

سرمایه‌گذاری یک سیستم تجدیدپذیر ترکیبی با در نظر گرفتن واحدهای آب‌شیرین‌کن جهت تأمین انرژی الکتریکی و آب شیرین موردنیاز جزیره ابوموسی

رضا غفارپور^۱، دانشجوی دکتری؛ بابک مظفری^۲، دانشیار؛ علیمحمد رنجبر^۳، استاد؛ تقی ترابی^۴، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات- تهران- ایران- rghaffarpour@sbiau.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات- تهران- ایران- b.mozafari@sbiau.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران- amranjbar@sharif.ir

۴- دانشکده مدیریت و اقتصاد- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات- تهران- ایران- t-torabi@sbiau.ac.ir

چکیده: با افزایش تقاضای آب شیرین و روند روبه کاهش قیمت فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر، بسیاری از مناطق دورافتاده و جزایر کوچک مانند جزیره ابوموسی به‌عنوان بازارهای بالقوه برای سامانه‌های شیرین‌سازی بر پایه انرژی‌های تجدیدپذیر محسوب می‌شوند. در همین راستا در این مقاله، سرمایه‌گذاری بهینه یک سیستم تجدیدپذیر ترکیبی جدا از شبکه، جهت تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز مشترکین و هم‌چنین انرژی الکتریکی و حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن جهت تأمین آب شیرین مصرفی در جزیره ابوموسی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی برای روش‌های مختلف شیرین‌سازی شامل تبخیر سریع چندمرحله‌ای، تقطیر چندمرحله‌ای و اسمز معکوس مورد بررسی قرار خواهند گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، اگرچه میانگین مصرف انرژی موردنیاز جهت تولید آب شیرین در روش اسمز معکوس نسبت به دو روش دیگر دارای کم‌ترین مقدار است، اما هزینه خالص سیستم در روش تقطیر چندمرحله‌ای از دو روش دیگر کم‌تر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جزیره ابوموسی، سیستم تجدیدپذیر ترکیبی، واحدهای آب‌شیرین‌کن، اسمز معکوس، تبخیر سریع چندمرحله‌ای، تقطیر چندمرحله‌ای.

Optimal Investment of a Hybrid Renewable System considering Desalination Units to Supply Electrical Energy and Drinking Water of Abu-Musa Island

R. Ghaffarpour¹, PhD student; B. Mozafari², Associated Professor; AM. Ranjbar³, Professor; T. Torabi⁴, Associated Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Islamic azad university Science & research branch, Tehran, Iran, Email: rghaffarpour@sbiau.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Islamic azad university Science & research branch, Tehran, Iran, Email: b.mozafari@sbiau.ac.ir

3- Faculty of Electrical Engineering, Sharif University of technology, tehran, Iran, Email: amranjbar@sharif.ir

4- Faculty of Management and Economics, Islamic azad university Science & research branch, Tehran, Iran, Email: t-torabi@sbiau.ac.ir

Abstract: With increasing demand for fresh water and reduction in the investment cost of the renewable energy technologies, many of remote areas and small islands like the Abu-Musa Island are considered as potential markets for renewable energy based desalination systems. Therefore, in this paper, optimal investment of an off-grid hybrid renewable system is studied to supply customers electrical energy demand, as well as electrical and thermal energies required by the desalination units to provide drinking water consumed in the island. The simulation results for different desalination methods including multi-stage flash, multi-effect distillation, and reverse-osmosis are considered and analyzed. According to the results, although the average energy consumed in order to produce drinking water has the lowest value in reverse-osmosis method in comparison with the other two methods, but, the system net cost in the multi-effect distillation method is lower than the other two methods.

Keywords: Abu-Musa island, hybrid renewable system, desalination units, reverse osmosis, multi stage flash, multi effect distillation.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۰، ۱۳۹۶/۰۷/۲۷ و ۱۳۹۶/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۱

نام نویسنده مسئول: دکتر علی محمد رنجبر

نشانی نویسنده مسئول: تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

شیرین‌سازی موردبررسی قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۱۵ نیز Ullah Khan و همکارانش [۶]، روشی برای تأمین آب با استفاده از منابع تجدیدپذیر در روستاهای دورافتاده کشور بنگلادش پیشنهاد نمودند. سیستم در نظر گرفته شده در پژوهش یادشده، متشکل از آرایه‌های فتوولتائیک و هم‌چنین موتورهای احتراق داخلی گازی (که از فضولات حیوانات و بقایای کشاورزی پس از طی مراحل خاصی به‌عنوان سوخت استفاده می‌کنند) هستند.

در مقاله پیش‌رو، سرمایه‌گذاری بهینه یک سیستم تجدیدپذیر ترکیبی جدا از شبکه، جهت تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز مشترکین و هم‌چنین انرژی الکتریکی و حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن جهت تأمین آب شیرین مصرفی در جزیره ابوموسی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به‌عبارت‌دیگر در مسئله اندازه‌یابی بهینه سیستم تجدیدپذیر ترکیبی که از توربین‌های بادی، آرایه‌های خورشیدی، سیستم ذخیره‌ساز انرژی (باتری) و دیزل ژنراتورها تشکیل شده است، تعداد توربین‌های بادی، توان آرایه‌های خورشیدی، توان و انرژی سیستم ذخیره‌ساز و هم‌چنین توان دیزل ژنراتورها با توجه به پتانسیل منابع تجدیدپذیر جزیره ابوموسی به‌نحوی محاسبه می‌گردد که علاوه‌براین که هزینه سرمایه‌گذاری سیستم کمینه شود، انرژی الکتریکی و آب شیرین موردنیاز جزیره نیز در تمام ساعت شبانه‌روز تأمین گردد. هم‌چنین جهت شیرین‌سازی آب، فرآیندهای مختلف شیرین‌سازی شامل تبخیر سریع چندمرحله‌ای، تقطیر چندمرحله‌ای و اسمز معکوس مدنظر قرار گرفته و نتایج شبیه‌سازی برای هر یک ارائه خواهد شد. نرم‌افزار مورد استفاده جهت انجام شبیه‌سازی‌ها، نرم‌افزار HOMER^۱ می‌باشد که از این نرم‌افزار به‌منظور شبیه‌سازی و ارزیابی فنی و اقتصادی سیستم‌های تجدیدپذیر ترکیبی استفاده می‌شود.

با بررسی مطالعات پیشین می‌توان به این نتیجه رسید که تنها تأمین انرژی الکتریکی واحدهای آب‌شیرین‌کن مورد نظر بوده است. در این مطالعات تنها یکی از روش‌های شیرین‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند؛ اما در مقاله پیش‌رو، شیرین‌سازی با به‌کارگیری هر یک از روش‌های اسمز معکوس، تبخیر سریع چندمرحله‌ای و تقطیر چندمرحله‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. هم‌چنین مفاهیم ذخیره چرخان و حداکثر تقاضای بار قابل قطع سالیانه نیز در شبیه‌سازی مسئله لحاظ شده‌اند.

در این مقاله و در ادامه به‌ترتیب مباحث مربوط به پتانسیل انرژی بادی و خورشیدی در جزیره ابوموسی، شیرین‌سازی آب، مدل مسئله و در پایان اطلاعات ورودی و نتایج شبیه‌سازی ارائه خواهند شد.

۲- انرژی باد و خورشید در جزیره ابوموسی

جزیره ابوموسی دارای سرعت باد متوسط سالانه بین ۶ تا ۸ گره (۳ تا ۴ متربرثانیه) بوده و بر اساس دسته‌بندی‌های انجام‌شده، در گروه اول ایستگاه‌های سینوپتیک کشور قرار می‌گیرد که در بیش‌تر زمان‌های سال توان بادخیزی بالایی داشته و جهت استفاده از انرژی بادی برای

تقاضای جهانی برای آب شیرین، پیوسته در حال افزایش است. این در حالی است که منابع آب شیرین به‌دلیل افزایش تقاضا و اثرات پدیده تغییر اقلیم به‌خصوص در مناطق خشک، ساحلی و جزیره‌ای نیز با محدودیت مواجه شده‌اند. شیرین‌سازی آب‌های شور، یکی از روش‌های تأمین این تقاضای در حال افزایش می‌باشد. بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط بانک جهانی، شیرین‌سازی به‌موازات کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع جدید آب تا سال ۲۰۵۰ لحاظ شده است. فرآیندهای شیرین‌سازی، فرآیندهایی به‌منظور خالص‌سازی آب‌های شور برای مصارف آشامیدنی هستند. یک سیستم آب‌شیرین‌کن به‌طور کلی آب شور را به دو جریان تقسیم می‌کند. یکی جریان آب خالص با درصد بسیار کمی از نمک و املاح و دیگری جریانی که حاوی نمک و املاح باقی‌مانده می‌باشد. هریک از فناوری‌های شیرین‌سازی، برای انجام فرآیند جداسازی آب از نمک، به انرژی نیاز دارند که این انرژی می‌تواند به‌صورت الکتریکی یا حرارتی تأمین شود. عمده واحدهای شیرین‌سازی تاکنون در مناطقی احداث شده‌اند که دسترسی به آب و قیمت‌های پایین انرژی وجود داشته است. این در حالی است که تنها یک درصد از این واحدها از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌نمایند. با افزایش تقاضای آب شیرین و روند رو به کاهش قیمت فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر، بسیاری از مناطق دورافتاده و جزایر کوچک مانند جزیره ابوموسی به‌عنوان بازارهای بالقوه برای سامانه‌های شیرین‌سازی بر پایه انرژی‌های تجدیدپذیر محسوب می‌شوند [۲،۱].

تاکنون مطالعاتی در خصوص تولید آب شیرین با به‌کارگیری سیستم‌های تجدیدپذیر ترکیبی و واحدهای آب‌شیرین‌کن انجام‌شده است که در اینجا به تعدادی از آن‌ها اشاره خواهد شد. در سال ۲۰۱۳، Mokheimer و همکارانش [۳]، یک سیستم تجدیدپذیر ترکیبی خورشید- باد را با در نظر گرفتن واحدهای آب‌شیرین‌کن مدل‌سازی و شبیه‌سازی نمودند. نتایج شبیه‌سازی برای حداقل نمودن هزینه تولید هر مترمکعب آب شیرین مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به‌ذکر است که عملکرد این سیستم ترکیبی با استفاده از اطلاعات آب‌وهوایی در یک سال، در شهر طهران کشور عربستان سعودی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۴، Al-Nory و همکارانش [۴]، یک روش مدیریت انرژی را که می‌تواند در تولید آب شیرین مورد استفاده قرار گیرد، معرفی نمودند. این روش بر پایه بهینه‌سازی ریاضی بوده که در آن تقاضای بار و انرژی تولیدی به‌صورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. در همین سال، Gude [۵]، ذخیره‌سازهای انرژی مختلف مورد استفاده در فرآیند شیرین‌سازی آب با استفاده از تکنولوژی‌های تجدیدپذیر مختلف را مورد مطالعه قرار داد. تمرکز مقاله مذکور بر ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به شکل باتری بود. هم‌چنین اصول و جزئیات مربوط به طراحی، اندازه‌یابی و مسائل اقتصادی مربوط به واحدهای ذخیره‌ساز به‌کاررفته در فرآیند



شکل ۲: تقسیم‌بندی مناطق کشور از لحاظ تابش خورشید روزانه [۸]

۲- شیرین‌سازی آب

فرآیندهای شیرین‌سازی، فرآیندهایی به‌منظور خالص‌سازی آب‌های شور برای مصارف آشامیدنی هستند. یک سیستم آب‌شیرین‌کن به‌طور کلی آب شور را به دو جریان تقسیم می‌کند. یکی جریان آب خالص با درصد بسیار کمی از نمک و املاح و دیگری جریانی که حاوی نمک و املاح باقی‌مانده می‌باشد.

۳-۱- فناوری‌های شیرین‌سازی

فناوری‌های شیرین‌سازی آب را از لحاظ تغییر فاز به دو دسته تقسیم می‌نمایند:

الف) فرآیندهایی که در آن‌ها شیرین‌سازی بدون تغییر فاز انجام می‌پذیرد:

- اسمز معکوس^۲ (RO)
 - الکترو دیالیز^۳ (ED)
- ب) فرآیندهایی که در آن‌ها تغییر فاز صورت می‌گیرد:
- تبخیر سریع چندمرحله‌ای^۴ (MSF)
 - تقطیر چندمرحله‌ای^۵ (MED)

در حال حاضر فناوری‌های مورد استفاده عمدتاً اسمز معکوس و تبخیر سریع چندمرحله‌ای و تقطیر چندمرحله‌ای بوده که طبق آمار ارائه‌شده به ترتیب ۶۰، ۲۷ و ۸ درصد از کل ظرفیت شیرین‌سازی جهان را به خود اختصاص داده‌اند [۹].

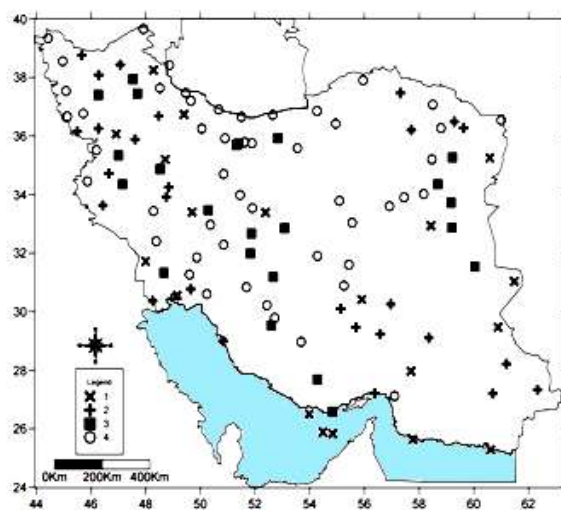
در روش اسمز معکوس، از فشار بالای حاصل از پمپ‌های الکتریکی جهت جداسازی آب شیرین از آب شور استفاده می‌گردد. در این روش فشار آب شور تا حد فشار اسمزی^۶ افزایش داده‌شده و سپس از غشاهایی عبور داده می‌شود. در طی این فرآیند، ذرات نمک جامد از آب شور جداسازی شده و آب شیرین بر جای می‌ماند. اما همان‌گونه که از نام روش تبخیر سریع چندمرحله‌ای برمی‌آید، این فرآیند در طی چند مرحله انجام می‌شود. در ابتدا دمای آب ورودی تا دمای جوش ۹۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش داده‌شده و فشار آن در طی چند مرحله کاهش داده می‌شود. سپس بخشی از آب در هر مرحله به‌صورت سریع تبخیر و سپس تقطیرشده، درحالی‌که آب باقیمانده از هر مرحله،

تولید انرژی الکتریکی، مکان بسیار مناسبی می‌باشد. به‌طور کلی، در جزیره ابوموسی ساعات بعدازظهر و به‌ویژه هنگام عصر، بادخیزتر از زمان‌های دیگر روز بوده و با توجه به این‌که این زمان، گرم‌ترین زمان روز است و مصرف انرژی الکتریکی برای دستگاه‌های خنک‌کننده در این زمان افزایش می‌یابد، لذا می‌توان از انرژی باد برای تولید انرژی الکتریکی در این مواقع استفاده نمود (شکل ۱) [۷].

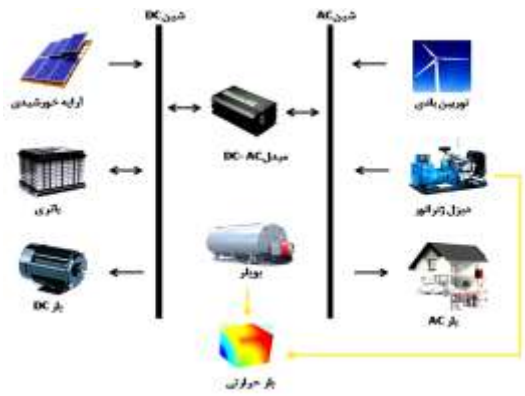
همچنین مطابق با شکل ۲، کشور ایران را از نظر میزان تابش خورشید روزانه به چهار منطقه تقسیم‌بندی نموده‌اند:

- منطقه با تابش کمتر از 350 cal/cm^2 در روز
- منطقه با تابش متوسط بین 350 cal/cm^2 تا 390 cal/cm^2 در روز
- منطقه با تابش زیاد بین 390 cal/cm^2 تا 430 cal/cm^2 در روز
- منطقه با تابش خیلی زیاد بیش‌تر از 430 cal/cm^2 در روز

با توجه به این شکل، استان هرمزگان و از جمله جزیره ابوموسی در زمره مناطق با تابش زیاد قرار می‌گیرند. به همین دلیل، شرایط بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در این منطقه بسیار مناسب می‌باشد و از این طریق می‌توان نسبت به ایجاد و اجرای طرح‌های پژوهشی و صنعتی در زمینه آب‌شیرین‌کن، کولر، آبگرمکن و ... در این منطقه اقدام نمود. استفاده‌ای که از نظر اقتصادی نیز کاملاً به‌صرفه می‌باشد [۸].



شکل ۱: گروه‌بندی ایستگاه‌های سینوپتیک کشور بر اساس قابلیت تولید برق از انرژی باد [۷]



شکل ۴: سیستم تجدیدپذیر ترکیبی

۴- سیستم‌های تجدیدپذیر ترکیبی

در سیستم‌های ترکیبی، با ترکیب دو یا چند منبع انرژی تجدیدپذیر، قابلیت پیش‌بینی تولید افزایش یافته و این منابع کمبودهای یکدیگر را تا حدودی پوشش می‌دهند. از این منظر باد و خورشید همپوشانی خوبی را از خود به نمایش گذارده‌اند [۱۲].

این سیستم‌ها، به‌ویژه در حالت مجزا از شبکه^۷، دربرگیرنده یک یا چند ذخیره‌ساز انرژی می‌باشند. سیستم ذخیره‌ساز می‌تواند انرژی را در ساعاتی که تولید بیش از مصرف است ذخیره نموده و در ساعات اوج مصرف به بار تحویل دهد. هم‌چنین واحدهای دیزلی نقش سیستم پشتیبان را داشته و بایستی بتوانند در صورت عدم وزش باد و تابش خورشید، بارهای ضروری را تأمین نمایند [۱۳-۱۵].

در نهایت بایستی خاطر نشان ساخت که انرژی حرارتی مصرفی در فرآیندهای شیرین‌سازی، می‌تواند توسط بخار آب تولیدی حاصل از سوزاندن سوخت در یک بویلر^۸ و یا با استفاده از حرارت مزاد واحدهای دیزلی در قالب سیستم تولید مشترک برق و حرارت، تأمین شود. سیستم‌های تولید مشترک برق و حرارت^۹ (CHP) غالباً برای تولید برق و حرارت به‌صورت هم‌زمان طراحی می‌شوند. در این نوع سیستم‌ها، منابع اتلاف حرارت، که عبارت‌اند از گازهای خروجی از محرک اولیه، سیکل خنک‌کن و ... شناسایی شده و با قراردادن مبدل‌های حرارتی، گرمای اتلافی به شکل حرارت با دمای بالا (حرارت قابل‌استفاده) بازیافت می‌شود [۱۶، ۱۷]. شمای کلی سیستم ترکیبی موردنظر در شکل ۴ نشان داده شده است.

۵- مدل (فرمول‌بندی) مسئله

یکی از اصلی‌ترین معیارها جهت سنجش هزینه‌های سیستم تجدیدپذیر ترکیبی موردنظر، هزینه خالص کنونی^{۱۰} (NPC) سیستم بوده که بر اساس تفاضل مقدار تمامی هزینه‌های سیستم و درآمد حاصله در مدت زمان طول عمر پروژه محاسبه می‌شود.

هزینه‌های سیستم شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه جایگزینی، هزینه بهره‌برداری و هزینه سوخت مصرفی اجزای سیستم

به مرحله تبخیر بعدی منتقل می‌گردد. در نهایت آب شیرین خروجی، از تقطیر آب‌های تبخیر شده در طی مراحل مذکور حاصل خواهد شد. روش تقطیر چندمرحله‌ای نیز همانند روش تبخیر سریع چندمرحله‌ای در چندین مرحله انجام می‌گردد. با این تفاوت که در روش تقطیر چندمرحله‌ای، بخار حاصل شده از هر مرحله در مرحله بعدی چگالیده شده و سپس دوباره تبخیر و تقطیر می‌شود [۹، ۱۰].

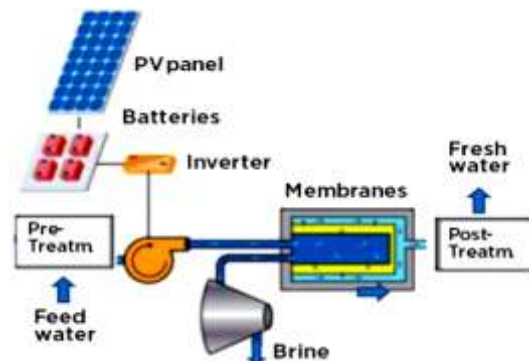
۳-۲- انرژی لازم جهت انجام فرآیندهای شیرین‌سازی

هریک از فناوری‌های شیرین‌سازی جهت انجام فرآیند جداسازی آب از نمک به انرژی نیاز دارند که این انرژی می‌تواند به‌صورت الکتریکی یا حرارتی تأمین شود. جهت انجام فرآیند اسمز معکوس تنها انرژی الکتریکی و جهت انجام فرآیندهای تبخیر سریع چندمرحله‌ای و تقطیر چندمرحله‌ای انرژی‌های الکتریکی و حرارتی موردنیاز می‌باشند. در حالت کلی انرژی موردنیاز جهت انجام فرآیندهای تبخیر سریع چندمرحله‌ای و تقطیر چندمرحله‌ای بیش‌تر از فرآیند اسمز معکوس می‌باشد.

در حالت کلی هر یک از فرآیندهای شیرین‌سازی تبخیر سریع چندمرحله‌ای، تقطیر چندمرحله‌ای و اسمز معکوس برای شیرین‌سازی هر مترمکعب آب شور به‌ترتیب به مقدار ۵ کیلووات‌ساعت، ۲/۷۵ کیلووات‌ساعت و ۲/۵ کیلووات‌ساعت انرژی متوسط نیاز دارند [۲].

۳-۳- شیرین‌سازی با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر

عمده‌ترین منبع جهت تأمین انرژی موردنیاز فرآیندهای شیرین‌سازی، انرژی خورشیدی می‌باشد که در ۴۳ درصد از کاربردهای فعلی از آن استفاده شده است. پس از انرژی خورشیدی، انرژی باد بیش‌ترین کاربرد را دارد. به‌کارگیری انرژی الکتریکی حاصل از سامانه‌های فتوولتاییک برای شیرین‌سازی آب در مناطق خشک با پتانسیل بالقوه تابش، راهکاری بسیار مناسب می‌باشد. این در حالی است که استفاده از انرژی باد جهت پروژه‌های شیرین‌سازی در مناطق ساحلی و جزیره‌ای نیز از جذابیت خاصی برخوردار است. به‌عنوان نمونه، نحوه شیرین‌سازی به روش اسمز معکوس با به‌کارگیری سامانه فتوولتاییک به‌عنوان تأمین‌کننده انرژی الکتریکی، در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۱].



شکل ۳: ترکیب سامانه فتوولتاییک و روش اسمز معکوس در یک سامانه آب‌شیرین‌کن

هزینه جایگزینی هر یک از اجزای سیستم ترکیبی، به صورت سالیانه، مطابق با رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$C_{arep} = C_{rep} \cdot f_{rep} \cdot SFF(i, n_{comp}) - S \cdot SFF(i, n) \quad (5)$$

در ادامه، به بررسی هر یک از عبارات موجود در این رابطه پرداخته می‌شود. عبارت C_{rep} نشان‌دهنده هزینه جایگزینی هر جزء می‌باشد. هم‌چنین f_{rep} عاملی است که به دلیل امکان متفاوت بودن طول عمر هر یک از اجزا با طول عمر پروژه در نظر گرفته شده و به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$f_{rep} = CRF(i, n) / CRF(i, n_{rep}) \quad (6)$$

که در این رابطه n_{rep} خود به صورت رابطه (۷) محاسبه می‌گردد:

$$n_{rep} = n_{comp} \cdot INT \left(\frac{n}{n_{comp}} \right) \quad (7)$$

که n_{comp} طول عمر هر جزء از سیستم ترکیبی و هم‌چنین $INT(.)$ عملگری می‌باشد که توسط آن مقدار صحیح هر عدد حقیقی در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین عبارت $SFF(i, n_{comp})$ در رابطه (۵) که به عنوان فاکتور اقساطی سالواره^{۱۴} شناخته می‌شود، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$SFF(i, n) = \frac{i}{(i+1)^n - 1} \quad (8)$$

عبارت S در رابطه (۵) نیز ارزش بازیافتی ناشی از فروش اسقاطی تجهیزات در پایان مدت زمان طول عمر پروژه بوده که متناسب با هزینه جایگزینی هر جزء و عمر باقی‌مانده آن می‌باشد و به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌گردد:

$$S = C_{rep} \frac{n_{rem}}{n_{comp}} \quad (9)$$

که در این رابطه n_{rem} عمر باقی‌مانده هر جزء سیستم ترکیبی پس از پایان طول عمر پروژه بوده و خود به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$n_{rem} = n_{comp} - (n - n_{rep}) \quad (10)$$

در نهایت، بایستی خاطر نشان ساخت که مقدار C_{aopr} یعنی هزینه بهره‌برداری سالیانه برای هر یک از اجزای سیستم ترکیبی، در هنگام شبیه‌سازی مسئله، مستقیماً در نظر گرفته خواهد شد. در نتیجه با مشخص شدن مقادیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و جایگزینی سالیانه شده و هزینه بهره‌برداری سالیانه، می‌توان هزینه سالیانه هر جزء سیستم ترکیبی را محاسبه و سپس با استفاده از آن، هزینه خالص سیستم را نیز به دست آورد [۱۹، ۱۸].

ترکیبی می‌باشد. درآمد مذکور نیز حاصل از ارزش بازیافتی^{۱۱} ناشی از فروش اسقاطی تجهیزات در پایان مدت زمان طول عمر پروژه می‌باشد. در این مقاله تابع هدف، هزینه خالص کنونی سیستم (NPC) می‌باشد. NPC را می‌توان مطابق با رابطه (۱) محاسبه نمود. هم‌چنین هر یک از اجزای تابع هدف در روابط (۲) تا (۱۰) مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, n)} \quad (1)$$

در این رابطه عبارت $CRF(i, n)$ برابر با نرخ بازگشت سرمایه^{۱۲} بوده که خود تابعی از نرخ سود (i) و طول عمر پروژه (n) می‌باشد و به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$CRF(i, n) = \frac{i \cdot (i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (2)$$

هم‌چنین عبارت $C_{ann,tot}$ در رابطه (۱)، نشان‌دهنده مجموع هزینه‌های سالیانه^{۱۳} هر یک از اجزای سیستم ترکیبی می‌باشد. هزینه سالیانه هر جزء سیستم ترکیبی برابر است با مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و جایگزینی که به صورت سالیانه محاسبه شده (هزینه‌های سالیانه شده) و هم‌چنین هزینه بهره‌برداری سالیانه آن جزء در مدت زمان طول عمر پروژه. به عبارت دیگر:

$$C_{ann,tot} = C_{acap} + C_{arep} + C_{aopr} \quad (3)$$

عبارات C_{acap} ، C_{arep} و C_{aopr} به ترتیب نشان‌دهنده هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سالیانه شده، هزینه جایگزینی سالیانه شده و هزینه بهره‌برداری سالیانه می‌باشند که در ادامه به بررسی نحوه محاسبه هر یک از این هزینه‌ها پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است که هزینه‌های سالیانه جهت مقایسه هزینه‌های اجزای مختلف سیستم با یکدیگر مناسب بوده، زیرا بیانگر ارتباط نسبی میان هزینه هر جزء با هزینه خالص سیستم می‌باشد. این هزینه امکان مقایسه‌ای صحیح میان اجزایی از سیستم با هزینه سرمایه‌گذاری اولیه پایین و هزینه بهره‌برداری بالا (مانند دیزل ژنراتورها) و اجزایی با هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا و هزینه بهره‌برداری پایین (مانند آرایه‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی) را فراهم می‌نماید.

هزینه سرمایه‌گذاری اولیه هر یک از اجزای سیستم ترکیبی، به صورت سالیانه، مطابق با رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$C_{acap} = C_{cap} \cdot CRF(i, n) \quad (4)$$

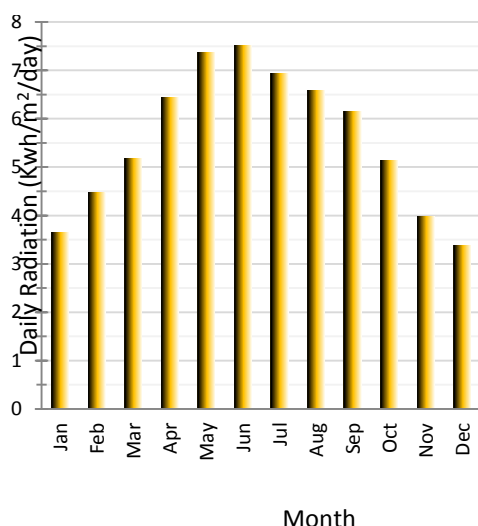
که C_{cap} هزینه سرمایه‌گذاری اولیه هر جزء می‌باشد. هم‌چنین همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، عبارت $CRF(i, n)$ برابر با نرخ بازگشت سرمایه بوده که به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

۶- شبیه‌سازی

باتری‌های در نظر گرفته شده، دارای ولتاژ نامی ۶ ولت، ظرفیت نامی حدوداً ۱/۲ آمپر ساعت (۷ کیلووات ساعت) و طول عمر ۱۰ ساله می‌باشند. هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه و جایگزینی باتری‌ها و همچنین منحنی ظرفیت آن‌ها، به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است [۲۸، ۲۹]. با توجه به شکل ۱۲، با افزایش جریان دشارژ باتری، ظرفیت قابل‌استفاده آن کاهش خواهد یافت. همچنین هزینه بهره‌برداری سالیانه هر یک از باتری‌ها با ظرفیت ۱/۲ آمپر ساعت، برابر با ۱۰ دلار در نظر گرفته شده است.

منحنی‌های مربوط به هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و جایگزینی دیزل ژنراتور و مبدل، به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. هزینه بهره‌برداری از دیزل ژنراتور و مبدل نیز به ترتیب برابر با ۱ دلار در ساعت و ۱۰ دلار در سال در نظر گرفته شده است. همچنین طول عمر و هزینه سوخت دیزل ژنراتور به ترتیب برابر با ۱۵۰۰۰ ساعت و ۰/۱۲ دلار در نظر گرفته شده است. طول عمر و راندمان مبدل نیز به ترتیب برابر با ۱۰ سال و ۹۰ درصد لحاظ گردیده است [۲۸ و ۳۰].

در این مقاله جهت افزایش قابلیت اطمینان سیستم، ذخیره‌ای عملیاتی برابر با ۱۰ درصد مقدار بار در هر ساعت لحاظ شده است. لازم به‌ذکر است که با در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان "حداکثر تقاضای بار قابل قطع سالیانه" ۱۵، عملکرد سیستم تجدیدپذیر ترکیبی می‌تواند به میزان عمده‌ای بهبود یابد. این شاخص برحسب درصد برابر است با حداکثر بار قابل قطع سالیانه تقسیم بر کل بار سالیانه که بیان‌گر این موضوع است که در مدت‌زمان یک سال، چند مگاوات از مقدار کل تقاضای بار سالیانه دارای اولویت جهت تغذیه نبوده (بارهای غیرضروری) و می‌تواند به صورت موقت قطع شده و تأمین نگردد. در این مقاله مقدار این شاخص برابر با ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: میانگین انرژی خورشیدی تابشی روزانه در هر یک از ماه‌های سال در جزیره ابوموسی

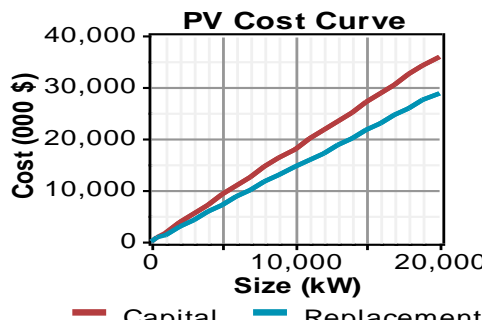
در این مقاله، سرمایه‌گذاری بهینه یک سیستم تجدیدپذیر ترکیبی جدا از شبکه، جهت تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز مشترکین و همچنین انرژی الکتریکی و حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن جهت تأمین آب شیرین مصرفی در جزیره ابوموسی مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت تغذیه تقاضای توان الکتریکی جزیره، توربین‌های بادی، واحدهای فتوولتائیک و دیزل ژنراتورها به کار گرفته شده‌اند. همچنین تعدادی باتری به‌عنوان واحد پشتیبان در نظر گرفته شده‌اند. جهت تأمین تقاضای توان حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن نیز از تعدادی بویلر و همچنین حرارت تولیدی مازاد دیزل ژنراتورها استفاده شده است. نرم‌افزار مورد استفاده جهت انجام شبیه‌سازی‌ها، نرم‌افزار HOMER می‌باشد که این نرم‌افزار توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده آمریکا ایجاد شده و توسعه یافته است. در این بخش، در ابتدا اطلاعات ورودی مسئله مورد بررسی قرار گرفته و سپس نتایج شبیه‌سازی ارائه خواهند شد.

۶-۱- اطلاعات ورودی

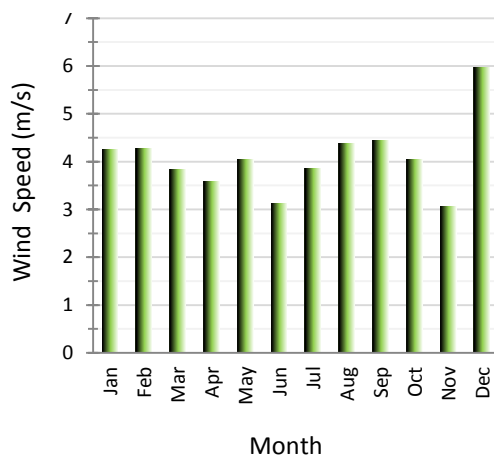
از لحاظ مختصات جغرافیایی، جزیره ابوموسی در ۵۵ درجه خط طول شرقی و ۲۶ درجه خط عرض شمالی واقع می‌باشد. میانگین انرژی خورشیدی تابشی روزانه در هر یک از ماه‌های سال در جزیره ابوموسی را می‌توان با توجه به مختصات جغرافیایی این جزیره و با استناد به داده‌های ارائه‌شده توسط پایگاه‌های هواشناسی، به صورت شکل ۵ ترسیم نمود [۲۰ و ۲۱].

در شکل ۶، میانگین سرعت باد روزانه در هر یک از ماه‌های سال در جزیره ابوموسی، با استفاده از داده‌های ارائه‌شده توسط سایت‌های هواشناسی استان هرمزگان نشان داده شده است. منحنی توان بادی برحسب سرعت باد برای توربین بادی مورد نظر نیز به صورت شکل ۷ می‌باشد [۲۲، ۲۳]. همچنین مقدار تقاضای توان الکتریکی ساعتی مصرف‌کنندگان در جزیره ابوموسی با پیک بار ۸ مگاوات به صورت شکل ۸ می‌باشد [۲۴].

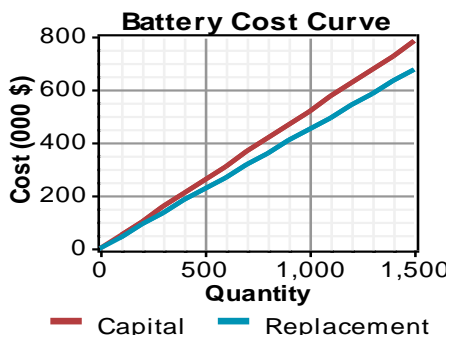
هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه و جایگزینی توربین‌های بادی ۳۳۰ کیلوواتی AC و آرایه‌های فتوولتائیک ۵۰۰ کیلوواتی DC، به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است که هزینه جایگزینی به هزینه‌ای اطلاق می‌شود که بایستی جهت جایگزین نمودن هر یک از اجزای سیستم ترکیبی با اجزای جدید، پس از پایان طول عمر آن‌ها، صرف گردد. همچنین در این مقاله، هزینه بهره‌برداری از هر یک از توربین‌های بادی ۳۳۰ کیلوواتی و هر یک از آرایه‌های فتوولتائیک ۵۰۰ کیلوواتی برابر با ۲۵ دلار در سال در نظر گرفته شده است. طول عمر توربین‌های بادی و آرایه‌های فتوولتائیک نیز برابر با ۲۰ سال منظور شده است. لازم به‌ذکر است که سیستم ردیابی توان حداکثر نیز در مدل‌سازی آرایه‌های فتوولتائیک لحاظ گردیده است [۲۷-۲۵].



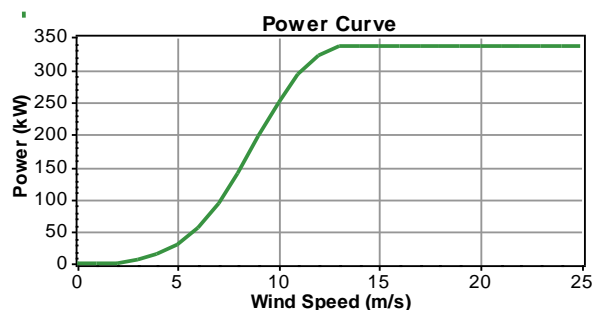
شکل ۱۰: هزینه سرمایه‌گذاری و جایگزینی آرایه فتوولتائیک برحسب اندازه آرایه



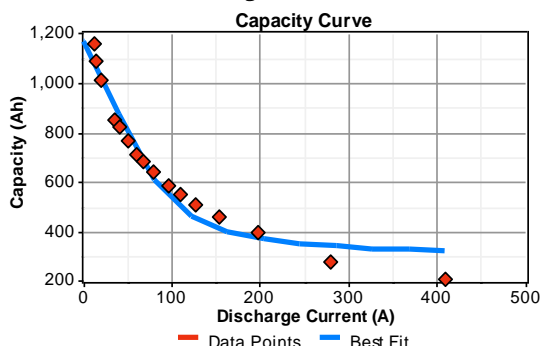
شکل ۶: میانگین سرعت باد روزانه در هر یک از ماه‌های سال در جزیره ابوموسی



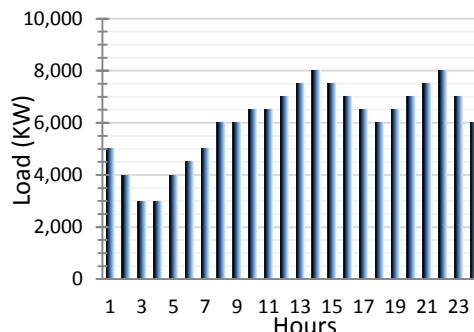
شکل ۱۱: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و جایگزینی باتری‌ها برحسب تعداد آن‌ها



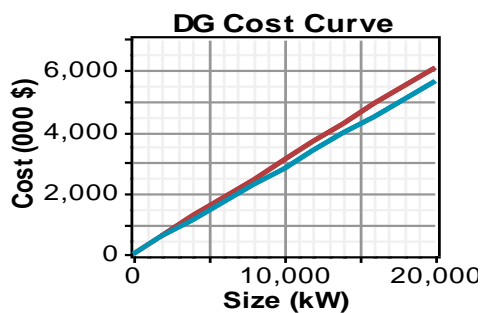
شکل ۷: منحنی توان توربین بادی



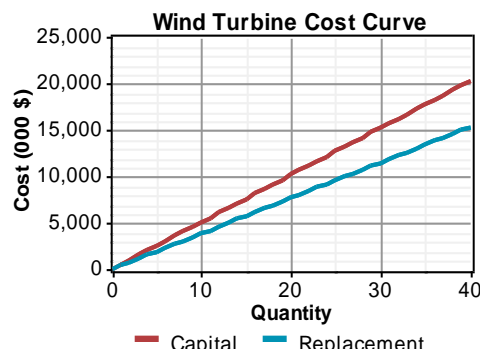
شکل ۱۲: منحنی ظرفیت برحسب جریان دشارژ باتری



شکل ۸: تقاضای توان ساعتی مصرف‌کنندگان



شکل ۱۳: هزینه‌های سرمایه‌گذاری و جایگزینی دیزل ژنراتور



شکل ۹: هزینه سرمایه‌گذاری و جایگزینی توربین‌های بادی برحسب تعداد آن‌ها

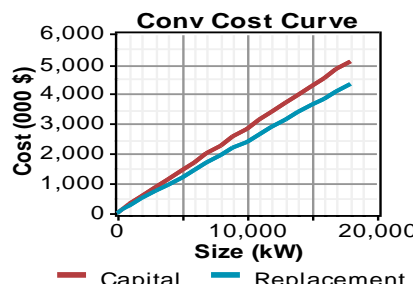
پس از انجام شبیه‌سازی با در نظر گرفتن روش MSF، اطلاعات مربوط به پیکربندی بهینه سیستم ترکیبی به صورت جدول ۱ به دست آمده است. لازم به ذکر است که پیکربندی مذکور پس از انجام یکایک شماری کامل میان تمامی پیکربندی‌های ممکن سیستم (تعداد ۳۴۰۶۰۷ حالت)، توسط نرم‌افزار HOMER انتخاب شده است. این پیکربندی شامل سامانه‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، دیزل ژنراتورها، مبدل‌ها و باتری‌ها می‌باشد.

با توجه به جدول ۱، با در نظر گرفتن این پیکربندی، هم هزینه خالص سیستم ترکیبی (۷۲۳۹۶۳۰۴ دلار) و هم هزینه هر کیلووات‌ساعت انرژی (۰/۰۹۸ دلار) دارای کم‌ترین مقادیر نسبت به دیگر پیکربندی‌های سیستم می‌باشند.

جدول ۱: مشخصات پیکربندی بهینه سیستم در روش MSF

توان نامی آرایه‌های فتوولتائیک	تعداد توربین‌های بادی
۱۰۰۰۰ کیلووات	۲۳ عدد
توان نامی دیزل ژنراتورها	تعداد باتری‌ها
۶۰۰۰ کیلووات	۱۵۰۰ عدد
هزینه خالص	هزینه هر کیلووات‌ساعت انرژی
۷۲۳۹۶۳۰۴ دلار	۰/۰۹۸ دلار
درصد بار تأمین‌نشده	میزان مصرف سوخت
۴ درصد	۱۰۸۳۱۴۹۶ لیتر

در پیکربندی مذکور، آرایه‌های فتوولتائیک دارای توان نامی ۱۰ مگاوات بوده و به‌طور متوسط ۲۳۳۸ کیلووات توان الکتریکی (سالانه ۲۰۴۷۸ مگاوات ساعت انرژی الکتریکی) تولید می‌نمایند. همچنین از ۲۳ عدد توربین بادی ۳۳۰ کیلوواتی استفاده می‌شود که در مجموع دارای توان نامی ۷۵۹۰ کیلووات بوده و به‌طور متوسط ۱۲۱۲ کیلووات توان الکتریکی AC (سالانه ۱۰۶۱۷ مگاوات‌ساعت انرژی الکتریکی) تولید می‌نمایند. در پیکربندی مذکور، ۶ عدد دیزل ژنراتور هر یک با توان نامی ۱ مگاوات (با تولید انرژی سالانه ۲۹۸۵۵ مگاوات‌ساعت) نیز علاوه بر آرایه‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی، جهت تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز مصرف‌کنندگان و واحدهای آب‌شیرین‌کن، موردنیاز می‌باشند. سهم هر یک از منابع تولیدکننده توان در تأمین تقاضای توان الکتریکی ماهیانه مصرف‌کنندگان و واحدهای آب‌شیرین‌کن (با به‌کارگیری روش MSF) در شکل ۱۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که دیزل ژنراتورهای یادشده، سالانه به میزان ۷۶۶۵۳۰ کیلووات‌ساعت انرژی حرارتی نیز جهت تأمین انرژی حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن تولید می‌نمایند. این ژنراتورها با تولید این مقدار انرژی حرارتی، ۶۴ درصد از انرژی حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن در روش MSF را تأمین می‌نمایند. همچنین بویلرها با تولید انرژی حرارتی به میزان ۴۲۷۰۸۰ کیلووات‌ساعت در سال، مابقی انرژی حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن (۳۶ درصد انرژی حرارتی موردنیاز) را تولید می‌نمایند. نحوه تأمین توان حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن در روش



شکل ۱۴: هزینه‌های سرمایه‌گذاری و جایگزینی مبدل

در نهایت بایستی خاطرنشان ساخت که میانگین انرژی مصرفی برای فناوری شیرین‌سازی MSF، ۵ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب بوده که به میزان ۳ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب آن انرژی الکتریکی و ۲ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب آن انرژی حرارتی می‌باشد. همچنین میانگین انرژی مصرفی برای فناوری MED، ۲/۷۵ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب بوده که از این مقدار ۱/۷۵ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب آن انرژی الکتریکی و ۱ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب آن انرژی حرارتی می‌باشد. برای فناوری RO نیز میانگین انرژی مصرفی برابر با ۲/۵ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب در نظر گرفته شده است که این مقدار انرژی تماماً الکتریکی می‌باشد.

همچنین در این مقاله با به‌کارگیری مفهوم بار قابل تعویق، تأثیر مخزن‌های ذخیره‌سازی آب شیرین در مسئله لحاظ شده است. لازم به ذکر است که هم‌اکنون ظرفیت ذخیره‌سازی آب شیرین در جزیره ابوموسی در حدود ۱۰ هزار مترمکعب می‌باشد. در نتیجه می‌توان با ضرب نمودن این مقدار ظرفیت (برحسب مترمکعب) در انرژی متوسط مصرفی هر یک از فرآیندهای شیرین‌سازی (برحسب کیلووات‌ساعت بر مترمکعب)، ظرفیت ذخیره‌سازی برحسب مترمکعب را به ظرفیت ذخیره‌سازی برحسب کیلووات‌ساعت تبدیل نموده و در بخش بار قابل تعویق در مسئله لحاظ نمود.

۶-۲- نتایج شبیه‌سازی

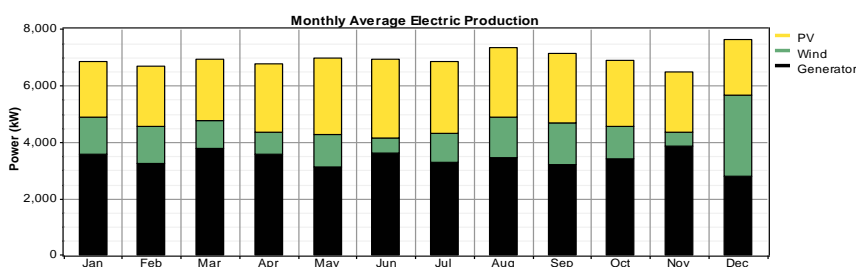
نیاز روزانه آب شیرین در جزیره ابوموسی به میزان حدوداً ۲۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است. در نتیجه جهت تأمین آب شیرین موردنیاز جزیره با استفاده از فناوری MSF، به مقدار ۶۰۰۰ کیلووات‌ساعت انرژی الکتریکی و ۴۰۰۰ کیلووات‌ساعت انرژی حرارتی در روز نیاز است. همچنین با به‌کارگیری فناوری MED، جهت تأمین آب شیرین موردنیاز روزانه جزیره، انرژی الکتریکی به مقدار ۴۰۰۰ کیلووات‌ساعت در روز و انرژی حرارتی به مقدار ۲۰۰۰ کیلووات‌ساعت در روز موردنیاز خواهد بود. در صورت به‌کارگیری فرآیند RO نیز روزانه ۵۰۰۰ کیلووات‌ساعت انرژی الکتریکی موردنیاز خواهد بود. در ادامه، با استفاده از اطلاعات ورودی داده‌شده، نتایج شبیه‌سازی برای هر یک از روش‌های MSF، MED و RO ارائه خواهند شد.

۶-۲-۱- روش MSF

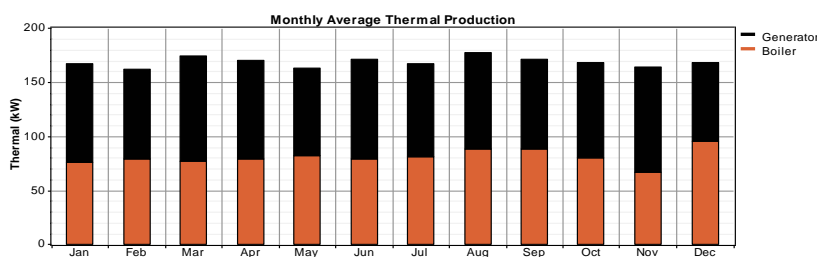
داده شده است. با توجه به این شکل، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه اجزای مختلف سیستم، بیش‌ترین سهم را در میان هزینه‌های مختلف سیستم به خود اختصاص داده است. بخش عمده‌ای از این هزینه‌های سرمایه‌گذاری مربوط به آرایه‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی می‌باشد. پس از هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه‌های جایگزینی و سوخت اجزا بیش‌ترین مقادیر را دارند که قسمت عمده این هزینه‌ها مربوط به دیزل ژنراتورها می‌باشد. درنهایت، هزینه بهره‌برداری از تجهیزات دارای کم‌ترین هزینه نسبت به سایر هزینه‌های سیستم بوده و بخش اعظمی از آن مربوط به دیزل ژنراتورها است. لازم به ذکر است که بالاترین مقادیر ارزش بازیافتی نیز مربوط به آرایه‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی می‌باشد.

MSF در شکل ۱۶ ارائه شده است. درنهایت، ظرفیت نامی مبدل‌های سیستم برابر با ۸ مگاوات بوده و تعداد ۱۵۰ عدد بانک باتری که هر یک شامل ۱۰ عدد باتری با ظرفیت ۷ کیلووات‌ساعت می‌باشند، موردنیاز است.

هزینه‌های مربوط به پیکربندی بهینه سیستم، شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه^۶، هزینه جایگزینی^۷، هزینه بهره‌برداری و نگهداری^۸، هزینه سوخت^۹، ارزش بازیافتی و هزینه خالص کنونی سیستم همگی برحسب دلار، در جدول ۲ ارائه شده است. هم‌چنین جهت مقایسه مناسب‌تر هزینه‌های اجزای مختلف پیکربندی مذکور، می‌توان شکل ۱۷ را موردتوجه قرار داد. در این شکل، هزینه‌های مختلف اجزای سیستم شامل آرایه‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، دیزل ژنراتورها، بویلرها، باتری‌ها و مبدل‌ها به‌صورت شماتیک نشان



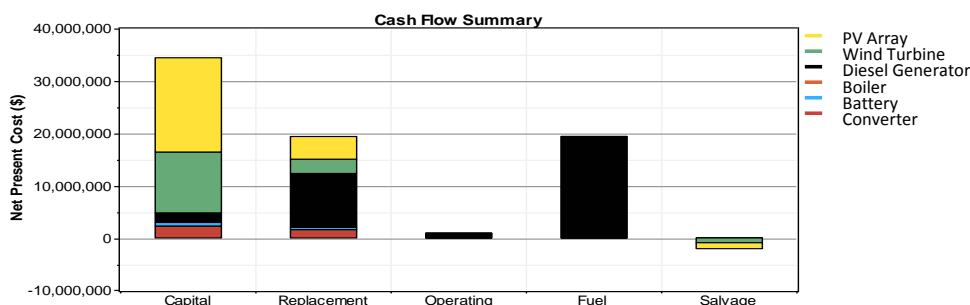
شکل ۱۵: سهم هر یک از منابع تولیدکننده توان در تأمین تقاضای توان الکتریکی در روش MSF



شکل ۱۶: نحوه تأمین توان حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن در روش MSF

جدول ۲: هزینه‌های مربوط به پیکربندی بهینه در روش MSF برحسب دلار

مجموع	ارزش بازیافتی	سوخت	بهره‌برداری	جایگزینی	سرمایه‌گذاری	
۲۱۲۴۰۵۳۲	-۱۲۵۳۵۹۵	۰	۴۱۲۹	۴۴۸۹۹۹۳	۱۸۰۰۰۰۰	آرایه فتوولتائیک
۱۳۶۱۶۷۷۴	-۷۶۵۱۰۷	۰	۴۷۴۹	۲۷۴۰۳۸۰	۱۱۶۳۶۷۵۴	توربین بادی
۳۲۱۹۷۶۳۴	۱	۱۹۳۶۸۴۳۰	۸۶۷۱۸۵	۱۰۱۴۰۴۲۰	۱۸۲۱۶۰۰	دیزل ژنراتور
۹۱۳۷۱	۰	۹۱۳۷۱	۰	۰	۰	بویلر
۱۳۲۶۶۴۰	-۵۸۷۶۲	۰	۱۰۳۲۳۶	۵۰۲۱۶۵	۷۸۰۰۰۰	باتری
۳۹۲۳۳۵۵	۰	۰	۲۲۰۲	۱۶۷۰۷۸۴	۲۲۵۰۳۶۸	مبدل
۷۲۳۹۶۳۰۴	-۲۰۷۷۴۶۴	۱۹۴۵۹۸۰۴	۹۸۱۵۰۲	۱۹۵۴۳۷۴۰	۳۴۴۸۸۱۷۲۰	مجموع



شکل ۱۷: هزینه‌های اجزای مختلف سیستم در روش MSF

۶-۲-۲- روش MED

آب‌شیرین‌کن، تولید می‌نمایند. همچنین مابقی انرژی حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن را بویلرها با تولید انرژی حرارتی به میزان ۸۷۵۶۶ کیلووات‌ساعت در سال تأمین می‌کنند. بایستی خاطرنشان ساخت که ظرفیت نامی مبدل‌های سیستم برابر با ۹ مگاوات محاسبه شده است. تعداد ۱۳۰۰ عدد باتری مجموعاً با ظرفیت نامی ۹۰۱۷ کیلووات‌ساعت نیز موردنیاز می‌باشد.

هزینه‌های مربوط به پیکربندی یادشده (همگی برحسب دلار) در جدول ۴ ارائه شده است. در این روش نیز مشابه با روش MSF، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه اجزای مختلف سیستم، بیش‌ترین سهم را در میان هزینه‌های مختلف سیستم به خود اختصاص داده است. پس از هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه‌های جایگزینی و سوخت اجزا و سپس هزینه بهره‌برداری از تجهیزات دارای کم‌ترین هزینه نسبت به سایر هزینه‌های سیستم می‌باشد.

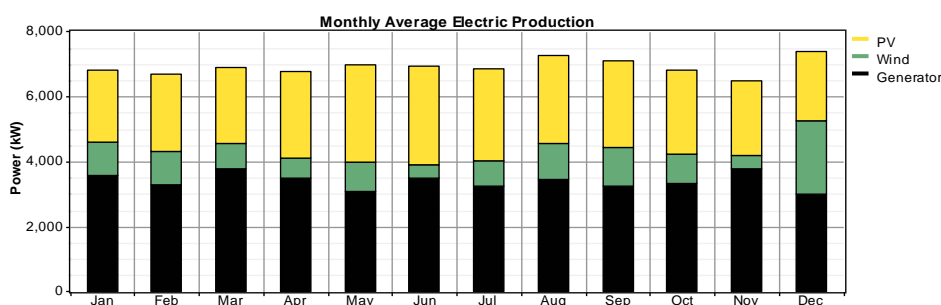
با در نظر گرفتن جدول‌های ۲ و ۴، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و جایگزینی اجزا در روش MED، در مقایسه با این هزینه‌ها در روش MSF، به ترتیب ۱/۶۰۱ و ۰/۲۲۲ درصد کاهش خواهند یافت. همچنین هزینه‌های بهره‌برداری و سوخت در روش MED، نسبت به روش MSF، به ترتیب کاهشی برابر با ۱/۹۴۲ و ۰/۷۵۷ درصد را خواهند داشت. درنهایت، ارزش بازیافتی در روش MED در مقایسه با روش MSF، به میزان ۱/۲۲۲ درصد افزایش خواهد یافت. حاصل کاهش هزینه‌ها و افزایش ارزش بازیافتی در روش MED نسبت به روش MSF، کاهش هزینه خالص در این روش به میزان ۱/۰۱۷ درصد خواهد بود.

جدول ۳: مشخصات پیکربندی بهینه سیستم در روش MED

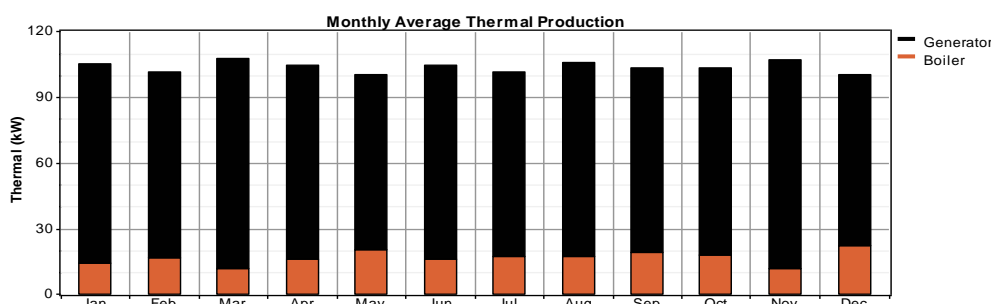
توان نامی آرایه‌های فتوولتائیک	تعداد توربین‌های بادی
۱۱۰۰۰ کیلووات	۱۸ عدد
توان نامی دیزل ژنراتورها	تعداد باتری‌ها
۶۰۰۰ کیلووات	۱۳۰۰ عدد
هزینه خالص	هزینه هر کیلووات‌ساعت انرژی
۷۱۶۵۹۳۶۰ دلار	۰/۰۹۹ دلار
درصد بار تأمین نشده	میزان مصرف سوخت
۵ درصد	۱۰۷۹۲۵۲۳ لیتر

پس از انجام شبیه‌سازی با در نظر گرفتن روش MED، اطلاعات مربوط به پیکربندی بهینه سیستم ترکیبی که پس از انجام یکایک شماری کامل میان تمامی پیکربندی‌های ممکن سیستم (تعداد ۱۲۷۳۷۷ حالت) انتخاب شده است، به صورت جدول ۳ به دست آمده است. با توجه به جدول مذکور و با در نظر گرفتن این پیکربندی، هزینه خالص سیستم در روش MED (۷۱۶۵۹۳۶۰ دلار)، نسبت به این هزینه در روش MSF، به میزان ۱/۰۱۷ درصد کاهش می‌یابد؛ اما در روش MED، هزینه هر کیلووات‌ساعت انرژی (۰/۰۹۹ دلار)، نسبت به این هزینه در روش MSF، افزایشی ۱/۰۱۰ درصدی را خواهد داشت. همچنین با در نظر گرفتن این پیکربندی، درصد بار تأمین‌نشده (۵ درصد)، دارای ۱ درصد افزایش در مقایسه با روش MSF خواهد بود. علاوه بر این، میزان مصرف سوخت در روش MED (۱۰۷۹۲۵۲۳ لیتر)، نسبت به روش MSF، به میزان ۳۸۹۷۳ لیتر کاهش خواهد یافت.

در پیکربندی مذکور در روش MED، جهت تأمین توان الکتریکی موردنیاز سیستم، توان نامی آرایه‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی و دیزل ژنراتورها به ترتیب برابر با ۱۱ مگاوات، ۵۹۴۰ کیلووات و ۶ مگاوات محاسبه شده است. همچنین متوسط توان تولیدی آرایه‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی و دیزل ژنراتورها به ترتیب برابر با ۲۵۷۱ کیلووات (سالانه ۲۲۵۲۵ مگاوات ساعت انرژی الکتریکی)، ۹۴۹ کیلووات (سالانه ۸۳۰۹ مگاوات ساعت انرژی الکتریکی) و ۴۲۷۷ کیلووات (سالانه ۲۹۷۶۴ مگاوات ساعت انرژی الکتریکی) می‌باشد. در شکل ۱۸، توان الکتریکی تولیدی توسط آرایه‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی و دیزل ژنراتورها جهت تأمین تقاضای توان الکتریکی ماهیانه مصرف‌کنندگان و واحدهای آب‌شیرین‌کن در روش MED نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۹، توان حرارتی موردنیاز واحدهای دیزل ژنراتورها و بویلرها جهت تأمین توان حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن در روش MED، ارائه شده است. دیزل ژنراتورهای سیستم، به میزان ۷۶۳۳۲۲ کیلووات‌ساعت انرژی حرارتی در سال، جهت تأمین بخش عمده‌ای از انرژی حرارتی موردنیاز واحدهای



شکل ۱۸: سهم هر یک از منابع تولیدکننده توان در تأمین تقاضای توان الکتریکی در روش MED



شکل ۱۹: نحوه تأمین توان حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن در روش MED

جدول ۴: هزینه‌های مربوط به پیکربندی بهینه در روش MED برحسب دلار

مجموع	ارزش بازیافتی	سوخت	بهره‌برداری	جایگزینی	سرمایه‌گذاری	
۲۳۳۶۴۵۸۴	-۱۳۷۸۹۵۵	۰	۴۵۴۲	۴۹۳۸۹۹۳	۱۹۸۰۰۰۰	آرایه فتوولتائیک
۱۰۶۵۶۶۱۰	-۵۹۸۷۸۰	۰	۳۷۱۷	۲۱۴۴۶۴۵	۹۱۰۷۰۲۸	توربین بادی
۳۲۰۵۵۹۳۴	-۲۳۴۰۰	۱۹۲۹۳۷۲۲	۸۶۲۲۳۰	۱۰۱۰۱۷۷۹	۱۸۲۱۶۰۰	دیزل ژنراتور
۱۸۷۳۴	۰	۱۸۷۳۴	۰	۰	۰	بویلر
۱۱۴۹۷۵۴	-۵۰۹۲۷	۰	۸۹۴۷۱	۴۳۵۲۱۰	۶۷۶۰۰۰	باتری
۴۴۱۳۷۷۴	۰	۰	۲۴۷۸	۱۸۷۹۶۳۲	۲۵۳۱۶۶۴	میدل
۷۱۶۵۹۳۶۰	-۲۰۵۲۰۶۲	۱۹۳۱۲۴۵۶	۹۶۲۴۳۸	۱۹۵۰۰۴۶۲	۳۳۹۳۶۲۹۲	مجموع

۳-۲-۶ روش RO

نسبت به روش MSF خواهد بود. علاوه بر این، میزان مصرف سوخت در روش RO (۱۰۹۰۴۵۰۲ لیتر)، نسبت به روش‌های MSF و MED، به ترتیب به مقدار ۷۳۰۰۶ و ۱۱۱۹۷۹ لیتر افزایش خواهد یافت.

جدول ۵: مشخصات پیکربندی بهینه سیستم در روش RO

توان نامی آرایه‌های فتوولتائیک	تعداد توربین‌های بادی
۱۲۰۰۰ کیلووات	۱۴ عدد
توان نامی دیزل ژنراتورها	تعداد باتری‌ها
۶۰۰۰ کیلووات	۱۵۰۰ عدد
هزینه خالص	هزینه هر کیلووات ساعت انرژی
۷۱۸۱۴۳۷۶ دلار	۰/۰۹۹ دلار
درصد بار تأمین‌نشده	میزان مصرف سوخت
۵ درصد	۱۰۹۰۴۵۰۲ لیتر

در پیکربندی یادشده در روش RO، آرایه‌های فتوولتائیک دارای توان نامی ۱۲ مگاوات بوده و به‌طور متوسط ۲۸۰۵ کیلووات توان

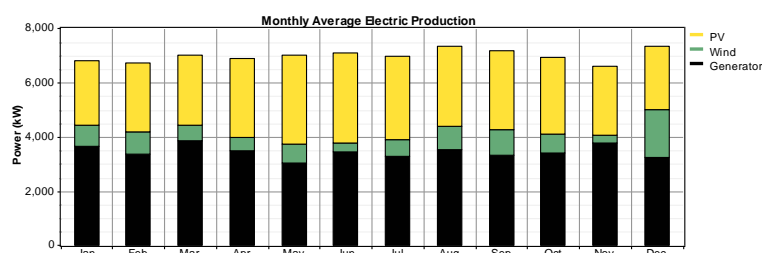
پس از انجام شبیه‌سازی با در نظر گرفتن روش RO، اطلاعات مربوط به پیکربندی بهینه سیستم ترکیبی به‌صورت جدول ۵ به‌دست آمده است. این نتایج پس از انجام یکایک شماری کامل میان تمامی پیکربندی‌های ممکن سیستم (تعداد ۱۲۵۹۵۰ حالت) حاصل‌شده است. با توجه به این جدول، هزینه خالص سیستم در روش RO (۷۱۸۱۴۳۷۶ دلار)، نسبت به این هزینه در روش‌های MSF و MED، به ترتیب به میزان ۰/۸۰۳ درصد کاهش و ۰/۲۱۵ درصد افزایش می‌یابد؛ اما در روش RO، هزینه هر کیلووات ساعت انرژی (۰/۰۹۹ دلار)، در مقایسه با این هزینه در روش MED تغییری نداشته و در مقایسه با روش MSF افزایشی ۱/۰۱۰ درصدی را خواهد داشت. همچنین با در نظر گرفتن این پیکربندی، درصد بار تأمین‌نشده (۵ درصد) نسبت به روش MED تغییری نداشته و دارای ۱ درصد افزایش

هزینه‌های مربوط به پیکربندی یادشده برحسب دلار، در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به جدول ۶، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در روش RO در مقایسه با این هزینه در روش‌های MSF و MED، به ترتیب ۱/۹۴۹ و ۰/۳۵۲ درصد کاهش خواهد یافت؛ اما هزینه جایگزینی اجزا نسبت به روش MSF تقریباً بدون تغییر بوده و نسبت به روش MED دارای ۰/۲۶۵ درصد افزایش می‌باشد. هم‌چنین هزینه بهره‌برداری از اجزا در روش RO در مقایسه با این هزینه در روش‌های MSF و MED، به ترتیب ۰/۴۱۷ درصد کاهش و ۱/۵۳۰ درصد افزایش می‌یابد. هزینه سوخت در این روش نیز نسبت به روش‌های MSF و MED، به ترتیب افزایشی به میزان ۰/۲۷۱ و ۱/۰۲۶ درصد را خواهد داشت. در نهایت، ارزش بازیافتی در روش RO در مقایسه با روش‌های MSF و MED، به میزان ۱/۵۸۲ و ۰/۳۶۴ درصد کاهش خواهد یافت. حاصل این کاهش و افزایش مقادیر، کاهش هزینه خالص به میزان ۰/۸۰۳ درصد و افزایش آن به میزان ۰/۲۱۵ درصد در روش RO به ترتیب نسبت به روش‌های MSF و MED خواهد بود.

الکتریکی DC (سالانه ۲۴۵۷۳ مگاوات‌ساعت انرژی الکتریکی) تولید خواهند نمود. هم‌چنین از ۱۴ عدد توربین بادی ۳۳۰ کیلوواتی استفاده خواهد شد که در مجموع دارای توان نامی ۴۶۲۰ کیلووات بوده و به‌طور متوسط ۷۳۸ کیلووات توان الکتریکی AC (سالانه ۶۴۶۲ مگاوات‌ساعت انرژی الکتریکی) تولید می‌نمایند. در پیکربندی مذکور، ۶ عدد دیزل ژنراتور هر یک با توان نامی ۱ مگاوات (با تولید انرژی سالانه ۳۰۲۲۹ مگاوات‌ساعت) نیز علاوه بر آرایه‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی، جهت تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز مصرف‌کنندگان و واحدهای آب‌شیرین‌کن، موردنیاز می‌باشند. سهم هر یک از منابع تولیدکننده توان در تأمین تقاضای توان الکتریکی ماهیانه مصرف‌کنندگان و واحدهای آب‌شیرین‌کن (با به‌کارگیری روش RO) در شکل ۲۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در روش RO، برخلاف روش‌های قبلی، هیچ‌گونه توان حرارتی توسط واحدهای آب‌شیرین‌کن مصرف نمی‌شود. ظرفیت نامی مبدل‌های سیستم نیز برابر با ۹ مگاوات بوده و تعداد ۱۵۰ عدد بانک باتری که هر یک شامل ۱۰ عدد باتری می‌باشند، موردنیاز می‌باشد.

جدول ۶: هزینه‌های مربوط به پیکربندی بهینه در روش RO برحسب دلار

مجموع	ارزش بازیافتی	سوخت	بهره‌برداری	جایگزینی	سرمایه‌گذاری	
۲۵۴۸۸۶۳۴	-۱۵۰۴۳۱۴	۰	۴۹۵۵	۵۳۸۷۹۹۲	۲۱۶۰۰۰۰۰	آرایه فتوولتائیک
۸۲۸۸۴۷۶	-۴۶۵۷۱۸	۰	۲۸۹۱	۱۶۶۸۰۵۷	۷۰۸۳۲۴۴	توربین بادی
۳۲۲۹۶۸۴۲	-۱۵۷۹۵	۱۹۵۱۲۸۳۴	۸۶۳۸۴۰	۱۰۱۱۴۳۶۴	۱۸۲۱۶۰۰	دیزل ژنراتور
۱۳۲۶۶۴۰	-۵۸۷۶۲	۰	۱۰۳۲۳۶	۵۰۲۱۶۵	۷۸۰۰۰۰	باتری
۴۴۱۳۷۷۴	۰	۰	۲۴۷۸	۱۸۷۹۶۳۲	۲۵۳۱۶۶۴	مبدل
۷۱۸۱۴۳۷۶	-۲۰۴۴۵۸۹	۱۹۵۱۲۸۳۴	۹۷۷۴۰۰	۱۹۵۵۲۲۰۸	۳۳۸۱۶۵۰۸	مجموع



شکل ۲۰: سهم هر یک از منابع تولیدکننده توان در تأمین تقاضای توان الکتریکی در روش RO

اولیه اجزای سیستم تجدیدپذیر ترکیبی در روش MSF دارای بیش‌ترین مقدار و در روش RO دارای کم‌ترین مقدار می‌باشد. هم‌چنین هزینه جایگزینی اجزا در روش RO دارای بیش‌ترین مقدار و در روش MED دارای کم‌ترین مقدار می‌باشد. در رابطه با هزینه بهره‌برداری و نگهداری از تجهیزات نیز بیش‌ترین و کم‌ترین هزینه‌ها به ترتیب مربوط به روش‌های MSF و MED می‌باشد. در حالت کلی هزینه خالص سیستم در روش MSF دارای بیش‌ترین مقدار می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، سرمایه‌گذاری بهینه یک سیستم تجدیدپذیر ترکیبی جدا از شبکه، جهت تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز مشترکین و هم‌چنین انرژی الکتریکی و حرارتی موردنیاز واحدهای آب‌شیرین‌کن جهت تأمین آب شیرین مصرفی در جزیره ابوموسی مورد مطالعه قرار گرفت. با استناد به نتایج شبیه‌سازی برای هر یک از روش‌های MSF، MED و RO، می‌توان این‌گونه استنباط نمود که هزینه سرمایه‌گذاری

[۱۲] حسین شکری و سجاد نجفی، "حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۵۴، شماره ۱، ۱۳۹۴.

- [13] A. Keyhani, M. Marwali, M. Dai, *Integration Of Green And Renewable Energy In Electric Power Systems*, John Wiley and Sons, 2009.
- [14] B. Bagen, B.R. Billinton, "Evaluation of Different Operating Strategies in Small Stand-alone Power Systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 3, pp. 654-660, 2005.
- [15] M.H. Nehrir, B.J. Lamerer, G. Venkataramanan, V. Gerez, L.A. Alvarado, "An Approach to Evaluate the General Performance of Stand-alone Wind/Photovoltaic Generating Systems", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 15, No. 4, pp. 433-439, 2002.
- [16] A. Sheikhi, A. M. Ranjbar, and F. Safe, "A novel method to determine the best size of CHP for an energy hub system", *2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, 2011.
- [17] A. Sheikhi, B. Mozafari, and A. M. Ranjbar, "CHP optimized selection methodology for a multi-carrier energy system", *IEEE Trondheim Power Tech*, 2011.
- [18] T. Lambert, P. Gilman, and P. Lilienthal, *Micropower System Modeling with Homer*, National Renewable Energy Laboratory, 2006

[۱۹] سعید صبوری، رسول کاظم‌زاده و هدایت صبوری، "ارزیابی

میزان ریسک‌پذیری بهره‌بردار ناشی از عدم قطعیت منابع بادی در مسئله درمدارقرارگرفتن واحدهای حرارتی با استفاده از شاخص ارزش در خطر شرطی"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۲، ۱۳۹۵.

- [20] NASA's Surface Solar Energy Data Set: www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/ 2017-03-04.
- [21] The World Radiation Data Center: www.wrdc-mgo.nrel.gov/2017-03-04.
- [22] Hormozgan Province Meteorology organization: www.hormozganmet.ir/2017-03-09.
- [23] Enercon Wind Turbine Manufacturer: www.enercon.de/2017-03-4.
- [24] Hormozgan Electric Distribution Company: www.hedc.co.ir/2017-03-10.
- [25] NREL (National Renewable Energy Laboratory), *Distributed Generation Renewable Energy Estimate of Costs*, 2016.
- [26] IRENA (International Renewable Energy Agency), *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Volume 1: Power Sector, Issue 4/5: Solar Photovoltaics*, 2012.
- [27] IRENA (International Renewable Energy Agency), *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Volume 1: Power Sector, Issue 5/5: Wind Power*, 2012.
- [28] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, A. S. N. Huda, K. Sanusi, "Techno-economic analysis of hybrid PV-diesel-battery and PV-wind-diesel-battery power systems for mobile BTS: the way forward for rural development", *Energy Science and Engineering Journal*, Vol. 3, No. 4, pp. 271-285, 2015.
- [29] Surette Battery Company: www.rollsbattery.com/2017-04-02.
- [30] Fuel Price Trends In 100 Countries: www.GlobalPetrolPrices.com/2017-04-02.

این هزینه در روش RO نسبت به روش MSF به میزان ۰/۸۰۳ درصد کاهش می‌یابد. سرانجام هزینه خالص سیستم در روش MED با ۰/۲۱۵ درصد کاهش در مقایسه با روش RO دارای کم‌ترین مقدار می‌باشد. به‌دیگرسخن، اگرچه میانگین مصرف انرژی موردنیاز جهت تولید آب شیرین در روش RO نسبت به دو روش دیگر کمتر است، اما هزینه خالص سیستم در روش MED از دو روش دیگر کمتر می‌باشد. دلیل این موضوع تأمین بخشی از انرژی حرارتی موردنیاز در روش MED توسط دیزل ژنراتورها در قالب سیستم تولید مشترک برق و حرارت می‌باشد. از دیگر سو باید توجه نمود که روش RO در مقایسه با روش‌های دیگر، به کیفیت و تغییرات آب ورودی حساس‌تر است. در نتیجه، با توجه به خصوصیات خاص آب خلیج‌فارس به‌عنوان مثال شوری و دمای بالا و همچنین تغییرات ناخواسته این پارامترها، استفاده از روش‌های MSF و MED جهت شیرین‌سازی آب در مناطق حاشیه‌ای و جزیره‌ای خلیج‌فارس از جمله جزیره ابوموسی قابل‌اطمینان‌تر است.

مراجع

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Energy In The Water, Energy & Food Nexus*, 2015.
- [2] IEA-ETSAP and IRENA, *Water Desalination Using Renewable Energy, Technology Policy Brief I12*, 2013.
- [3] E. M. Mokheimer, A. Z. Sahin, A. Al-Sharafi, A. I. Ali, "Modeling and optimization of hybrid wind-solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi Arabia", *Energy Conversion and Management*, Vol. 75, pp. 86-97, 2013.
- [4] M. Al-Nory, M. El-Beltagy, "An energy management approach for renewable energy integration with power generation and water desalination", *Renewable Energy*, Vol. 72, pp. 377-385, 2014.
- [5] V. G. Gude, "Energy storage for desalination processes powered by renewable energy and waste heat sources", *Applied Energy*, Vol. 137, pp. 877-898, 2015.
- [6] E. U. Khan, A. R. Martin, "Optimization of hybrid renewable energy polygeneration system with membrane distillation for rural households in Bangladesh", *Energy*, Vol. 93, pp. 1116-1127, 2015.
- [۷] امیر گندمکار، "ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران"، *مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، سال ۲۰، شماره پیاپی ۳۶، شماره ۴، ۱۳۸۸.
- [۸] رستم صابری‌فر، "پتانسیل بهره‌مندی از انرژی خورشیدی در خراسان جنوبی"، *مجله اقتصاد انرژی*، شماره ۱۳۲-۱۳۱، ۱۳۸۹.
- [9] A. A. Al-Karaghoul and L. L. Kazmerski, *Desalination, Trends and Technologies: Renewable Energy Opportunities in Water Desalination*, National Renewable Energy Laboratory, 2008.
- [10] A. Kalogirou, "Seawater desalination using renewable energy sources", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, pp. 242-281, 2005.
- [11] The World Bank, *MENA Development Report: Renewable Energy Desalination*, 2012.

زیرنویس‌ها

-
- ¹ Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources
 - ² Reverse Osmosis
 - ³ Electro Dialysis
 - ⁴ Multi Stage Flash
 - ⁵ Multi Effect Distillation
 - ⁶ Osmotic Pressure
 - ⁷ Off Grid
 - ⁸ Boiler
 - ⁹ Cogeneration or Combined Heat and Power
 - ¹⁰ Net Present Cost
 - ¹¹ Salvage Value
 - ¹² Capital Recovery Factor
 - ¹³ Total Annualized Cost
 - ¹⁴ Sinking Fund Factor
 - ¹⁵ Maximum annual capacity shortage
 - ¹⁶ Capital Cost
 - ¹⁷ Replacement Cost
 - ¹⁸ Operation and Maintenance Cost
 - ¹⁹ Fuel Cost