}^2$ می باشد. میزان آب شیرین تجمیعی V_F^{cum} نشان دهنده میزان آب شیرین تولیدی از ابتدای اندازه گیری تا زمان t می باشد و بر حسب میلی لیتر بیان می شود. میزان آب شیرین تولیدی کل یا روزانه (روز + شب) با V_F^T نمایش داده می شود.

برای ارزیابی عملکرد آب شیرین کن های استاندارد و بهبود یافته از بازده استفاده می شود. بازده نشان دهنده نسبت انرژی خروجی مفید به میزان انرژی ورودی به دستگاه می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{V_F^T \rho h_{fg}}{E_S^D} \times 100 \quad (2)$$

که $h_{fg} = 2450 \text{ kJ/kg}$ آنتالپی نهان تبخیر آب و ρ چگالی آب می باشد.

نقطه انجماد ۵۷-۶۰ درجه سانتیگراد

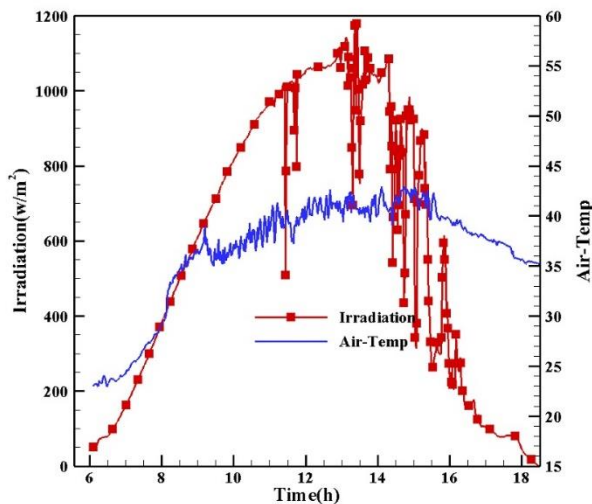
محتوی روغن ماکزیمم ۱/۵ درصد

برای تخمین جرم pcm مورد نیاز از این نکته که pcm باید کسری از انرژی تابشی روزانه را در خود ذخیره کند و مابقی انرژی دریافتی جهت عملکرد دستگاه در طول روز به کار گرفته خواهد شد، استفاده شده است. متوسط سالیانه انرژی تابشی خورشید برای شهر کرمان که در یک روز به سطح می تابد برابر با 20.9 MJ/m^2 است [۱۰]. با توجه به اینکه مساحت سطح جاذب آب شیرین کن 0.5 m^2 است، میزان انرژی خورشیدی که به صفحه جاذب می رسد، 10.45 MJ خواهد بود. با فرض اینکه صفحه جاذب ۵۵ درصد انرژی خورشیدی را جذب می کند و ۳۵ درصد انرژی جذب شده توسط صفحه جاذب در pcm ذخیره شود میزان انرژی که باید در pcm ذخیره شود برابر 2.01 MJ خواهد بود. با توجه به گرمای نهان ذوب پارافین که برابر است با 220 kJ/kg ، مقدار جرم پارافین برابر است با 9.1 kg و حجم مورد نیاز با در نظر گرفتن تغییر حجم پارافین در اثر تغییر فاز برابر 1297 cm^3 در نظر گرفته شده است. این حجم در زیر صفحه جاذب و با ابعاد $2/5 \times 49 \times 10.2$ سانتی متر مکعب ایجاد شده است. دستگاه آب شیرین کن بهبود یافته دارای یک فضای خالی زیر صفحه جاذب می باشد. عمق این فضا که نقش کندانسور کمکی را برعهده دارد ۲۰ سانتیمتر است و طول و عرض آن به اندازه طول و عرض داخلی باکس می باشد. آب شور ورودی قبل از ورود به حوضچه بالایی صفحه جاذب، ابتدا وارد یک مبدل که از چند لوله مارپیچ تشکیل شده، می شود و ضمن کمک به تقطیر بخار آب موجود در هوای مرطوب کندانسور، خود نیز پیش گرمایش می شود. عکسی از آب شیرین کن بهبود یافته ساخته شده در شکل ۴ نشان داده شده است.



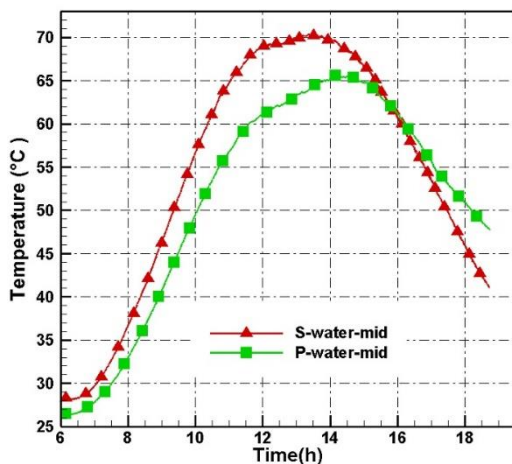
شکل ۴: عکسی از آب شیرین کن بهبود یافته

آزمایشات انجام شده: برای بررسی عملکرد دستگاه آب شیرین کن بهبود یافته مجهز به pcm یک آب شیرین کن استاندارد هم با همان ابعاد طراحی و ساخته شده است. آزمایشات بر روی دو دستگاه به طور همزمان و در یک محل انجام شده است. از دستگاههای دیتا لاگر برای ثبت داده ها، از دستگاه پیرانومتر کیپ اند زونن مدل CMP3



شکل ۷- تغییرات شدت تابش و دمای محیط در روز چهارم ژوئن (۱۴ خرداد)

تغییرات دمای آب حوضچه میانی آب شیرین کن استاندارد و آب شیرین کن استاندارد بهبودیافته با ماده تغییر فاز دهنده برای روزهای آزمایش در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده اند. همانطور که این شکل ها نشان می دهند به دلیل جذب و ذخیره سازی مقداری از انرژی خورشیدی ورودی توسط PCM و وجود کندانسور و گردش هوا بین قسمت تبخیر و کندانسور، دمای آب شور در دستگاه بهبودیافته با PCM حداکثر به حدود ۶۸ درجه سانتیگراد می رسد در حالی که دمای این حوضچه در آب شیرین کن استاندارد تا حدود ۷۳ درجه سانتیگراد می رسد. علاوه بر این، شکل ها نشان می دهند که کاهش دمای آب درون حوضچه ها در آب شیرین کن بهبود یافته در بعد از ظهر که انرژی خورشیدی کاهش می باید با نرخ کمتری کاهش می یابد.

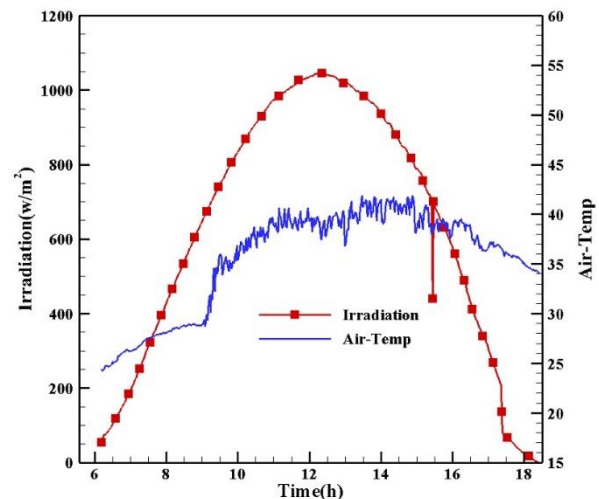


شکل ۸- تغییرات دمای آب شور حوضچه میانی دستگاهها در روز سوم ژوئن (۱۳ خرداد)

پارامتر دیگری که برای مقایسه آب شیرین کن استاندارد با آب شیرین کن بهبودیافته مورد استفاده قرار می گیرد نسبت عملکرد می باشد که به صورت نسبت میزان آب شیرین تولیدی توسط آب شیرین کن بهبودیافته بر میزان آب شیرین تولیدی توسط آب شیرین کن استاندارد می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$RP = \frac{V_F^{T,P}}{V_F^{T,S}} \quad (3)$$

در معادله فوق، بالانویس های S^{\dagger} و P^{\ddagger} به ترتیب برای نشان دادن آب شیرین کن استاندارد و آب شیرین کن بهبودیافته می باشند. با توجه به اینکه آب شور در محل آزمایش در دسترس نبوده است. از آب شبکه لوله کشی دانشگاه به عنوان آب شور ورودی استفاده شده است. آزمایشات در دبی آب شور ۸۰ میلی لیتر بر دقیق و با شیشه ای با ضخامت ۴ میلی متر و در دو روز متوالی (روزهای ۳ و ۴ ماه ژوئن ۲۰۲۱ مصادف با ۱۳ و ۱۴ خرداد ۱۴۰۰ هجری شمسی) انجام شده است. تغییرات تابش و دمای محیط در روزهای آزمایش در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

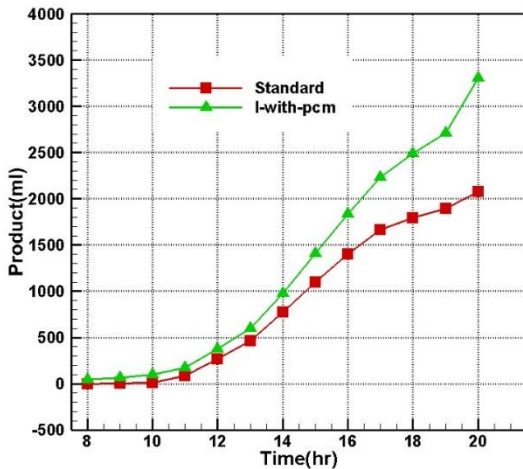


شکل ۶- تغییرات شدت تابش و دمای محیط در روز سوم ژوئن (۱۳ خرداد)

[†] Improved Step Solar still with PCM material (P)

[‡] Standard Step Solar still (S)

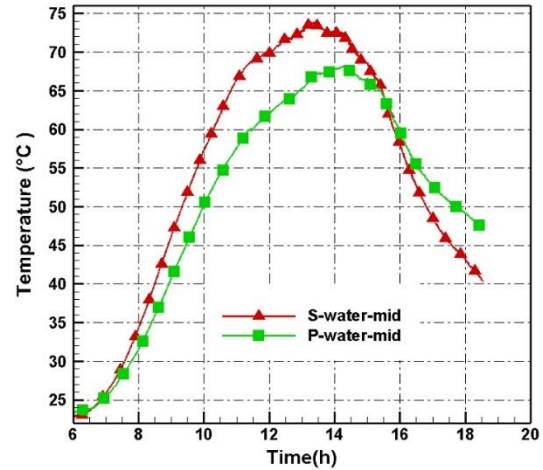
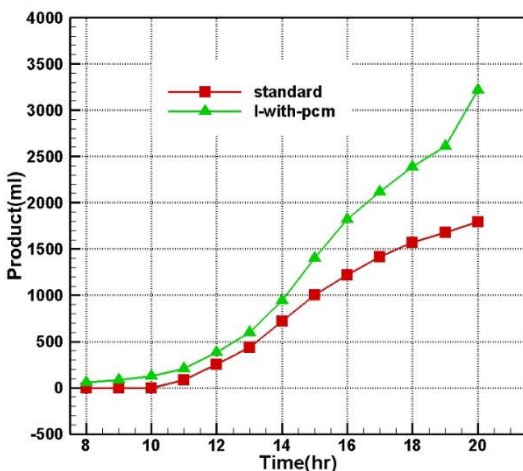
شکل ۱۱- نمودار تولید دستگاهها در روز سوم ژوئن (۱۳ خرداد)



شکل ۱۲- نمودار تولید دستگاهها در روز چهارم ژوئن (۱۴ خرداد)

جدول ۳- مقایسه عملکرد دستگاههای آب شیرین کن

| روز آزمایش | E_S^D ([MJ]) | نوع | V_F^T ([mL]) | η (%) | RP |
|-----------------|------------------|-----|------------------|------------|-----|
| ۱۳ خرداد | ۲۱/۴ | S | ۱۷۹۰ | ۲۰/۵ | - |
| | | P | ۳۲۱۵ | ۳۶/۹ | ۱/۸ |
| ۱۴ مهر (۴ ژوئن) | ۲۰/۰ | S | ۲۰۷۵ | ۲۵/۴ | - |
| | | P | ۳۳۰۵ | ۴۰/۵ | - |



شکل ۹- تغییرات دمای آب شور حوضچه میانی دستگاهها در روز چهارم ژوئن (۱۴ خرداد)

در شکل ۱۰ تغییرات دمای وسط صفحه جاذب در روز ۱۳ خرداد در طول آزمایش نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، وجود PCM باعث شده است در طول روز دمای صفحه جاذب آب شیرین کن بهبود یافته با PCM کمتر از دستگاه استاندارد باشد در حالی که در طول شب برعکس این اتفاق روی دهد و دمای دستگاه با PCM بیشتر از دستگاه استاندارد باشد و این عامل افزایش تولید آب شیرین در طول شب را در پی دارد.

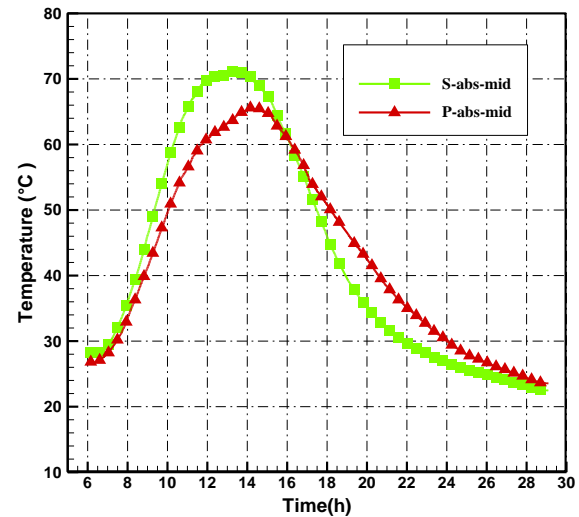
در جدول ۳ مقایسه ای بین عملکرد آب شیرین کن بهبود یافته و آب شیرین کن شیب دار استاندارد در روزهای آزمایش ارایه شده است. همانطور که مشاهده می شود آب شیرین کن بهبود یافته آب شیرین کن بهبود یافته بسیار بالاتر از آب شیرین کن شیب دار استاندارد است و به مقدار حدود ۴۰ درصد هم می رسد. لازم به ذکر است تغییرات بازده در روزهای مختلف به دلیل تغییرات تابش و از آن مهمتر دمای محیط متفاوت و تا حدی سرعت باد متفاوت در روزهای آزمایش می باشد. علاوه بر این همانطور که در این جدول مشاهده می شود آب شیرین کن بهبود یافته قادر بوده است در روزهای آزمایش تا ۳۳۰۵ میلی لیتر بر روز آب شیرین تولید نماید در حالی که آب شیرین کن شیب دار استاندارد نهایتاً مقدار ۲۰۷۵ میلی لیتر در روز تولید نماید. با توجه به مساحت دهانه انرژی تابشی خورشیدی به دستگاه ها که برابر $1.42 \times 0.54 = 0.767 \text{ m}^2$ می باشد بیشینه میزان آب شیرین تولیدی بر واحد سطح دریافت کننده آب شیرین کن بهبود یافته برابر ۴۳۰۰ میلی لیتر بر مترمربع بر روز خواهد بود.

تولید آب شیرین دستگاه بهبود یافته با PCM در روز سوم ژوئن (۱۳ خرداد) نسبت به دستگاه استاندارد ۷۹٪ و در روز چهارم ژوئن (۱۴ خرداد) ۵۹٪ بیشتر بود. شکل های ۱۱ و ۱۲ نشان دهنده میزان تولید تجمعی دستگاهها در روزهای آزمایش می باشد. ساعت ۲۰ در اینجا نشان دهنده میزان تولید شب دستگاهها می باشد.



منابع

1. Dashtban, M. and F.F. Tabrizi, "Thermal analysis of a weir-type cascade solar still integrated with PCM storage". *Desalination*, **2011**. 279(1-3): p. 415-422.
2. Arunkumar, T., et al., "The augmentation of distillate yield by using concentrator coupled solar still with phase change material". *Desalination*, **2013**. 314: p. 189-192.
3. Kabeel, A. and M. Abdelgaied, "Improving the performance of solar still by using PCM as a thermal storage medium under Egyptian conditions". *Desalination*, **2016**. 383: p. 22-28.
4. Al-harahsheh, M., et al., "Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM". *Applied Thermal Engineering*, **2018**. 128: p. 1030-1040.
5. Kumar Thakur, A. and S. Kumar Pathak, "Single basin solar still with varying depth of water: optimization by computational method". *Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment*, **2017**. 8(3): p. 216-223.
6. Safaei, M.R., H.R. Goshayeshi, and I. Chaer, "Solar still efficiency enhancement by using graphene oxide/paraffin nano-PCM". *Energies*, **2019**. 12(10): p. 2002.
7. Amarloo, A. and M. Shafii, "Enhanced solar still condensation by using a radiative cooling system and phase change material". *Desalination*, **2019**. 467: p. 43-50.
8. Bachchan, A.A., et al., "Productivity enhancement of solar still with phase change materials and water-absorbing material". *Materials Today: Proceedings*, **2021**. 38: p. 438-443.
9. Jahanpanah, M., et al., "Experimental investigation of the effects of low-temperature phase change material on single-slope solar still". *Desalination*, **2021**. 499: p. 114799.
10. Safaripour, M. and M. Mehrabian, "Predicting the direct, diffuse, and global solar radiation on a horizontal surface and comparing with real data". *Heat and mass transfer*, **2011**. 47(12): p. 1537-1551.



شکل ۱۰- تغییرات دمایی وسط صفحه جاذب دستگاهها در روز سوم ژوئن (۱۳ خرداد)

نتیجه گیری

در این تحقیق اثر PCM بر عملکرد یک آب شیرین کن حوضچه‌ای شیب‌دار بهبودیافته به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور مقایسه نتایج دستگاه بهبودیافته با PCM یک دستگاه حوضچه‌ای شیب‌دار استاندارد نیز ساخته و آزمایشات به صورت هم‌زمان روی هر دو دستگاه انجام و نتایج زیر به دست آمد:

۱- آب شیرین کن بهبود یافته در روزهای آزمایش عملکرد بسیار بهتری نسبت به آب شیرین کن استاندارد داشته است به نحوی که در روز اول ۸۰ درصد و در روز دوم ۶۰ درصد بیشتر از آب شیرین کن استاندارد آب شیرین تولید کرده است.

۲- به علت وجود کندانسور و ذخیره سازی انرژی در PCM، دمای صفحه جاذب و آب شور داخل حوضچه‌ها در آب شیرین کن بهبودیافته با PCM کمتر از دمای نقاط مشابه در آب شیرین کن استاندارد می باشد.

۳- پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده باعث افزایش تولید دستگاه بهبودیافته همراه با PCM در شب شد که میزان آن در تاریخ ۴ ژوئن به میزان ۳۳۰۵ میلی لیتر بود.

۴- اثر PCM باعث شد در ساعات پایانی روز و اوایل شب دمای صفحه جاذب و آب شور روی آن در دستگاه بهبودیافته با PCM نسبت به دستگاه استاندارد تا حدود ۷°C بالاتر باشد و نتیجه آن افزایش تولید آب شیرین خروجی بود.

ACEC2021-98631

بهینه یابی فرم ساختمان بلند با رویکرد بهره گیری حداکثر از تابش خورشیدی و نور طبیعی

شکیبا زکایی^۱، سعید حقیر^۲، مهدیه اب روش^{۳*}

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد تکنولوژی (گرایش دیجیتال)، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Shakiba.zokaei@ut.ac.ir

^۲دانشیار گروه معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران، Saeed.haghir@ut.ac.ir

^۳استادیار گروه معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران، abravesh@ut.ac.ir

چکیده

انرژی در ساختمان‌های موجود تبدیل به یکی از مسائل عمده در معماری شده است. کاهش مصرف انرژی مستلزم اعمال راه حل‌های جدیدی با رویکرد معماری پایدار محیطی است. از جمله این پاسخ‌ها بهینه‌یابی فرم و طراحی نماهای پاسخگو و هوشمند می‌باشد. در نتیجه شیوه دست یافتن به فرم بهینه ساختمان‌های بلند به ویژه در ساختمان اداری حائز اهمیت می‌باشد. در این پروژه ارائه طرح یک ساختمان بلند با راه کارهای ویژه از جهت عملکرد می‌باشد که در آن به کیفیت و کارایی فضایی و همچنین مسائل زیست محیطی توجه شده است. [2]

۲- روش پژوهش

بستر مورد نظر قرارگیری این پروژه در شهر تهران (میدان ونک) می‌باشد و با توجه به کوهپایه‌ای بودن این شهر، اهمیت وجود تابش در زمستان حائز اهمیت می‌باشد. پس در این پژوهش بر دریافت بیشینه نور روز در زمستان تمرکز شده است. برای رسیدن به این هدف، ابتدا ۶ شکل ساده برای پلان‌ها در نظر گرفته شده است. این فرم‌ها شامل پلان دایره، بیضی، شش ضلعی، مربع، مستطیل با کشیدگی شمالی - جنوبی و مستطیل با کشیدگی شرقی - غربی می‌باشد که با اندازه‌های مشخصی با توجه به سطح زیر بنا مورد نیاز در طرح در نظر گرفته شده اند. (سطح زیربنا برای برج ۲۰۰۰ متر مربع در نظر گرفته شده است)

هر یک از این فرم‌ها در حالت‌های مختلف بررسی شدند و میزان تابش آن‌ها با توجه به محل سایت پروژه، هم به صورت سالیانه و هم به صورت ماهیانه (در ماه‌های سرد سال) بدست آمد. شکل‌های پایه در ارتفاع با استفاده از مبانی هندسی زیر به فرم‌هایی رسیدن که به صورت کامل بررسی می‌شود:

حالت اول: ساده بدون هیچ تغییری

حالت دوم: پیچیده شده در هر طبقه (Twist)

برج در زوایای مشخصی چرخیده شده و بهترین حالت‌ها بررسی خواهد شد.

حالت سوم: باریک شونده به سمت بالا (Taper)

برای داشتن مساحت مورد نیاز و همزمان تغییرات پلان‌ها از بزرگ به کوچک، از موتور گالاپاگوس (Galapagos) برای یافتن بهترین حالت اندازه مولفه‌های اولیه در هر یک از پلان‌ها استفاده شد.

حالت چهارم: چرخانده شده و باریک شونده به سمت بالا (Twist and Taper)

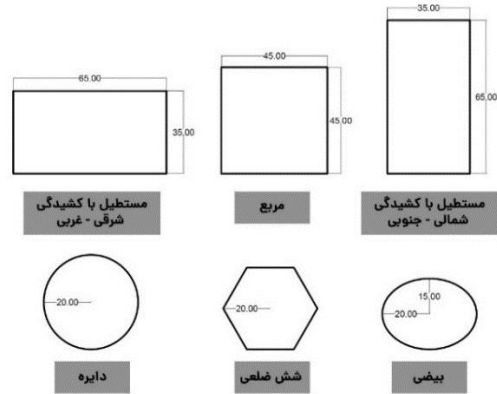
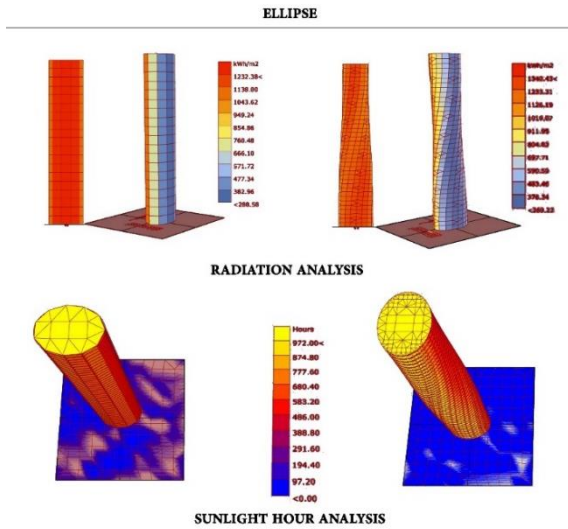
امروزه مسئله تامین نور برای کارهای روزمره اهمیت ویژه‌ای دارد و با توجه به افزایش مصرف انرژی، استفاده از انرژی خورشیدی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. استانداردهای نور روز به شکل ساختمان‌ها و محیط شهری کمک قابل توجهی می‌کند. پس در جایگاه یک معمار یافتن راهکارهایی با توجه به تمام شرایط از جمله آسایش کاربر، به خطر افتادن منابع تامین انرژی و ... مورد انتظار می‌باشد. دسترسی مستقیم خورشیدی به ساختمان‌های موجود و جدید را می‌توان با استفاده از پوسته‌های هوشمند و یا فرم ساختمان کنترل کرد. برای رعایت حقوق خورشیدی ابعاد ساختمان‌ها، به ویژه ساختمان‌های بلند نمی‌توانند از استانداردها تجاوز کنند تا تابش کافی برای تمام ساختمان‌ها تضمین شود. اما به ناچار در دنیای امروزی به علت افزایش جمعیت و رشد شهرها، تقاضا برای فضاهای اداری و مسکونی و ... افزایش یافته در نتیجه برای تحقق اهداف و حقوق اولیه شهروندان گرایش به بلند مرتبه سازی نیز افزایش یافته است. امروزه با کمک نرم افزارهای طراحی محیطی و پارامتریک بر اساس روش‌های موجود می‌توان به فاکتورهایی در رابطه معماری و مفاهیم دقیق تر مربوط به فرم ساختمان‌ها به ویژه ساختمان‌های بلند دست یافت. در نتیجه با استفاده از پردازش اطلاعات و تحقیقات پیش از ساخت می‌توان فرم ساختمان را به گونه‌ای طراحی و بهینه‌یابی کرد تا اهداف معمار محقق شود. رویکرد این پژوهش شبیه‌سازی فرم اولیه، حجم و شکل ساختمان بلند برای کنترل دریافت نور با توجه به پارامترهای محیط، بستر، اقلیم و نور روز در سایت مورد نظر می‌باشد.

واژه های کلیدی

روش‌های طراحی؛ پردازش اطلاعات؛ شبیه‌سازی؛ بهینه‌سازی؛ فرم‌یابی؛ ساختمان بلند؛ نور روز

۱-مقدمه

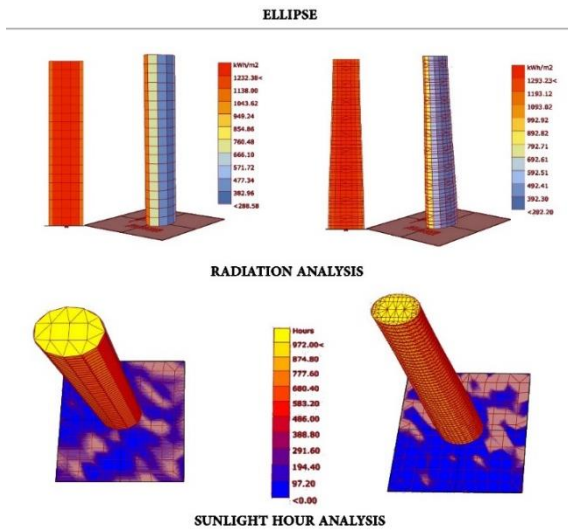
در ایران حدود ۴۰ درصد انرژی کشور در حوزه ساختمان مصرف می‌شود و ساختمان‌های بلندمرتبه، بخش اعظمی از این مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند. با توجه به طرح ساختمان‌های بلند در دنیایی کنونی تامین نورگیری مسئله بسیار پر اهمیت است. همچنین افزایش تحقیقات در دنیای انرژی کارآمد، استانداردها و قوانین جدید را حاصل بخشیده است. [1] در این راستا، طراحی با انرژی کارآمد در ساختمان‌های جدید و افزایش بهره‌وری



شکل ۱. شکل های در نظر گرفته شده برای شروع مطالعات بهینه سازی ساختمان بلند

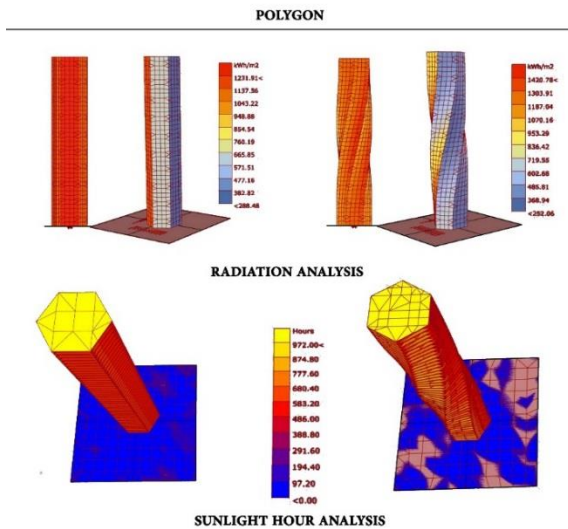
شکل ۳. میزان دریافت تابش سالیانه برج با شکل پلان بیضی سمت چپ در حالت ساده - سمت راست در حالت چرخانده شده

بهترین حالت های حاصل از نتیجه گیری هر کدام از موارد در نظر گرفته می شود و هر دو حالت Twist و Taper شده نیز بررویشان اعمال خواهد شد. در نهایت: چرخش پایه (Base rotation) تمام حالات ذکر شده مجدداً با چرخش پایه برای جهت گیری در سایت دوباره مورد بررسی قرار گرفت تا ماکسیمم تابش بدست آید.

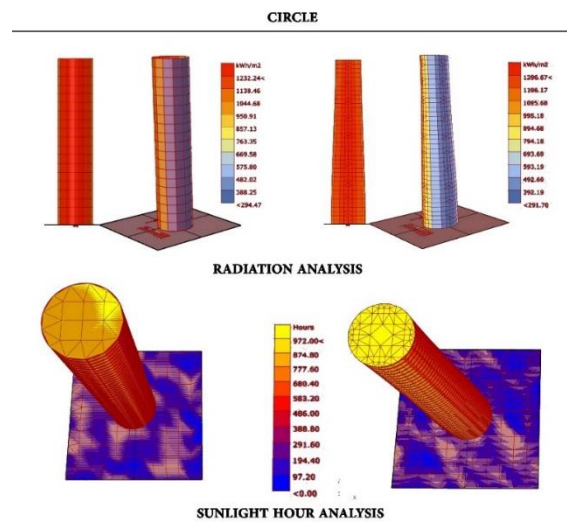


شکل ۴. میزان دریافت تابش سالیانه برج با شکل پلان بیضی سمت چپ در حالت ساده - سمت راست در حالت کوچک شونده به سمت بالا

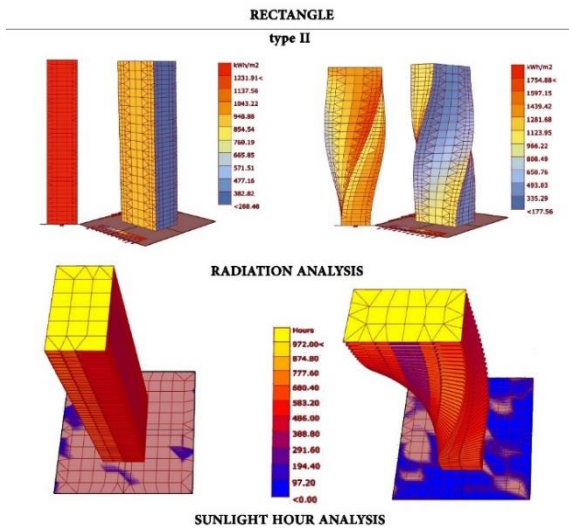
۳- بررسی سالیانه در این تحقیق بررسی سالیانه، صرفاً جهت آشنایی با عملکرد سایت و نحوه تابش به صورت کلی انجام شده است و مبنای طراحی نمی باشد. نتایج حاصل از تحلیل های بالا با استفاده از پلاگین lady bug در نرم افزار grasshopper انجام شد [3] و به صورت مصور در شکل های زیر در حالت تابش سالیانه مشاهده می شود. تمام شکل های پلان در نظر گرفته شده در حالت های ساده، پیچیده شده، باریک شونده به سمت بالا بررسی شده است. طیف رنگی از آبی تا قرمز نشان دهنده شدت تابش رسیده شده به بدنه برج می باشد. همانطور که مشاهده می شود بخش های جنوبی به رنگ قرمز هستند که بیشینه تابش را در آن جهت نشان می دهد و هر چه به بخش های شمالی نزدیک می شود از طیف های قرمز رنگ به طیف های آبی می رسد.



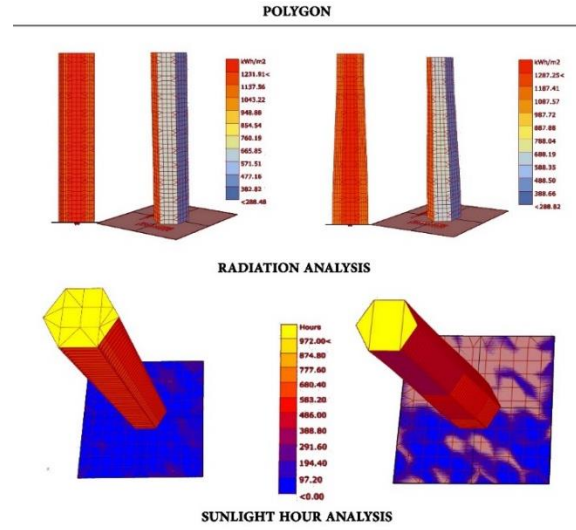
شکل ۵. میزان دریافت تابش سالیانه برج با شکل پلان شش ضلعی سمت چپ در حالت ساده - سمت راست در حالت کوچک شونده به سمت بالا



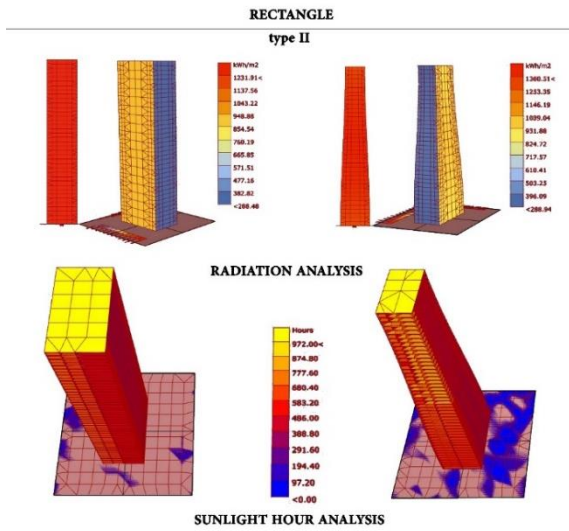
شکل ۲. میزان دریافت تابش سالیانه برج با شکل پلان دایره (سمت چپ در حالت ساده - سمت راست در حالت کوچک شونده به سمت بالا)



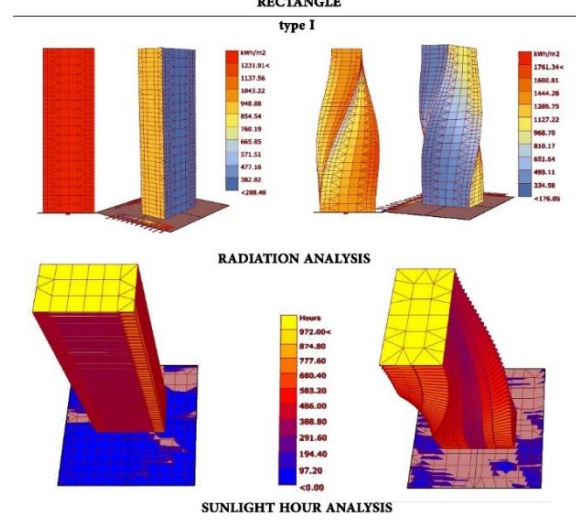
شکل ۹. میزان دریافت تابش سالیانه برج با شکل پلان مستطیل عمودی سمت چپ در حالت ساده - سمت راست در حالت چرخانده شده



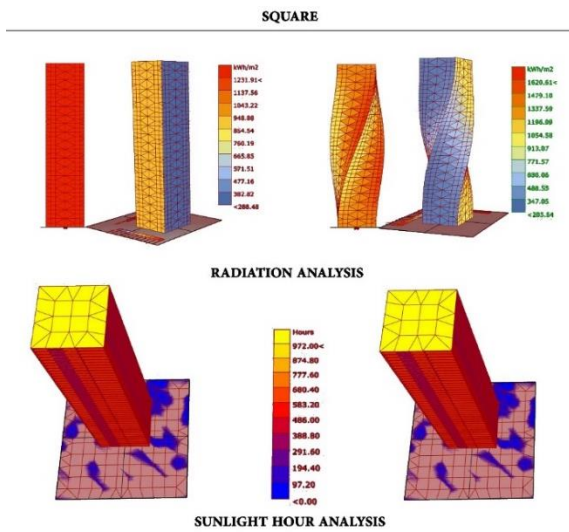
شکل ۶. میزان دریافت تابش سالیانه برج با شکل پلان شش ضلعی سمت چپ در حالت ساده - سمت راست در حالت کوچک شونده به سمت بالا



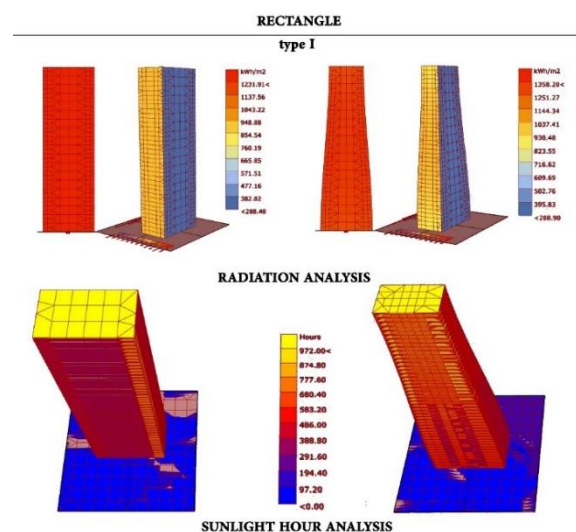
شکل ۱۰. میزان دریافت تابش سالیانه برج با شکل پلان مستطیل عمودی سمت چپ در حالت ساده - سمت راست در حالت کوچک شونده به سمت بالا



شکل ۷. میزان دریافت تابش سالیانه برج با شکل پلان مستطیل افقی سمت چپ در حالت ساده - سمت راست در حالت چرخانده شده



شکل ۱۱. میزان دریافت تابش سالیانه برج با شکل پلان مربع سمت چپ در حالت ساده - سمت راست در حالت چرخانده شده



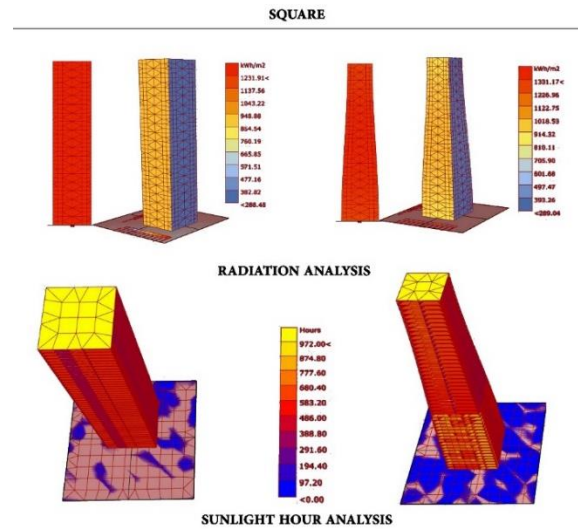
شکل ۸. میزان دریافت تابش سالیانه برج با شکل پلان مستطیل افقی سمت چپ در حالت ساده - سمت راست در حالت کوچک شونده به سمت بالا

-بررسی ماهیانه

برای بررسی ماهیانه میزان تابش که هدف اصلی تحقیقات در این پروژه می-باشد، دقیق تر عمل می شود. در نتیجه زاویه چرخش برای داشتن شکل twist شده و یا جهت گیری شکل پایه در سایه، در زوایای بین ۴۵- تا ۴۵+ در نظر گرفته می شود و تک تک زاویه ها به صورت مجزا بررسی می-شود تا به بهترین زاویه برسیم ولی از آن جا که داده های بسیار زیادی می-باشد به صورت جدول جامعی به رساله ضمیمه گشته است. نتایج حاصل از تحلیل های بالا با استفاده از پلاگین lady bug در نرم افزار grasshopper انجام شد [3] و به صورت آمار دقیق در جدول های زیر در حالت تابش ماهیانه در برخی زوایای خاص، که بیشینه تابش را به ما می-دهد، قرار داده شده است. [4]

۵- نتایج بررسی ماهیانه

باتوجه به جدول اکسل ضمیمه گشته که خروجی دقیقی از پلاگین ladybug از میزان تابش دریافتی به ساختمان می باشد، ماکسیمم میزان تابش های مدنظر در فرم های متفاوت با در نظرگیری زاویه قرارگیری برج در هر حالت بدست آمد که در جدول زیر نمایش داده شده است.



شکل ۱۲. میزان دریافت تابش سالیانه برج با شکل پلان مربع سمت چپ در حالت ساده - سمت راست در حالت کوچک شونده به سمت بالا

جدول ۱. نتایج بررسی دریافت بیشینه تابش ماهیانه برای شکل های ساده

| شکل | ساده بدون چرخش پایه | ساده با چرخش پایه | زاویه قرارگیری پایه در سایه |
|------------------------------|---------------------|-------------------|-----------------------------|
| مستطیل با کشیدگی شمالی-جنوبی | 7/238e+6 | 7/2747e+6 | +۷ |
| مستطیل با کشیدگی شرقی-غربی | 7/6591e+6 | 7/6752e+6 | -۴ |
| مربع | 7/0682e+6 | 7/0916e+6 | -۵ |
| بیضی | 4/7817e+6 | 4/7817e+6 | ۰ |
| شش ضلعی | 4/5499e+6 | 4/5655e+6 | +۹ |
| دایره | | 4/7496e+6 | |

جدول ۲. نتایج بررسی دریافت بیشینه تابش ماهیانه برای شکل های چرخانده شده

| شکل | چرخانده شده بدون چرخش پایه | زاویه چرخش برج | چرخانده شده با چرخش پایه | زاویه قرارگیری پایه در سایه |
|------------------------------|----------------------------|----------------|--------------------------|-----------------------------|
| مستطیل با کشیدگی شمالی-جنوبی | 6/8861e+6 | -۹ | 6/9376e+6 | -۴۵ |
| مستطیل با کشیدگی شرقی-غربی | 7/3747e+6 | ۵ | 7/3788e+6 | -۷ |
| مربع | 6/4167e+6 | ۸ | 6/42e+6 | -۱۰ |
| بیضی | 4/5142e+6 | -۱ | 4/5142e+6 | ۰ |
| شش ضلعی | 4/2178e+6 | ۱۱ | 4/2191e+6 | +۲ |
| دایره | - | - | - | - |



جدول ۳. نتایج بررسی دریافت بیشینه تابش ماهیانه برای شکل‌های کوچک شونده به سمت بالا

| شکل | کوچک شونده بدون چرخش پایه | کوچک شونده با چرخش پایه | زاویه قرارگیری پایه در سایت |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| مستطیل با کشیدگی شمالی-جنوبی | 6/8111e+6 | 6/837e+6 | -۶ |
| مستطیل با کشیدگی شرقی-غربی | 7/153e+6 | 7/1654e+6 | -۲ |
| مربع | 6/8011e+6 | 6/8061e+6 | -۶ |
| بیضی | 6/4551e+6 | 6/4559e+6 | -۲ |
| شش ضلعی | 6/2864e+6 | 6/2968e+6 | +۷ |
| دایره | | 6/3225e+6 | |

جدول ۴. نتایج بررسی دریافت بیشینه تابش ماهیانه بهترین خروجی برای شکل‌های چرخانده شده و کوچک شونده به سمت بالا

| شکل | چرخانده شده بدون چرخش پایه | زاویه چرخش برج | حاصل خروجی هر دو حالت قبلی با چرخش پایه | زاویه قرارگیری پایه در سایت |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------|-----------------------------------------|-----------------------------|
| مستطیل با کشیدگی شرقی-غربی کوچک شونده | 7/2079e+6 | -۱۱ | 7/2129e+6 | +1 |

جدول ۵. بررسی بهترین نتایج در دریافت بیشینه تابش زمستان و مقایسه آن با دریافت تابش تابستان

| Rectangle type II | Alternations | Base rotation | Total radiation winter | Total radiation summer |
|-------------------|----------------------|---------------|------------------------|------------------------|
| Taper/Twist | ratio ½ + degree -11 | 1 | 7/2129e+6 | 8.7422e+6 |
| Taper | ratio ½ | -2 | 7/1654e+6 | 8.6556e+6 |
| Twist | degree 5 | -7 | 7/3788e+6 | 9.5918e+6 |
| Simple | - | -4 | 7/6752e+6 | 9.0927e+6 |

Built Form In Tropical Climate. in The 5th International Seminar on Sustainable Environment Architecture. 2004. Citeseer.

- [3] Roudsari, M.S., M. Pak, and A. Smith. *Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. in Proceedings of the 13th international IBPSA conference held in Lyon, France Aug. 2013.*

- [4] Suyoto, W., A. Indraprastha, and H.W. Purbo, *Parametric approach as a tool for decision-making in planning and design process. Case study: Office tower in Kebayoran Lama. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2015. 184: p. 328-337.*

۶-نتیجه گیری

باتوجه به جداول بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که در تمام حالت‌های در نظر گرفته شده، مستطیل با کشیدگی شرقی-غربی بهترین نتایج و ماکسیمم تابش در زمستان را دارد. سپس دوباره این مستطیل در حالت‌های مختلف آن در فصل تابستان نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن را در جدول زیر مشاهده می‌کنید. بهترین گزینه باتوجه به این نتایج، حالتی می‌باشد که در زمستان بیشترین جذب (که تمام موارد در این نوع مستطیل، به علت اختلاف کم حاصل از نتایج نسبت به یکدیگر مورد قبول است) و در تابستان کمترین جذب را نسبت به موارد دیگر داشته باشد.

۷-منابع

- [1] Jyoti, A., *High Rise Morphologies: Architectural Form Finding in a Performative Design Search Space of Dense Urban Contexts. 2015.*
- [2] Ahmad, M.H., D.R. Ossen, and C.S. Ling. *Impact Of Solar Radiation On High-Rise*



ACEC2021-98875

بررسی اثر بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده در ترکیب سیستم‌های سرمایش تراکمی و سرمایش آزاد

سیدمحمدحجت محمدی^۱

استادیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته؛ smh.mohammadi@kgut.ac.ir

چکیده

ذخیره‌سازی انرژی حرارتی یک فناوری با پتانسیل بالا برای کاربردهای حرارتی متفاوت است که می‌تواند راه مناسبی برای اصلاح شکاف بین عرضه و تقاضای انرژی باشد. یکی از روش‌های نوین و کارآمد در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. هدف از این پژوهش تحلیل انرژی و انرژی ترکیب دو سیستم سرمایش آزاد و سرمایش تراکمی است که در آن‌ها از مواد تغییر فاز دهنده به منظور صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی و بهبود عملکرد سیستم، استفاده شده است. ماده‌ی تغییر فاز دهنده دما متوسط بکار رفته در سیستم سرمایش آزاد در طول شب با هوای محیط شارژ می‌شود و در طول روز و در طی فرآیند تخلیه، با خنک کردن هوای ورودی به کندانسور سیستم تراکمی، سبب کاهش مصرف انرژی در سیستم خنک کننده ساختمان می‌گردد. از سوی دیگر، تخلیه انرژی حرارتی ذخیره شده در مواد تغییر فاز دهنده در طول ساعات اوج مصرف صورت می‌گیرد. در این ساعات هزینه انرژی بالاتر است و بنابراین با استفاده از این روش ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، می‌توان در هزینه‌های انرژی الکتریکی یک ساختمان نیز صرفه‌جویی نمود. بررسی فنی و اقتصادی این سیستم ترکیبی، نشان می‌دهد که ۴/۸۵٪ کاهش مصرف انرژی الکتریکی، ۱۴/۷۶٪ کاهش در ساعات اوج مصرف و ۶/۷۱٪ کاهش در قبض برق قابل انتظار است.

واژه‌های کلیدی: سیستم سرمایش تراکمی، سیستم سرمایش آزاد، مواد تغییر فاز دهنده، تحلیل انرژی و انرژی، مطالعه اقتصادی.

مقدمه

سیستم‌های سرمایش و تهویه مطبوع قسمت عمده‌ای از توان تولیدی نیروگاه‌ها را، به خصوص در ساعات اوج مصرف، به خود اختصاص می‌دهند. به گفته احمدرضا توکلی، مجری طرح‌های بهینه‌سازی سابقا، در سال ۱۳۹۵ حدود ۳۰ درصد از انرژی مصرف شده در ساختمان‌ها، برای سرمایش و تهویه مطبوع به کار رفته است [۱].

اندیشمندان حوزه انرژی، همواره در تلاش برای ارائه راهکارهایی هستند که بتواند میزان مصرف انرژی در سیستم‌های سرمایش و تهویه مطبوع را کاهش دهد. عمده این راهکارها بر دو اساس استوار است؛ بهبود عملکرد سیستم سرمایش [۲] و یا انتقال مصرف انرژی از ساعات پیک مصرف به ساعات غیر پیک. یکی از روش‌هایی که در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از سرمایش آزاد و ذخیره بار سرمایشی در مواد تغییر فاز دهنده (PCM) است. یکی از مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از خنکای هوای شب و ذخیره‌سازی آن توسط زالبا و همکاران [۳] انجام شده است. در این تحقیق به بررسی تجربی و آماری پدیده‌های موثر در یک سیستم سرمایش آزاد پرداخته شده است. بدین منظور، سرمای شب هنگام محیط در مواد تغییر فاز دهنده ذخیره و در طول روز برای تهویه مطبوع استفاده شده است. نتایج نشان داده است که ضخامت ماده تغییر فاز دهنده اثر قابل توجهی بر فرآیند انجماد دارد اما در فرآیند ذوب، دمای هوا نسبت به ضخامت ماده تغییر فاز دهنده تاثیر بیشتری می‌گذارد. کمالی [۴] به بررسی مروری مطالعات انجام شده در زمینه بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های جابجایی آزاد پرداخته است. در این پژوهش به مطالعه اثر نوع ماده تغییر فاز دهنده، عوامل موثر بر فرآیند شارژ و تخلیه، امکان‌سنجی کاربرد مواد تغییر فاز دهنده و نیز تحلیل اقتصادی استفاده از سیستم‌های سرمایش آزاد، پرداخته شده است. وی بیان داشته است که هزینه اولیه یک سیستم سرمایش آزاد فقط در حدود ۱۰٪ بیشتر از سیستم‌های تهویه مطبوع متداول می‌باشد، اما به این تکنولوژی هنوز به عنوان یک تکنولوژی تجاری نگاه نمی‌شود. مصفا و همکارانش [۵] تحلیل انرژی و انرژی یک سیستم خنک کننده آزاد که از یک واحد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی گرمای نهان با مواد تغییر فاز دهنده متعدد استفاده می‌نمود، را انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که افزایش راندمان انرژی به علت کاهش دمای هوای ورودی بسیار چشمگیرتر از اثر افزایش دبی جریان هوا در طول دوره شارژ است. یک تحقیق

^۱ Phase Change Material

در شرایط آب و هوایی گرم و خشک همانند شهر کرمان، دمای بالای هوا در ساعات اوج مصرف سبب می‌شود که از یک سو میزان بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان‌ها زیاد شود و از سوی دیگر، هوای گرم سبب می‌شود ضریب عملکرد سیستم تهویه مطبوع نیز کاهش یابد. این دو عامل در کنار هم، منجر به افزایش هزینه انرژی الکتریکی در ساختمان می‌شود. همانگونه که بیان شد، یکی از راهکارهای مدیریت مصرف انرژی در ساختمان استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. بیشتر پژوهش‌هایی که در این زمینه صورت گرفته است، به بررسی استفاده از PCM در دیوارهای ساختمان پرداخته‌اند. به نظر می‌رسد انجام یک مطالعه موردی که با توجه به شرایط آب و هوایی شهر کرمان و تعرفه‌های بخش مسکونی در این اقلیم، به بررسی اثر بکارگیری PCM در سیستم تهویه مطبوع ساختمان بپردازد، می‌تواند نتایج جدیدی را در زمینه این شیوه مدیریت مصرف انرژی ارائه دهد. از این رو در این تحقیق، اثر بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده بر انرژی مصرفی سیستم تهویه مطبوع و میزان مصرف در ساعات اوج بار مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین به منظور کاهش هزینه‌های سیستم، برای شارژ PCM از هوای خنک در طول شب استفاده می‌شود. اثر کاربرد PCM بر راندمان انرژی و انرژی سیستم نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. از سوی دیگر با یک تحلیل اقتصادی دقیق، می‌توان میزان کاهش هزینه‌های یک ساختمان نمونه را مشخص نمود. همچنین در این مطالعه، به بررسی ساعتی مصرف در ماه‌های گرم سال و اثر بکارگیری PCM بر مصرف ساعتی انرژی الکتریکی و ارزیابی اقتصادی این فرآیند، پرداخته می‌شود.

توصیف مسئله

از آنجایی که هدف در این پژوهش، بررسی میزان کاهش مصرف انرژی و کاهش مصرف در ساعات پیک، افزایش راندمان انرژی و انرژی سیستم و در نهایت تعیین میزان صرفه‌جویی در هزینه‌های مرتبط با قبض برق ساختمان است، باید ابتدا سیستم مینا که در آن از مواد تغییر فاز دهنده استفاده نشده است، معرفی شود. سپس، پیکربندی سیستمی که در آن از PCM به منظور ذخیره‌سازی انرژی حرارتی استفاده شده است، معرفی گردد.

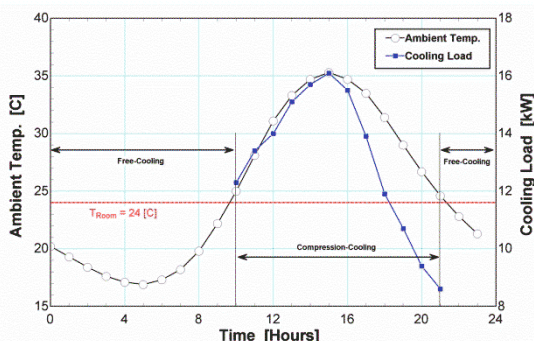
سیستم مینا

شکل ۱ نمودار توصیفی یک سیستم تهویه مطبوع تراکمی را نشان می‌دهد که در این پژوهش، سیستم مینا نامیده می‌شود. همچنین شکل ۲ نمودار دما - انترپنی را برای سیستم نشان داده شده در شکل ۱ با مبرد R134a، نمایش می‌دهد. در این سیستم آبی که وظیفه جذب حرارت از ساختمان و انتقال آن به مبرد سیستم سرمایش تراکمی را دارد، با دمای 17°C به اواپراتور سیستم سرمایش وارد و پس از رسیدن به دمای هدف (12°C) از آن خارج می‌شود (فرآیند ۷ تا ۵). این آب وارد فن‌کویل‌های ساختمان می‌شود و پس از تامین بار سرمایشی ساختمان به اواپراتور برمی‌گردد. از سوی دیگر مبرد که در کمپرسور دما و فشار آن افزایش یافته است و

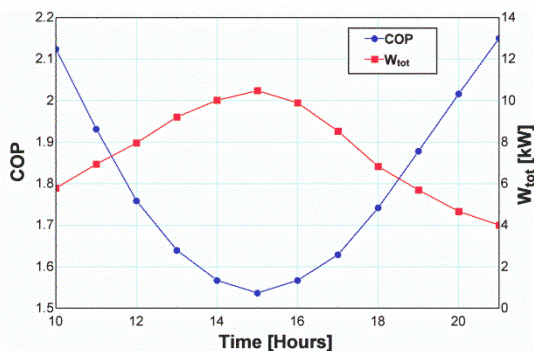
دقیق و جامع در ارتباط با چالش‌های پیش روی کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های سرمایش آزاد توسط وقاص و ضیاءالدین [۶] صورت گرفته است. از دیدگاه ایشان این چالش‌ها عبارتند از: نوع ماده تغییر فاز دهنده، خواص ترموفیزیکی این مواد و هندسه کپسول‌های محتوی ماده تغییر فاز دهنده. ایشان همچنین به پتانسیل سنجی کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن به دلیل بکارگیری مواد تغییر دهنده نیز پرداخته‌اند. تامبی‌دورای و همکاران [۷] در یک مطالعه مروری به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در سرمایش آزاد ساختمان‌ها پرداخته‌اند. ایشان همچنین در مورد پتانسیل کاربرد تکنولوژی سرمایش آزاد در آینده، دامنه پیشرفت‌ها در این حوزه و نیز سیاست‌گذاری‌هایی که باید توسط دولت‌ها در این خصوص صورت گیرد اظهار نظر کرده‌اند. سوآی‌فین و همکاران [۸] یک مطالعه مروری در مورد کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های سرمایش ساختمان‌ها انجام داده‌اند. ایشان دمای بالای هوا در تابستان را به عنوان موثرترین عامل در ضعیف شدن عملکرد مواد تغییر فاز دهنده عنوان داشته‌اند. حسینی راهدار و همکاران [۹] به مقایسه کارایی یخ به عنوان سیستم ذخیره سرمایش و منبع PCM پرداخته‌اند. تحلیل انرژی و انرژی انجام شده نشان داده است که استفاده از یخ و PCM به ترتیب، $4/6\%$ و $7/6\%$ کاهش مصرف انرژی را به دنبال دارد. دی‌فالکو و همکاران [۱۰] با آزمایش یک سیستم نمونه که در آن یک سیستم سرمایش فن‌کویل را به یک تانک ذخیره PCM مجهز نموده‌اند، مدل فیزیکی ارائه شده را به صورت عملی مورد بررسی قرار داده‌اند. ایشان نتیجه گرفته‌اند که سیستم پیشنهادی توانایی کارکرد در توان‌های شارژ/تخلیه‌ی بالا را دارا است و به منظور کاهش پیک مصرف بسیار مناسب است. به طور کل، به سه شکل می‌توان از مواد تغییر فاز دهنده در بهبود آسایش دمایی محیط داخل ساختمان بهره برد. این سه روش عبارتند از روش فعال، غیرفعال و سرمایش آزاد. عالم و همکاران [۱۱] در یک مطالعه عملی، به مقایسه روش غیرفعال و سرمایش آزاد پرداخته‌اند. این مطالعه در شهر ملبورن استرالیا انجام شده است. از نتایج این تحقیق برمی‌آید که عملکرد سیستم سرمایش آزاد موثرتر بوده است و سبب شده است $2/63$ درصدی کاهش در پیک دمای ساختمان مشاهده شود. این در حالی است که با استفاده از روش غیر فعال، کاهش نقطه پیک فقط در حد $0/44$ درصدی سانتی‌گراد بوده است. بخشی‌پور و همکاران [۱۲] نیز اثر بکارگیری یک مبدل حرارتی PCM را در مسیر عبور مبرد و بعد از خروج از کندانسور مورد بررسی قرار داده‌اند. در این شبیه‌سازی نتیجه‌گیری شده است که با استفاده از PCM می‌توان ضریب عملکرد سیستم سرمایش را تا $9/58\%$ افزایش داد. صید و حسن [۱۳] نیز در یک مطالعه پارامتری، به بررسی اثر کاربرد مواد تغییر فاز دهنده بر عملکرد یک سیستم تهویه مطبوع با سیکل سرمایش تراکمی پرداخته‌اند. در این تحقیق، حداکثر $1/14\%$ افزایش در ضریب عملکرد سیستم گزارش شده است.

روز تابستانی در شهر کرمان نمایش می‌دهد. اگر دما آسایش در این ساختمان برابر با 24°C در نظر گرفته شود، در ساعاتی که دمای محیط از این میزان کمتر است می‌توان به روش سرمایش آزاد فرآیند تهویه ساختمان را به انجام رساند. در این روش کافی است که هوای محیط به داخل ساختمان دمیده شود. یک نمونه ساده از سرمایش آزاد در ساختمان‌ها، باز گذاشتن پنجره‌ها در طول شب می‌باشد. پس در ساعاتی که تهویه ساختمان به روش سرمایش آزاد صورت می‌پذیرد، سیستم سرمایش تراکمی خاموش است و عملاً تامین بار سرمایشی ساختمان بر عهده سیستم سرمایش نیست. از سوی دیگر، در یک سیستم سرمایش هر چه اختلاف دمای بین محیط دما بالا (محیطی که کندانسور با آن تبادل حرارت می‌نماید) و محیط دما پایین (محیطی که اواپراتور با آن تبادل حرارت می‌نماید) بیشتر شود، ضریب عملکرد آن کاهش می‌یابد.

از آنجایی که کندانسور در سیستم مفروض هوا خنک می‌باشد و با هوای محیط خنک می‌شود، بنابراین با افزایش دمای محیط، ضریب عملکرد این سیستم کاهش می‌یابد. از این رو در یک روز تابستان با تغییرات ساعتی ضریب عملکرد و توان مصرفی یک سیستم سرمایش تراکمی هوا خنک در ساعاتی از روز که کار می‌کند، راه نمایش می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن دو عامل ذکر شده، توان مصرفی یک سیستم تهویه مطبوع تراکمی با گرم‌تر شدن هوا به شدت افزایش خواهد یافت.

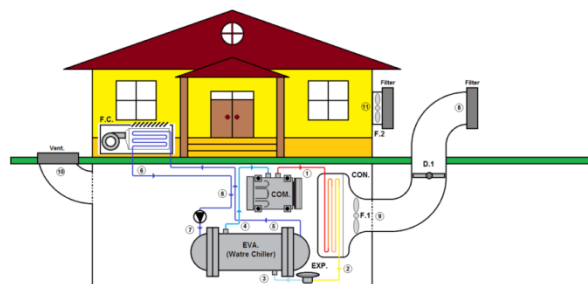


شکل ۳. نمودار تغییرات ساعتی دمای محیط و بار سرمایشی یک ساختمان نمونه در یک روز تابستانی

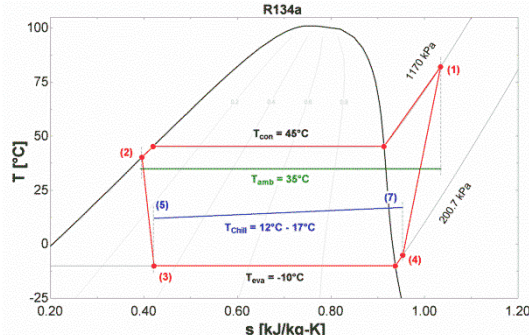


شکل ۴. نمودار تغییرات ساعتی ضریب عملکرد و توان مصرفی سیستم سرمایش در یک روز تابستانی نمونه

به حالت مافوق گرم رسیده است (نقطه ۱)، به سمت کندانسور رانده می‌شود. در کندانسور با تبادل حرارت با هوای محیط در یک فرآیند تقریباً فشار ثابت، به مایع متراکم تبدیل می‌شود (نقطه ۲). سپس با عبور از شیر انبساط، فشار و دمای آن کاهش می‌یابد (نقطه ۳). این کاهش دما و فشار تا اندازه‌ای است که مبرد بتواند از آب خنکی که از فن کویل‌ها برگشته است، جذب حرارت کند. مبرد سپس وارد اواپراتور می‌شود و با جذب حرارت از آب خنک، ابتدا به حالت بخار اشباع و سپس چند درجه‌ای هم وارد منطقه مافوق گرم می‌شود (نقطه ۴). حال بخار مبرد به کمپرسور مکش شده و با دریافت کار تا حالت خروجی کمپرسور (نقطه ۱) متراکم می‌شود و به این شکل چرخه فرآیندهای مبرد تکمیل می‌گردد.



شکل ۱. نمودار توصیفی سیستم سرمایش تراکمی مرکزی



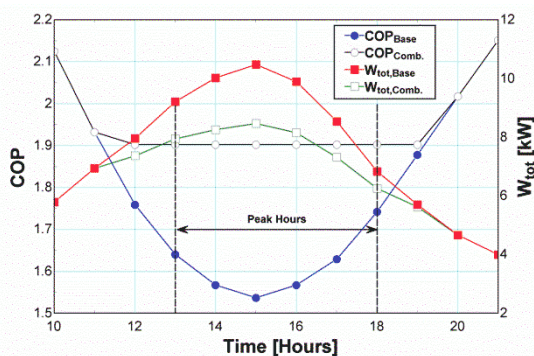
شکل ۲. نمودار دما - انترپپی مربوط به سیستم سرمایش تراکمی نمایش داده شده در شکل ۱

در یک سیستم سرمایش، معیار سنجش بازده سیستم توسط ضریب عملکرد (COP) بدست می‌آید. ضریب عملکرد به صورت نسبت توان سرمایش تولیدی توسط سیستم به انرژی مصرفی آن، تعریف می‌شود. بنابراین در یک چیلر تراکمی، ضریب عملکرد به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود. در این رابطه Q_{eva} توان سرمایشی تولید شده توسط چیلر و W_{tot} کل توان الکتریکی مصرف شده، شامل توان مصرف شده در کمپرسور، پمپ‌ها و فن‌ها است.

در یک ساختمان، با گرم‌تر شدن هوای محیط، میزان اتلافات حرارتی نیز زیادتر می‌شود. بنابراین با گرم‌تر شدن هوا، بار حرارتی ساختمان نیز افزایش می‌یابد. شکل ۳ نمودار تغییرات ساعتی دمای محیط و بار سرمایشی یک ساختمان نمونه با مساحت 300 مترمربع را در یک

^۲ Coefficient Of Performance

استفاده نمود. در این شرایط دمپ‌های شماره یک (D.1) و شماره سه (D.3) باز و دمپر شماره دو (D.2) بسته است. از زمانی که سیستم سرمایش تراکمی به منظور تهویه ساختمان وارد مدار می‌شود، دمپر شماره سه بسته می‌شود و هوای محیط برای خنک‌کاری کندانسور مورد استفاده قرار می‌گیرد (همانند سیستم مینا). در ساعات اوج مصرف که از یک سو هزینه مصرف الکتریسیته بیشتر و از سوی دیگر مصرف سیستم بالاتر است، دمپر شماره یک بسته و دمپر شماره سه باز می‌شود. بنابراین هوای محیط قبل از تبادل حرارت با کندانسور، از روی محفظه نگهداری PCM عبور می‌کند. از سوی دیگر، نوع ماده PCM به گونه‌ای انتخاب شده است که در این ساعات دمای هوای محیط از دمای ذوب PCM بیشتر باشد. این امر سبب می‌شود که حرارت از هوای محیط به PCM منتقل شود و آن را ذوب کند. لذا، دمای هوایی که از محفظه PCM عبور کرده کاهش می‌یابد و سپس به سمت کندانسور رانده می‌شود. این امر سبب کاهش دمای تقطیر در کندانسور و به تبع آن، افزایش ضریب عملکرد سیستم سرمایش تراکمی خواهد شد. افزایش COP به نوبه خود توان مصرفی سیستم و هزینه قبض برق ساختمان را در آن ساعات کاهش می‌دهد. این فرآیند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که تمامی PCM شارژ شده ذوب و یا به اصطلاح، دشارژ شود. پس از آن، مجدداً دمپر شماره سه بسته و دمپر شماره دو باز خواهد شد و سیستم ترکیبی فرآیند خنک‌کاری ساختمان را، همانند سیستم مینا، ادامه خواهد داد. در این پژوهش فرض می‌شود که در زمان دشارژ PCM، دمای هوای خروجی از محفظه نگهداری PCM تا کمترین مقدار ممکن کاهش یابد. این کمینه دما در واقع چند درجه‌ای بالاتر از دمای ذوب PCM خواهد بود. شکل ۶ نمودار ساعتی تغییرات ضریب عملکرد و توان مصرفی را برای دو سیستم مینا و ترکیبی در یک روز نمونه نمایش می‌دهد. با توجه به این فرض که دمای هوای خروجی از محفظه PCM (دمای هوای ورودی به کندانسور) در طول فرآیند دشارژ ثابت است، انتظار می‌رود که در این مدت ضریب عملکرد سیستم سرمایش تراکمی ثابت باقی بماند. ثابت ماندن COP_{Comb} را می‌توان در شکل ۶ مشاهده نمود.



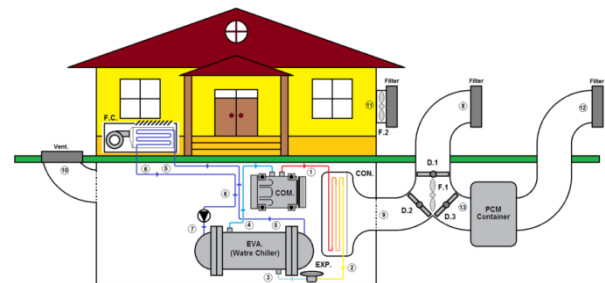
شکل ۶. نمودار تغییرات ساعتی ضریب عملکرد و توان مصرفی سیستم‌های سرمایش مینا و ترکیبی در یک روز تابستانی نمونه

فرضیات مورد استفاده

همچنین توجه به این نکته نیز حائز اهمیت است که ساعات گرم روزهای تابستان منطبق با ساعات اوج مصرف انرژی الکتریکی است. شرکت‌های توزیع برق معمولاً این ساعت‌ها را به عنوان ساعات اوج مصرف (ساعات پیک) در نظر می‌گیرند. بنابراین هزینه برق مصرفی در یک ساختمان نیز در این ساعت‌ها افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن تمامی این موارد، یکی از راهکارهایی که منجر به کاهش قبض برق یک ساختمان می‌شود، کاهش مصرف انرژی الکتریکی سیستم سرمایش آن ساختمان در ساعات اوج مصرف است.

سیستم ترکیبی

در این پژوهش راهکاری که برای کاهش قبض برق یک ساختمان نمونه پیشنهاد شده است، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به منظور کاهش دمای هوای خنک‌کاری در کندانسور می‌باشد. چراکه استفاده از سرمایش آزاد (هوای خنک شبانه‌گاهی در مناطق کویری مانند کرمان)، می‌تواند به کاهش بیشتر مصرف انرژی در ساختمان کمک نماید. برای این منظور از یک PCM که در دمایی نزدیک به دمای آسایش ساختمان تغییر فاز می‌دهد، استفاده می‌شود. با توجه به اینکه دمای آسایش 24°C در نظر گرفته شده است، ماده تغییر فاز دهنده‌ای که مورد مطالعه قرار گرفته است نوعی ماده پارافینی با نام تجاری RT25 است. شکل ۵ نمودار توصیفی سیستم تهویه مطبوعی را نشان می‌دهد که در آن از مواد تغییر فاز دهنده به عنوان ذخیره‌ساز بار سرمایی استفاده شده است.



شکل ۵. نمودار توصیفی سیستم سرمایش ترکیبی

در سیستم ترکیبی از هوای خنک شب به منظور منجمد کردن (شارژ کردن) PCM استفاده می‌شود. برای این منظور در طول ساعاتی از شب که اختلاف دمای هوا و دمای نقطه انجماد PCM به میزان مشخصی برسد، هوای محیط به سمت محفظه نگهداری PCM مکش می‌شود. تماس حرارتی این هوای خنک با ظرف‌های حاوی PCM سبب می‌شود که PCM منجمد شود. محفظه نگهداری PCM بایستی به خوبی عایق پوش باشد تا اتلافات حرارتی در آن به کمترین میزان خود برسد. با توجه به اینکه در ساعاتی که PCM شارژ می‌شود فضای ساختمان به صورت آزاد خنک‌کاری می‌گردد، در این ساعات سیستم سرمایش تراکمی خاموش است. بنابراین، به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌توان از دمنده مربوط به کندانسور برای مکش هوا به سمت محفظه نگهداری PCM

با صرف نظر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در یک حجم کنترل و در حالت دائم، معادله بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک) به صورت رابطه (۵) نوشته می‌شود.

$$Q - W = \sum_{in} (\dot{m} \times h) - \sum_{out} (\dot{m} \times h) \quad (5)$$

معادله توازن انرژی در واقع تلفیقی از قوانین اول و دوم ترمودینامیک است. معادله عمومی توازن انرژی را نیز می‌توان به صورت رابطه (۶) بیان کرد [۱۸].

$$\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) Q_j - W_{cv} + \sum_{in} (\dot{m} \times e) - \sum_{out} (\dot{m} \times e) - ED = 0 \quad (6)$$

با صرف نظر از انرژی شیمیایی، می‌توان انرژی مخصوص را توسط رابطه زیر تعریف نمود که در آن T_0 دمای مطلق مرجع می‌باشد.

$$e = h - T_0 \times s \quad (7)$$

برای سیستم‌های مورد مطالعه در این پژوهش، راندمان انرژی با استفاده از معادله (۸) بدست می‌آید [۱۹].

$$\eta_{ex} = \frac{E_{Gain}}{E_{Supply}} = 1 - \frac{ED_{tot}}{E_{Supply}} \quad (8)$$

در این رابطه E_{Gain} ، E_{Supply} و ED_{tot} به ترتیب نشان‌دهنده میزان انرژی مفید بدست آمده از سیستم، مقدار انرژی تغذیه شده به سیستم و میزان اتلافات کل انرژی در سیستم می‌باشد. انرژی ورودی به این سیستم به صورت توان الکتریکی است که تماماً از جنس انرژی شناخته می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که انرژی تغذیه شده به سیستم برابر با توان مصرفی کل سیستم است که در شرایط کاری مختلف، در کمپرسور، پمپ‌ها و فن‌ها مصرف می‌شود. میزان انرژی مفید و اتلافات کل انرژی سیستم را بسته به شرایط کارکرد، می‌توان به موارد ذکر شده در جدول ۱ تقسیم‌بندی نمود.

نتایج و بحث

یک ابزار کارآمد جهت محاسبه بار حرارتی ساختمان، نرم‌افزار هاپ (HAP)^۲ است. با توجه به اینکه در این پژوهش نیاز است که بار حرارتی ساختمان به صورت ساعتی محاسبه شود، نرم‌افزار HAP این امکان را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. حال می‌توان نتایج مربوط به مدل‌سازی ساختمان را از نرم‌افزار دریافت نمود. این نتایج برای روز میانگین در ماه جولای، در شکل ۷ به نمایش در آمده است. شایان ذکر است که روز میانگین در واقع به شکل روزی تعریف می‌شود که دمای ساعتی آن میانگین دماهای ساعتی سه روز از گرم‌ترین روزهای این ماه است. همچنین ذکر این نکته نیز ضروری است که اطلاعات آب و هوایی مورد استفاده در این پژوهش توسط نرم‌افزار متئونورم^۴ فراهم شده است.

در حل مجموعه معادلات حاکم بر یک مسئله تحلیل انرژی و انرژی، پارامترهای زیادی دخیل می‌باشند. به منظور ساده‌سازی مجموعه معادلات از یک سو و نزدیک‌تر نمودن جواب‌های حاصل به واقعیت فیزیکی مسئله از سوی دیگر، عموماً فرضیاتی بیان می‌شود که به حل دستگاه معادلات حاکم کمک می‌نماید. در این بخش مهم‌ترین فرضیات مورد استفاده در حل مسئله بیان می‌شود.

- راندمان ایزنتروپیک برای پمپ برابر با ۰.۹۰٪ و افزایش فشار آب در عبور از پمپ ۵۰ kPa فرض شده است.
- در طی مرحله شارژ، بالاترین دمایی که هوای خروجی از محفظه PCM می‌تواند به آن دست یابد، ۲°C کمتر از دمای ذوب PCM است.

$$T_{air.out.charge} = T_{melt} - 2^\circ C \quad (1)$$

- در طی مرحله دشارژ، کم‌ترین دمایی که هوای خروجی از محفظه PCM می‌تواند به آن دست یابد، ۲°C بیشتر از دمای ذوب PCM است.

$$T_{air.out.discharge} = T_{melt} + 2^\circ C \quad (2)$$

- دمای آسایش محیط تهویه شده، ۲۴°C فرض شده است.
- دمای آستانه شروع به کار فن شماره ۱ دمای ۲۰°C فرض شده است. این بدان معنی است که در طول شب زمانی که دمای هوای محیط از ۲۰°C کمتر شد، فن F.1 شروع به کار کرده و فرآیند شارژ PCM آغاز می‌شود. زمانی که دمای محیط از ۲۰°C بیشتر شد، فن خاموش شده و فرآیند شارژ پایان می‌یابد.
- دبی هوای عبوری از مبدل‌های حرارتی هوایی؛ شامل کندانسور و فن‌کوئل، برابر با ۰/۰۵۳۷ m³/s به ازاء هر یک کیلووات توان انتقال حرارت مبدل حرارتی است. همچنین، توان مصرفی توسط موتور الکتریکی این مبدل‌ها ۷۷۵ W به ازاء هر ۱ m³/s دبی هوای عبوری از مبدل است [۱۶].
- در زمان خنک‌کاری آزاد (Free Cooling)، از انتقال حرارت از داخل ساختمان به محیط اطراف صرف‌نظر می‌شود. همچنین میزان تعویض هوا در این زمان ۱/۵ بار در ساعت در نظر گرفته شده است (معادله (۳)) [۱۷].

$$\dot{V}_{F.2} = \frac{V_{Room}(m^3) \times 1.5}{3600 (s)} \quad (3)$$

فرضیات مورد استفاده

برای شبیه‌سازی هر یک از اجزاء یک سیستم مورد مطالعه، معادلات بقای جرم، بقای انرژی و توازن انرژی باید برای آن تجهیز مورد استفاده قرار گیرد. در نتیجه‌ی حل این معادلات برای هر جزء از سیستم، میزان مصرف انرژی و انرژی در آن جزء بدست می‌آید. در حالت پایدار، معادله پایستگی برای یک جزء به صورت رابطه (۴) بیان می‌گردد.

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} - \sum_{out} \dot{m}_{out} = 0 \quad (4)$$

^۲ Hourly Analysis Program

^۴ Meteonorm Software

کمتر از میزان جزء متناظر در سیستم مینا است. تنها در مورد اوپراتور و فن کویل می‌توان گفت که اتلافات تغییر چندانی نداشته است. دلیل این امر این است که تغییر دمای کندانسور تأثیری در عملکرد اوپراتور و در نتیجه عملکرد فن کویل ندارد. از طرف دیگر، میزان کل اتلافات انرژی در سیستم ترکیبی به میزان ۱۶/۷ کاهش و راندمان انرژی به میزان ۲۳/۸ درصد افزایش یافته است. این افزایش راندمان نشان دهنده بهبود واقعی عملکرد سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم مینا است.

جدول ۲. پارامترهای عملکردی و میزان تبادل انرژی اجزاء مختلف

| سیستم‌های مینا و ترکیبی | | | |
|-------------------------|--------------------------|------------|--------------|
| علامت اختصاری | توصیف | سیستم مینا | سیستم ترکیبی |
| T_{amb} | دمای محیط (°C) | ۲۵/۳ | ۲۵/۳ |
| T_{con} | دمای کندانسور (°C) | ۳۸/۶ | ۴۵/۳ |
| T_{eva} | دمای اوپراتور (°C) | -۱۰ | -۱۰ |
| T_{Room} | دمای اتاق (°C) | ۲۴ | ۲۴ |
| Q_{load} | بار حرارتی ساختمان (kW) | ۱۶/۱ | ۱۶/۱ |
| W_{tot} | توان کل مصرفی (kW) | ۸/۵ | ۱۰/۵ |
| Q_{con} | بار حرارتی کندانسور (kW) | ۲۲ | ۲۳/۶ |
| Q_{eva} | بار حرارتی اوپراتور (kW) | ۱۶/۱ | ۱۶/۱ |
| COP | ضریب عملکرد | ۱/۹ | ۱/۵۴ |

جدول ۳. اتلافات و راندمان انرژی سیستم‌های مینا و ترکیبی در نقطه طراحی

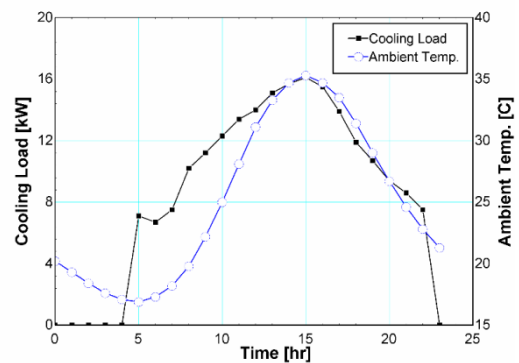
| اتلافات و راندمان انرژی | | |
|-------------------------|--------------|-------------------------|
| سیستم مینا | سیستم ترکیبی | اتلافات و راندمان انرژی |
| ۴/۱۳ | ۳ | ED_{com} (kW) |
| ۱/۳۶ | ۱/۲۱ | ED_{con} (kW) |
| ۱/۶ | ۱/۵۶ | ED_{eva} (kW) |
| ۰/۹۱ | ۰/۶۳ | ED_{exp} (kW) |
| ۱/۲۷ | ۱/۲۶ | ED_{FC} (kW) |
| . | . | ED_{pump} (kW) |
| ۹/۱۷ | ۸/۲۲ | ED_{tot} (kW) |
| ۵/۸۴ | ۷/۲۳ | η_{ex} (%) |

بررسی عملکرد ساعتی سیستم‌های مینا و ترکیبی

برای بررسی عملکرد سیستم‌های مورد مطالعه و با توجه به اینکه این سیستم‌ها برای تهویه تابستانی مورد استفاده قرار می‌گیرد، جدول ۴ مقادیر ساعتی ضریب عملکرد و راندمان انرژی را در سیستم‌های مینا و ترکیبی در چهار ماه مورد نظر برای تهویه تابستانی، نمایش می‌دهد. با توجه به مقادیر ارائه شده در این جدول، می‌توان گفت که به طور کل عملکرد سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم مینا، در ساعاتی که فرآیند سرمایش تراکمی در حال انجام است، عملکردی قابل قبول می‌باشد. همچنین ذکر این نکته نیز لازم است که در ماه سپتامبر با توجه به خنک شدن نسبی هوا، ساعاتی که می‌توان از فرآیند خنک‌کاری آزاد برای تهویه ساختمان استفاده کرد، طولانی‌تر می‌شود. از این رو در ماه سپتامبر، از ساعت ۱۰ الی ۱۱ صبح و همچنین ۹ الی ۱۰ شب، نیز می‌توان از سرمایش آزاد بهره برد. از

جدول ۱. پارامترهای موثر در محاسبه راندمان انرژی سیستم‌ها در شرایط کاری مختلف

| روابط مورد استفاده | حالت مورد بررسی |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| $E_{Gain} = Q_{eva} \times \left[1 - \frac{T_0}{T_{cold}} \right]$ $E_{Supply} = W_{com} + W_{fans} + W_{pump}$ $ED_{tot} = \sum_{components} ED_{chiller} + ED_{fancoil} + \dot{m}_{10} \times e_{10}$ | سیستم‌های مینا و ترکیبی در حالت استفاده از خنک‌کاری تراکمی |
| $E_{Gain} = \dot{m}_{F,2} \times (e_{10} - e_{11})$ $E_{Supply} = W_{F,2}$ $ED_{tot} = \dot{m}_{F,2} \times (e_{11} - e_{10}) + W_{F,2}$ | سیستم مینا در حالت استفاده از خنک‌کاری آزاد |
| $E_{Gain} = \dot{m}_{F,1} \times (e_{13} - e_{12}) + \dot{m}_{F,2} \times (e_{10} - e_{11})$ $E_{Supply} = W_{F,1} + W_{F,2}$ $ED_{tot} = \dot{m}_{F,1} \times (e_{12} - e_{13}) + W_{F,2} + \dot{m}_{F,2} \times (e_{11} - e_{10}) + W_{F,2}$ | سیستم ترکیبی در حالت استفاده از خنک‌کاری آزاد |



شکل ۷. بار حرارتی ساختمان در روز میانگین ماه جولای

مقایسه عملکرد سیستم‌های مینا و ترکیبی در شرایط طراحی

سیستم تهویه مطبوع یک ساختمان برای شرایطی طراحی می‌شود که بار حرارتی ساختمان بیشینه است. با توجه به اطلاعات آب و هوایی شهر کرمان، بیشینه بار حرارتی ساعت ۱۵ روز میانگین در ماه جولای اتفاق می‌افتد. از این رو، تمامی نتایج ارائه شده در این بخش مربوط به این شرایط طراحی است. مدل‌سازی اجزاء مختلف سیستم مورد مطالعه به طور کامل در نرم‌افزار EES انجام شده است. جدول ۲ پارامترهای عملکردی و میزان تبادل انرژی اجزاء مختلف سیستم‌های مینا و ترکیبی را با یکدیگر مقایسه می‌کند. شایان ذکر است که دمای تبخیر مبرد در اوپراتور سیستم سرمایش تراکمی ۱۰°C- در نظر گرفته شده است. همانگونه که انتظار می‌رفت، با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، دمای کندانسور سیستم ترکیبی در مقایسه با این دما در سیستم مینا کاهش می‌یابد. این کاهش دما سبب افزایش ۲۴ درصدی ضریب عملکرد سیستم و در نتیجه کاهش ۱۹ درصدی در توان مصرفی سیستم می‌شود.

جدول ۳ به مقایسه اتلافات انرژی در هر یک از اجزاء سیستم‌های مورد مطالعه و همچنین راندمان انرژی آنها می‌پردازد. همانگونه که مشاهده می‌شود، در سیستم ترکیبی اتلاف انرژی در تمامی اجزاء

نتایج راندمان انرژی در این جدول نیز می‌توان به عملکرد مطلوب سیستم ترکیبی پی برد.

نکته دیگری که از جدول ۴ بر می‌آید این است که به طور کل، راندمان انرژی سیستم تهویه مطبوع تراکمی راندمان کمی است. این در حالی است که ضریب عملکرد این سیستم‌ها (راندمان انرژی) در حد قابل قبولی قرار دارد. همچنین، شایان ذکر است که دمای ساعتی محیط با استفاده از نرم‌افزار HAP بدست آمده است. با توجه به اینکه در دو ماه جولای و آگوست شرایط طراحی محیط در شهر کرمان تغییر چندانی ندارد، دمای طراحی ساعتی تقریباً یکسان است. از این رو، در ضریب عملکرد و راندمان انرژی سیستم‌ها نیز تغییرات چندانی مشاهده نمی‌شود.

جدول ۴. مقادیر ساعتی ضریب عملکرد و راندمان انرژی در سیستم‌های مینا و ترکیبی

| ماه ساعت | راندمان انرژی (%) | | | | ضریب عملکرد | | | | | | | | | |
|----------|-------------------|--------|-------|--------|-------------|--------|-------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | ژوئن | | جولای | | ژوئن | | آگوست | | | | | | | |
| | مب | ترکیبی | مب | ترکیبی | مب | ترکیبی | مب | ترکیبی | | | | | | |
| ۱۰ | ۲/۲ | ۲/۲ | ۰/۷ | ۰/۷ | ۰/۳ | ۰/۳ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۲ | ۲/۲ |
| ۱۱ | ۲/۰ | ۲/۰ | ۲/۷ | ۲/۷ | ۲/۴ | ۲/۴ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۲/۰ | ۲/۰ |
| ۱۲ | ۱/۸ | ۱/۸ | ۴/۲ | ۱/۸ | ۴/۲ | ۲/۹ | ۳/۹ | ۱/۸ | ۱/۸ | ۱/۹ | ۱/۸ | ۱/۸ | ۱/۹ | ۱/۸ |
| ۱۳ | ۱/۷ | ۱/۷ | ۵/۱ | ۱/۶ | ۵/۱ | ۲/۹ | ۴/۹ | ۱/۷ | ۱/۷ | ۱/۹ | ۱/۶ | ۱/۹ | ۱/۶ | ۱/۹ |
| ۱۴ | ۱/۶ | ۱/۶ | ۵/۶ | ۱/۶ | ۵/۶ | ۲/۹ | ۵/۵ | ۱/۶ | ۱/۶ | ۱/۹ | ۱/۶ | ۱/۹ | ۱/۶ | ۱/۹ |
| ۱۵ | ۱/۶ | ۱/۶ | ۵/۸ | ۱/۵ | ۵/۸ | ۲/۹ | ۵/۶ | ۱/۶ | ۱/۶ | ۱/۹ | ۱/۵ | ۱/۹ | ۱/۵ | ۱/۹ |
| ۱۶ | ۱/۶ | ۱/۶ | ۵/۶ | ۱/۶ | ۵/۶ | ۲/۹ | ۵/۵ | ۱/۶ | ۱/۶ | ۱/۹ | ۱/۶ | ۱/۹ | ۱/۶ | ۱/۹ |
| ۱۷ | ۱/۷ | ۱/۷ | ۵/۲ | ۱/۶ | ۵/۲ | ۲/۹ | ۵/۰ | ۱/۷ | ۱/۷ | ۱/۹ | ۱/۶ | ۱/۹ | ۱/۶ | ۱/۹ |
| ۱۸ | ۱/۸ | ۱/۸ | ۴/۳ | ۱/۷ | ۴/۳ | ۲/۹ | ۴/۱ | ۱/۸ | ۱/۸ | ۱/۹ | ۱/۷ | ۱/۹ | ۱/۷ | ۱/۹ |
| ۱۹ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۳/۲ | ۱/۹ | ۳/۲ | ۲/۹ | ۲/۹ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۹ |
| ۲۰ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۱/۸ | ۱/۸ | ۱/۵ | ۱/۵ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۱ |
| ۲۱ | ۲/۲ | ۲/۲ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۱ | ۰/۱ | ۲/۲ | ۲/۲ | ۲/۲ | ۲/۲ | ۲/۲ | ۲/۲ | ۲/۲ | ۲/۲ |

تورم ۱۰٪ در هزینه برق، دوره بازگشت سرمایه ۳۵ سال بدست می‌آید که بسیار از طول عمر سیستم بیشتر خواهد بود.

$$N_p = \frac{\ln \left[\frac{C_{PCM} \times i_f}{C_{save}} + 1 \right]}{\ln(1 + i_f)} \quad (12)$$

همچنین، با احتساب قیمت برق در شهر نیویورک آمریکا که معادل ۱۹/۸۶ سنت برای هر کیلووات ساعت است [۲۳]، دوره بازگشت سرمایه ۲۲ سال خواهد بود.

نتیجه‌گیری

با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده میزان کل انرژی الکتریکی سیستم سرمایش به میزان ۴۶۷/۶۴ کیلووات ساعت کاهش می‌یابد که معادل ۴/۸۵٪ کاهش در مصرف انرژی الکتریکی است. همچنین در ساعات پیک مصرف، انرژی مصرفی به میزان ۸۵۰/۴ کیلووات ساعت که معادل ۱۴/۷۶٪ است، کاهش می‌یابد. این میزان کاهش انرژی منجر به ۲۶۶۵۵۹ تومان کاهش هزینه در قبض برق می‌شود، که نشان دهنده ۶/۷۱٪ کاهش در طول دوره کارکرد سیستم تهویه تابستانی است. البته با توجه به نرخ نسبتاً اندک الکتریسیته، حداقل دوره بازگشت سرمایه برای این سیستم ۲۲ سال خواهد بود.

تحلیل اقتصادی

به غیر از محاسبه کل میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی و میزان کاهش مصرف در ساعات پیک، باید با اعمال تعرفه هزینه برق، میزان صرفه‌جویی اقتصادی سیستم پیشنهادی را بدست آورد. جدول ۵ میزان کل مصرف انرژی در دو سیستم مینا و ترکیبی را در هر ماه از دوره مورد بررسی، نمایش می‌دهد. در ادامه، جدول ۶ هزینه قبض برق ماهانه هر کدام از سیستم‌ها و همچنین مجموع صرفه‌جویی در کل دوره را نمایش می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول ۵ و ۶، می‌توان نتایج این تحقیق را به صورت جدول ۷ خلاصه نمود.

از سوی دیگر، برای مجهز نمودن سیستم تهویه مطبوع ساختمان به منبع ذخیره‌سازی PCM، هزینه‌ای در حدود ۷۰۲۰ دلار نیاز است. این هزینه اولیه بر اساس حجم ذخیره‌سازی مورد نیاز که معادل ۹۳ مترمکعب می‌باشد و با استفاده از معادلات (۹) و (۱۰)، بدست آمده است [۲۱].

$$C_{PCM} = 8.67 \times 10^a \quad (9)$$

$$a = 2.9211 \times e^{0.146 \times \log(V)} \quad (10)$$

بنابراین، اگر با استفاده از رابطه (۱۱) دوره بازگشت سرمایه محاسبه شود [۲۲]، بر اساس تعرفه‌های برق ایران و با در نظر گرفتن نرخ

| | |
|-----------------------------------|-------------------|
| محیط | <i>amb</i> |
| فرآیند شارژ ماده تغییر فاز دهنده | <i>charge</i> |
| سیستم ترکیبی | <i>comb.</i> |
| کندانسور | <i>con</i> |
| حجم کنترل | <i>cv</i> |
| فرآیند دشارژ ماده تغییر فاز دهنده | <i>discharge</i> |
| اوپراتور | <i>eva</i> |
| شیر انبساط | <i>exp</i> |
| فن شماره ۱ یا ۲ | <i>F.1 or F.2</i> |
| فن کویل | <i>FC</i> |
| مفید | <i>Gain</i> |
| ورودی به حجم کنترل | <i>in</i> |
| بار حرارتی ساختمان | <i>Load</i> |
| نقطه ذوب | <i>melt</i> |
| خروجی از حجم کنترل | <i>out</i> |
| تغذیه شده | <i>Supply</i> |
| کل سیستم | <i>tot</i> |

مراجع

- [1] توکلی ار (۱۳۹۵) تهویه مطبوع ۳۰ درصد انرژی را مصرف می‌کند. درگاه اینترنتی مجله اقتصاد آنلاین. دسترسی در تاریخ ۱۳۹۹/۳/۲۷. (<https://www.eghtesadonline.com>)
- [2] طحانی م، شمس‌الدینی س، فراهت س، ربانی ع (۱۳۹۴) شبیه‌سازی ترمودینامیکی کولرهای اجکتوری - تراکمی. مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها: دوره ۵، شماره ۲، ۱۷۹-۱۸۷.
- [3] Zalba B, Marin JM, Cabeza LF, Mehling H (2004) Free-cooling of buildings with phase change materials. *Int J Refrig* 27: 839-849.
- [4] Kamali S (2014) Review of free cooling system using phase change material for building. *Eng Build* 80:131-136.
- [5] Mosaffa AH, Garousi Farshi L, Infante Ferreira CA, Rosen MA (2014) Energy and exergy evaluation of a multiple-PCM thermal storage unit for free cooling applications. *Renew Eng* 68: 452-458.
- [6] Waqas A, Ud-Din Z (2013) Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings - A review. *Renew Sustain Eng Review* 18: 607-625.
- [7] Thambidurai M, Panchabikesan K, Mohan K, Ramalingam V (2015) Review on phase change material based free cooling of buildings - The way toward sustainability. *J Eng Store* 4: 74-88.
- [8] Souayfane F, Fardoun F, Biwole PH (2016) Phase Change Materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. *Eng Build* 129: 396-431.
- [9] Hoseini Rahdara M, Emamzadeh A, Ataei A (2016) A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings. *App Therm Engineer* 96: 391-399.
- [10] De Falco M, Capocelli M, Giannattasio A (2016) Performance analysis of an innovative PCM-based device for cold storage in the civil air conditioning. *Eng Build* 122: 1-10.
- [11] Alam M, Sanjayan J, Zou PXW, Ramakrishnan S, Wilson J (2017) Evaluating the passive and free cooling application methods of phase change materials in

جدول ۵. میزان کل مصرف انرژی در دو سیستم مبنا و ترکیبی

| مطالعه | ماه مورد | انرژی مصرفی (kWh) | در سیستم ترکیبی | انرژی مصرفی مبنا در ساعات اوج | در سیستم ترکیبی در ساعات اوج | انرژی مصرفی در سیستم ترکیبی |
|---------|----------|-------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| ژوئن | ۲۴۳۸/۹ | ۲۳۲۴/۶ | ۱۴۵۰ | ۱۲۴۴/۵ | | |
| جولای | ۲۹۰۱/۷ | ۲۷۶۱ | ۱۷۰۳/۸ | ۱۴۳۷/۶ | | |
| آگوست | ۲۸۴۴/۱ | ۲۷۰۳/۸ | ۱۶۷۶/۳ | ۱۴۱۴/۷ | | |
| سپتامبر | ۱۴۶۷/۳ | ۱۳۹۴/۹ | ۹۳۱ | ۸۱۳/۹ | | |
| مجموع | ۹۶۵۲ | ۹۱۸۴/۳ | ۵۷۶۱/۱ | ۴۹۱۰/۷ | | |

جدول ۶. هزینه مصرف انرژی در دو سیستم مبنا و ترکیبی

| مطالعه | ماه مورد | هزینه مبنا (تومان) | هزینه مبنا (دلار) | هزینه مبنا (دلار) | هزینه مبنا (دلار) | هزینه مبنا (دلار) | هزینه مبنا (دلار) |
|---------|-----------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| ژوئن | ۱۰۰۴۷۰۶ | ۹۳۹۸۳۳ | ۹۱/۳۴ | ۸۵/۴۴ | | | |
| جولای | ۱۲۱۹۸۱۶ | ۱۱۳۸۶۰۶ | ۱۱۰/۸۹ | ۱۰۳/۵۱ | | | |
| آگوست | ۱۱۹۳۲۶۶ | ۱۱۱۲۶۵۰ | ۱۰۸/۴۸ | ۱۰۱/۱۵ | | | |
| سپتامبر | ۵۵۳۷۹۸ | ۵۱۳۹۲۸ | ۵۰/۳۵ | ۴۶/۷۲ | | | |
| مجموع | ۳۰۹۷۱۰۵۸۷ | ۳۰۷۰۵۰۲۷ | ۳۶۱/۰۵ | ۳۳۶/۸۲ | | | |

جدول ۷. میزان صرفه‌جویی در هزینه مصرف انرژی

| مقدار عددی | نام پارامتر |
|------------|-------------------------------------------|
| ۴۶۷/۶۴ | کل انرژی صرفه‌جویی شده (kWh) |
| ۴/۸۵ | درصد انرژی صرفه‌جویی شده (%) |
| ۸۵۰/۴ | انرژی صرفه‌جویی شده در ساعات پیک (kWh) |
| ۱۴/۷۶ | درصد انرژی صرفه‌جویی شده در ساعات پیک (%) |
| ۵۵۶/۲۶۶ | هزینه صرفه‌جویی شده (تومان) |
| ۲۴/۲۳ | هزینه صرفه‌جویی شده (دلار) |
| ۶/۷۱ | درصد کاهش هزینه قبض برق (%) |

فهرست علائم و اختصارات

| علائم | علائم |
|---------------|-----------------------------------|
| <i>e</i> | اگرزری مخصوص (kJ/kg) |
| <i>E</i> | اگرزری کل (kW) |
| <i>ED</i> | اتلافات اگرزری (kW) |
| <i>h</i> | انتالپی مخصوص (kJ/kg) |
| <i>m</i> | دبی جرمی (kg/s) |
| <i>Q</i> | نرخ انتقال حرارت (kW) |
| <i>s</i> | انتروپی مخصوص (kJ/kg.K) |
| <i>T</i> | دما (C or K°) |
| <i>V</i> | حجم (m ³) |
| <i>V̇</i> | دبی حجمی سیال (m ³ /s) |
| <i>W</i> | توان مصرفی (kW) |
| η_{ex} | راندمان قانون دوم ترمودینامیک (%) |
| η_{pump} | راندمان ایزنتروپیک پمپ |
| 0 | نقطه مرجع |

- residential buildings: A comparative study. *Eng Build* 148: 238–256.
- [12] Bakhshipour S, Valipour MS, Pahamli Y (2017) Parametric analysis of domestic refrigerators using PCM heat exchanger. *Int J Refrig* 83: 1–3.
- [13] Said MA, Hassan H (2018) Parametric study on the effect of using cold thermal storage energy of phase change material on the performance of air-conditioning unit. *App Eng* 230:1380–1402.
- [16] Hwang Y (2004) Potential energy benefits of integrated refrigeration system with microturbine and absorption chiller. *Int J Refrig* 27: 816–829.
- [17] Harris NC (1983) *Modern Air Conditioning Practice*. 3rd edn. McGraw-Hill, New York, Chapter 8.
- [18] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M (1996) *Thermal Design and Optimization*. 1st ed. John Wiley & Sons, New York, 121–131.
- [19] Kaushik SC, Arora A (2009) Energy and exergy analysis of single effect and series flow double effect water-LiBr absorption refrigeration system. *Int J Refrig* 32: 1247–1258.
- [۲۰] تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آنها از ابتدای اردیبهشت سال ۱۳۹۸ (۱۳۹۸) وزارت نیرو، شرکت نیروی توزیع برق شمال کرمان.
- [21] Dastmalchi M, Ahmadi Boyaghchi F (2020) Exergy and economic analyses of nanoparticle-enriched phase change material in an air heat exchanger for cooling of residential buildings. *Energ Store* 32: 101705.
- [22] Duffie JA, Beckman WA (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th ed. John Wiley & Sons, New York, Chap 11.
- [23] US Energy Information Administrator (2020) Average Price of Electricity to Ultimate Customers by End-Use Sector. Accessed on August 7, 2021. (<https://www.eia.gov.com>)