

طراحی بهینه و اجرای سیستم تأمین انرژی پایگاه مرزی با در نظر گرفتن عدم قطعیت

رضا غفاریپور^{۱*}، سعید زمانیان^۲، عباس خان احمدی^۳، میرجلال وحید پاکدل^۴

۱- استادیار، ۲ و ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، ۴- کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۷/۰۳/۱۲، پذیرش: ۹۷/۰۹/۱۱)

چکیده

در این مقاله طراحی بهینه و اجرای عملی یک سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی در یک پایگاه نمونه با در نظر گرفتن عدم قطعیت شرایط آب و هوایی ارائه شده است. پایگاه مورد مطالعه پایگاه تتهور ۱ در استان کرمانشاه است. استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر برای مناطق دور از شبکه سراسری جهت حل مشکل تأمین انرژی پیشنهادی مناسب و عملیاتی است. در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید انرژی این سیستم‌ها در مطالعات، باعث جامع‌تر شدن و کاربردی‌تر شدن نتایج خروجی خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی و اجرای عملی نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر باعث کاهش هزینه‌های تأمین انرژی پایگاه به صورت چشمگیری خواهد شد. در مطالعه موردی پایگاه تتهور ۱، می‌توان با استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، علاوه بر رفع کامل مشکل قطعی بار، میزان مصرف سوخت گازوئیل را ۸۷ درصد و میزان کل هزینه را در دوره ۵ ساله بهینه‌سازی به میزان ۸۱ درصد کاهش داد.

کلیدواژه‌ها: سیستم انرژی تجدیدپذیر، عدم قطعیت، پایگاه مرزی

Optimal Planning and Implementation of Remote Areas Energy Provision's System Considering Uncertainty

R. Ghaffarpour^{*}, S. Zamanian, A. Khanahmadi, M. J. Vahid Pakdel

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 02/06/2018; Accepted: 02/12/2018)

Abstract

In this paper, the optimal planning of renewable energy systems including the wind turbine photovoltaic solar panels and energy storage systems has been done for a sample garrison considering the weather condition's uncertainty. The target case study is Tatavar1 garrison which has been located in Kermanshah province of Iran. Utilizing renewable based energy system for providing the energy demand of areas which are far from main grid is a suitable and practical suggestion. Consideration of uncertainty of energy production of these systems during the optimization studies affords more comprehensive and more practical results. The simulation results show that the using of renewable based energy systems caused considerable reduction of energy cost. Simulation results indicate that for case study of Tatavar 1, using the renewable energy system decrease the consumption of gasoil fuel about 87% and total cost up to 81% during the 5 years of optimization period, beside the eliminating the whole of load shedding hours.

Keywords: Optimal Planning, Renewable Energy Systems, Uncertainty, Border Garrison

*Corresponding Author E-mail: Rghaffarpour@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

صورت پذیرفته است. بررسی جامع و کاملی در مورد روش‌ها و روش‌های به‌کاررفته در منابع علمی جهت طراحی سیستم‌های انرژی مناطق جزیره‌ای غیر متصل به شبکه صورت گرفته است [۷]. گزارش مذکور در مطالعه خود منابع انرژی تجدیدپذیر را نیز مورد توجه قرار داده است.

مزیت دیگری که طراحی شبکه (چه شبکه سراسری و چه واحدهای خرد همچون پایگاه‌ها) بر پایه منابع انرژی تجدیدپذیر خواهد داشت، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش وابستگی و به‌عبارت دیگر تضمین پایداری تأمین انرژی خواهد بود. بر این اساس، در گزارش دیگری [۸]، نقش حضور منابع انرژی تجدیدپذیر از دیدگاه پدافند غیرعامل و تأثیرات زیست‌محیطی بر جامعه مطالعه‌شده و با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی، استراتژی بهینه تعیین شده است. در این راستا، طی گزارش دیگری [۹] نیز روش تأمین انرژی مناطق حساس با ایجاد ریزشبکه‌های مبتنی بر اینورتر بررسی شده است. در این گزارش با طراحی‌های الکترونیک قدرتی، نحوه عملکرد چند ریزشبکه باهم در زمان خاموشی و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع تولید پراکنده بررسی شده است.

با عنایت به تمامی منافع که جهت استفاده از منابع تجدیدپذیر ذکر شد، اما عدم قطعیت میزان تولید توان این منابع که ناشی از عدم قطعیت شرایط آب و هوایی است، یکی از چالش‌برانگیزترین موضوعات مطرح در استفاده از این منابع است. تصادفی بودن خروجی این منابع در صورت عدم لحاظ کردن محاسبات و بررسی‌ها، می‌تواند باعث بروز مشکلات بسیاری در مطالعات طراحی و بهره‌برداری گردد. عدم دخالت دادن خطاهای عدم قطعیت سیستم که اهم آن شامل تولید منابع تجدیدپذیر خواهد بود می‌تواند در بحث‌های طراحی به یک طراحی کاملاً غیربهینه بینجامد که موجب تلف و هدررفت سرمایه‌ها خواهد شد. بنابراین، در کنار انجام کارهای تحقیقاتی برای طراحی بهینه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر جهت تأمین انرژی موردنیاز، بر روی روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت در این مطالعات نیز، تلاش‌های فراوانی صورت پذیرفته است. در این راستا گزارش [۱۰] به برنامه‌ریزی منابع انرژی تجدیدپذیر با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید این منابع پرداخته است. روش احتمالاتی مورد استفاده در گزارش بر پایه تولید سناریو بوده و مسئله بهینه‌سازی مطرح‌شده توسط الگوریتم هوشمند حل شده است.

طراحی سیستم توزیع ترکیب‌شده با منابع تجدیدپذیر جهت کاهش میزان کربن خروجی سیستم (پارامتر زیست‌محیطی) و هزینه سیستم نیز صورت پذیرفته است [۱۱]. گزارش مذکور نیز برای مطالعات احتمالی خود از روش سناریو استفاده نموده است.

مسئله تأمین انرژی پایگاه‌های مرزی به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی مطرح است. دلیل این چالش قرار گرفتن این پایگاه‌ها در نقاط صعب‌العبور جغرافیایی و دور بودن از شبکه‌های سراسری حامل‌های انرژی همچون برق و گاز طبیعی است. از سوی دیگر نقش کلیدی این پایگاه‌ها در حفظ و حراست از امنیت کشور اهمیت تأمین انرژی پایدار آن‌ها را چندین برابر می‌کند.

سیستم‌های مرسوم برای تأمین انرژی این پایگاه‌ها، استفاده از ژنراتورهای دیزلی با استفاده از سوخت سهمیه‌ای است که توسط دولت در اختیار آن‌ها قرار می‌گیرد. با توجه به محدودیت سوخت در نظر گرفته شده، هر پایگاه صرفاً میزان ساعات محدودی از انرژی الکتریکی بهره می‌برد و مدت زمان خاموشی در این مراکز کاملاً قابل توجه است. از سوی دیگر، با توجه به پایین بودن بازده سیستم‌های دیزلی، سوخت و هزینه، به‌جای تبدیل به انرژی الکتریکی جهت استفاده در این مراکز حساس، تلف گشته و از بین می‌رود.

گزینه‌ای که برای تأمین انرژی این واحدهای نظامی مورد پیشنهاد قرار می‌گیرد، استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر خواهد بود. با توجه به فراگیر شدن استفاده از فناوری‌های منابع انرژی تجدیدپذیر، استفاده از این سیستم‌ها برای تأمین انرژی نقاط دورافتاده کاملاً از لحاظ اقتصادی قابل بررسی است. بررسی نحوه طراحی بهینه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر با عنایت به مفید بودن این منابع، به‌صورت کاملاً جدی مورد توجه محققان بوده است. نحوه طراحی بهینه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیب‌شده با سیستم‌های سنتی و ذخیره‌ساز توسط برنامه HOMER مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. طراحی بهینه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر با در نظر گرفتن انواع متفاوت آن اعم از سیستم بادی، فتوولتائیک و سایزبایی ذخیره‌ساز لازم، انجام شده است [۲] و به‌منظور بهینه‌سازی احتمالاتی از روش simulation optimization استفاده شده است.

سایزبایی بهینه برای سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه با در نظر گرفتن پارامترهای فنی و زیست‌محیطی کاری نیز صورت پذیرفته است [۳]. بررسی نحوه طراحی بهینه سیستم‌های منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای فنی و اقتصادی مورد مطالعه قرار گرفته است [۴-۵]. در یکی از گزارش‌ها [۶]، سیستم مورد مطالعه، یک واحد خانگی انتخاب شده و طراحی بهینه سیستم منابع تجدیدپذیر در سطح این واحد خانگی انجام شده است. این گزارش با هدف تأمین صددرصد انرژی با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، با هدف کمینه کردن میزان هزینه تأمین انرژی و تأمین قید قابلیت اطمینان

- (۱) افزایش سطح امنیت پایگاه‌ها در پی حذف استفاده از دیزل ژنراتور
- (۲) افزایش سطح رفاه و آسایش و بالا رفتن سطح آمادگی رزمی
- (۳) حفظ استقلال پایگاه نسبت به عقبه لجستیکی برای تأمین انرژی
- (۴) افزایش سطح هوشیاری و آمادگی رزمی پایگاه در شب به دلیل وجود برق ۲۴ ساعته
- (۵) افزایش تاب‌آوری و قابلیت اطمینان سیستم تأمین انرژی پایگاه
- (۶) افزایش آمادگی دفاعی و توان رزمی واحدها
- (۷) بهبود سیستم روشنایی پایگاه

۳. فرمولاسیون ریاضی مسئله

مسئله طراحی مورد بحث در بخش پیشین، به صورت یک مسئله بهینه‌سازی قابل فرمول‌بندی است. در ادامه به شرح این فرمول‌بندی خواهیم پرداخت.

۳-۱. تابع هدف

تابع هدف مسئله بهینه‌سازی حاضر کمینه کردن میزان هزینه سرمایه‌گذاری جهت احداث منابع تأمین انرژی جدید (از نوع تجدیدپذیر) در کنار هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه خاموشی پایگاه خواهد بود. علاوه بر این موارد، کمینه کردن میزان انرژی تجدیدپذیر قطع شده برای تأمین تعادل توان به جهت اینکه به عنوان هدر رفت سرمایه محسوب می‌شود، در تابع هدف منظور شده است. با عنایت به مدل‌سازی احتمالاتی مسئله، تابع هدف به صورت معادله (۱) خواهد بود:

$$\text{Min} \left\{ \begin{array}{l} C_w N_w + \\ C_{so} N_{so} + \\ C_{st} N_{st} + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{h=1}^{24} \rho(s) Cost_e(t.s.h) + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{h=1}^{24} \rho(s) Cost_{sh}(t.s.h) + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{h=1}^{24} \rho(s) Cost_{cu}(t.s.h) \end{array} \right. \quad (1)$$

$$Cost_e(t.s.h) = C_f \times L_f(t.s.h) \quad (2)$$

$$Cost_{sh}(t.s.h) = C_{sh} \times P_{sh}(t.s.h) \quad (3)$$

$$Cost_{cu}(t.s.h) = C_{cu} \times P_{cu}(t.s.h) \quad (4)$$

در تابع هدف فوق، بخش اول مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری منابع انرژی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و ذخیره‌ساز - که عضوی مهم در طراحی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر است - آمده است. توجه شود که در این مسئله طراحی، نوع پنل‌ها و توربین و

مدل‌سازی احتمالاتی منابع فتوولتائیک و توربین‌های بادی در شبکه توزیع با استفاده روش احتمالاتی تخمین دونقطه‌ای غیرمتمقارن در گزارش [۱۲] انجام شده است. گزارش [۱۳] نیز با لحاظ عدم قطعیت منابع تولید پراکنده به طراحی بهینه منابع تولید پراکنده در سایت‌های دفاعی با رویکرد پدافند غیرعامل مبادرت ورزیده است. این گزارش با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری و روش احتمالاتی بر مبنای سناریو، اقدام به افزایش امنیت تأمین انرژی سایت‌های دفاعی پرداخته است.

آنچه در این مطالعه به آن پرداخته خواهد شد، طراحی بهینه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر برای یک پایگاه مرزی نمونه با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از شرایط آب و هوایی است. پایگاه مرزی مورد مطالعه، پایگاه تنه‌ور ۱ واقع در منطقه کرمانشاه است که اطلاعات واقعی ثبت‌شده توسط بررسی‌های میدانی در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرند. جهت انجام این طراحی بهینه، ابتدا شرایط مورد بررسی قرار گرفته است تا تعداد نمونه کافی از آن‌ها استخراج و در طراحی مورد بهره‌برداری قرار گیرد. سپس فناوری‌های قابل استفاده در این منطقه بررسی شده و مدل‌سازی ریاضی و فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی احتمالاتی در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS صورت پذیرفته است. جهت مطالعات احتمالاتی منابع عدم قطعیت شرایط آب و هوایی نیز از روش مدل‌سازی اتفاقی (Stochastic) روشی بر مبنای ایجاد سناریو است، استفاده شده است.

۲. مزایای دفاعی سیستم‌های انرژی نو

امروزه یکی از دغدغه‌های مهم نیروی دفاعی کشور، حفظ امنیت مرزهای کشور و مقابله با گروهک‌های تروریستی است. از این رو پایگاه‌های بادی در سراسر مرزها احداث شده‌اند که وظیفه حراست از مرزها را بر عهده دارند. همان‌گونه که ذکر شد یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که این پایگاه‌ها با آن مواجه هستند مشکلات مرتبط با تأمین انرژی برق است. در بحث تأمین برق این پایگاه‌ها از طریق دیزل ژنراتور مهم‌ترین مشکل تأمین سوخت است.

از دیدگاه پدافند غیرعامل لازم است طرحی ارائه گردد تا به وسیله آن، نیازمندی‌های این پایگاه‌ها به حداقل برسد و سطح آمادگی دفاعی و توان رزمی واحدهای عملیاتی موجود در آن مناطق افزایش یابد. یکی از این طرح‌ها، تجهیز پایگاه‌های مرزی با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است که در نتیجه آن، توان رزمی و عملیاتی از چندین جنبه در منطقه افزایش می‌یابد که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است:

۳-۳. قیود ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی

جهت مدل‌سازی ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی، یا همان مجموعه باتری‌ها از معادلات زیر استفاده خواهد شد. قیود (۶) و (۷) و (۸) جهت جلوگیری از به وجود آمدن حالت هم‌زمان شارژ و دشارژ در بهینه‌سازی اضافه شده است. معادله (۹) برای تضمین رعایت ماکزیمم انرژی قابل ذخیره در مجموعه باتری‌ها نوشته شده است و درنهایت، معادله (۱۰) قانون بقای انرژی را برای ذخیره‌سازی انرژی فراهم می‌آورد.

$$0 \leq P_{ch}(t, s, h) \leq N_{st}MI_{ch}(t, s, h) \quad (6)$$

$$0 \leq P_{dis}(t, s, h) \leq N_{st}MI_{dis}(t, s, h) \quad (7)$$

$$I_{ch}(t, s, h) + I_{dis}(t, s, h) \leq 1 \quad (8)$$

$$LV_{st}(t, s, h) \leq N_{st}LV_{st}^{max} \quad (9)$$

$$LV_{st}(t, s, h) = LV_{st}(t, s, h - 1) + P_{ch}(t, s, h)\eta_{ch} + \frac{P_{dis}(t, s, h)}{\eta_{dis}} \quad (10)$$

۳-۴. قید محدودیت مکان

در پایگاه‌های نظامی جهت نصب منابع انرژی تجدیدپذیر، محدودیت‌هایی وجود دارد که در سایر مناطق عادی مطرح نیست. یکی از این محدودیت‌ها، الزام حضور تمامی ادوات مربوط به پایگاه در محدوده پایگاه و در داخل منطقه فنرکشی شده است. این امر که به جهت الزامات امنیتی صورت می‌پذیرد باعث محدود شدن امکان نصب پنل‌ها که از لحاظ فیزیکی کاملاً جاگیر هستند خواهد شد. رابطه (۱۱) جهت اعمال این محدودیت، به مسئله بهینه‌سازی اضافه شده است.

$$N_{so} \leq N_{so}^{max} \quad (11)$$

۳-۵. قید محدودیت سوخت و توان دیزل ژنراتور

یکی دیگر از محدودیت‌های تأمین انرژی پایگاه‌های نظامی، میزان سوخت موجود برای دیزل ژنراتور است. این سوخت گاهی به صورت ماهیانه و گاهی به صورت فصلی به پایگاه تعلق می‌گیرد. در این مقاله، جیره‌بندی سوخت پایگاه به صورت روزانه مدل می‌شود. دلیل این امر رعایت و کنترل مصرف روزانه جهت افزایش قابلیت اطمینان ذخیره سوخت است. رابطه (۱۲) نشانگر محدودیت میزان سوخت مصرفی روزانه پایگاه جهت روشن کردن دیزل ژنراتور خواهد بود. رابطه (۱۳) نیز بیانگر نحوه تبدیل سوخت به توان الکتریکی در دیزل ژنراتور است. رابطه (۱۴) نیز محدودیت توان تولیدی ژنراتور را نشان می‌دهد.

ذخیره‌ساز معلوم فرض گشته و مسئله بهینه‌سازی صرفاً جهت تعیین تعداد بهینه این ادوات مورد حل قرار می‌گیرد. بنابراین هزینه هر واحد از این منابع در تعداد ضرب شده و به عنوان هزینه سرمایه‌گذاری منظور گشته است. بخش دوم در تابع هدف، نشانگر هزینه تأمین انرژی درخواستی پایگاه در صورت استفاده از روند معمول است. هزینه تأمین انرژی پایگاه همان‌گونه که در معادله (۲) نشان داده شده است شامل هزینه سوخت گازوییل دیزل ژنراتورها است. قسمت سوم تابع هدف نیز جهت لحاظ کردن هزینه خاموشی و خسارتی که در زمان خاموشی بر پایگاه وارد می‌شود، نشان داده شده است. قسمت آخر تابع هدف نشانگر میزان سودی است که در صورت قطع تولید منابع تجدیدپذیر از آن استفاده خواهیم کرد و هدف در کمینه کردن آن داریم.

قابل به ذکر است که به دلیل ماهیت مسئله بهینه‌سازی که یک مسئله طراحی با در نظر گرفتن منابع عدم قطعیت است، هزینه تأمین انرژی الکتریکی و میزان هزینه تحمیلی به پایگاه به جهت خاموشی، تابعی از سناریو و بازه بهینه‌سازی خواهند بود. مدل‌سازی احتمالاتی صورت پذیرفته در این مسئله یک مدل‌سازی اتفاقی دوسطحی است که تعداد توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی به عنوان متغیرهای سطح اول (Here and now) و متغیرهای مربوط به مدیریت انرژی نیروگاه در سطح دوم (Wait and see) قرار دارند. در ادامه به بحث در مورد تک‌تک قیود بهینه‌سازی حاضر خواهیم پرداخت.

۳-۲. قید تعادل توان

قید تعادل توان را می‌توان جزء مهم‌ترین قیود مسائل بهینه‌سازی حوزه مدیریت انرژی مطرح نمود. این قید تساوی که بیانگر برابری توان تولیدشده و مصرف‌شده در هر لحظه است، جهت حفظ فرکانس سیستم و پایداری مورد لحاظ قرار می‌گیرد. رابطه (۵) بیانگر قید حفظ تعادل توان در هر ساعت طی هر بازه زمانی بهینه‌سازی است:

$$N_{so}P_{so}(t, s, h) + N_wP_w(t, s, h) + P_{DSL}(t, s, h) = \sum_{i=1}^D P_i^{Load}(t, h) - P_{sh}(t, s, h) + P_{cu}(t, s, h) + P_{ch}(t, s, h) - P_{dis}(t, s, h) \quad \forall t, s, h \quad (5)$$

همان‌گونه که در رابطه نشان داده شده است مجموع میزان تولید منابع اعم از تجدیدپذیر و دیزلی باید با میزان بار سیستم برابر باشد. جهت کنترل کردن این تعادل، علاوه بر حضور ذخیره‌ساز که با شارژ و دشارژ به عنوان یک درجه آزادی به شمار می‌آید، دو متغیر قطع بار و قطع تولید تجدیدپذیر لحاظ شده‌اند.

هزینه‌ها ضرب می‌گردد. جدول (۲) نیز میزان کل بار پایگاه طی ساعات مختلف را در ۴ روز نمونه از ۴ فصل نشان می‌دهد. جدول (۳)، تمامی اطلاعات شبیه‌سازی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است را به نمایش گذاشته است.

جدول ۱. لیست تجهیزات مصرف‌کننده انرژی پایگاه

عنوان تجهیز	میزان مصرف (کیلووات)
یخچال خانگی	۰/۱-۰/۰۵
یخچال صنعتی	۰/۲-۰/۰۵
لامپ‌های کم‌مصرف	۰/۱۲-۰/۰۷
جارو برقی	۱/۲
هواکش	۰/۰۳۵
آبگرم کن	۲
پمپ آب	۰/۶
پروژکتور	۰/۸
کفکش	۰/۱
تلویزیون	۰/۲
نانوایی	۰/۳

جدول ۲. بار پایگاه طول فصل‌های مختلف (کیلووات)

	زمستان	پاییز	تابستان	بهار	زمستان	پاییز	تابستان	بهار
۱	۲/۳۰۵	۲/۱۰۵	۲/۴۰۵	۱۳	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲
۲	۲/۳۰۵	۲/۱۰۵	۲/۴۰۵	۱۴	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲
۳	۲/۳۲۷	۲/۳۲۷	۲/۳۲۷	۱۵	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲
۴	۲/۶۷	۲/۹۷	۲/۶۷	۱۶	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲
۵	۰/۱۷	۱/۳۷	۰/۱۷	۱۷	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲
۶	۰/۱۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۱۸	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲
۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۱۹	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲
۸	۱/۴۷	۱/۴۷	۱/۴۷	۲۰	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲
۹	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۲۱	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲
۱۰	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۲۲	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲
۱۱	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۲۳	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲
۱۲	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۲۴	۰/۹۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲

جهت تأمین اطلاعات موردنیاز مدل‌سازی احتمالاتی، تولید سناریو صورت پذیرفته است. تولید سناریو در این مقاله به روش مونت کارلو و به تعداد ۱۰ سناریو برای هر ساعت از هر پارامتر دارای عدم قطعیت انجام شده است. در این روش، احتمال سناریوها برابر در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله به دلیل بررسی ۴ فصل مختلف تولید سناریو برای هر ۴ روز به نمایندگی از فصول به صورت مجزا صورت پذیرفته است. منابع دارای عدم قطعیت، شرایط آب و هوایی شامل سرعت باد، دمای هوا و میزان تابش خورشید در نظر گرفته شده است. تولید سناریو برای سرعت باد با استفاده از تابع توزیع احتمالاتی ویبال صورت گرفته است. در تابع ویبال، پارامتر مقیاس برابر ۸/۷۸ و پارامتر شکل برابر ۱/۷۵ در نظر گرفته شده است. تولید سناریو دمای هوا با

$$\sum_{h=1}^{24} L_f(t.s.h) \leq L_f^{max} \quad (12)$$

$$P_{DSL}(t.s.h) = \beta L_f(t.s.h) \eta_{diesel} \quad (13)$$

$$P_{DSL}(t.s.h) \leq P_{DSL}^{max} \quad (14)$$

۳-۶. رابطه تولید توان توربین بادی

توان تولیدشده توسط توربین بادی کاملاً به سرعت باد وابسته است. رابطه‌ای که بتوان با استفاده از آن میزان توان تولیدی توربین را با توجه به سرعت باد استخراج نمود در پایین آمده است [۱۴]:

$$P_w(v(t.s.h)) = \quad (15)$$

$$\begin{cases} 0 & v(t.s.h) \leq v^{in} \\ P_w^r \frac{v(t.s.h) - v^{in}}{v^r - v^{in}} & v^{in} \leq v(t.s.h) \leq v^r \\ P_w^r & v^r \leq v(t.s.h) \leq v^{out} \\ 0 & v(t.s.h) \geq v^{out} \end{cases}$$

۳-۷. رابطه تولید توان پنل‌های خورشیدی

توان تولیدی توسط هر پنل خورشیدی را می‌توان با استفاده از روابط زیر استخراج نمود [۱۲]:

$$P_{so}(r(t.s.h)) = FF \times V(r) \times I(r) \quad (16)$$

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (17)$$

$$V(r) = V_{OC} - k_v T_c(r) \quad (18)$$

$$I(r) = r \times [I_{SC} + k_i (T_c(r) - 25)] \quad (19)$$

$$T_c(r) = T_A + r \times \frac{T_{OT} - 20}{0.8} \quad (20)$$

۴. آزمون سیستم مورد مطالعه

همان‌گونه که پیش‌تر نیز ذکر شد در این مقاله از اطلاعات واقعی و اندازه‌گیری شده پایگاه مرزی تته‌ورا ۱ استفاده شده است. طبق بررسی‌های میدانی صورت گرفته، لیست تجهیزات مصرف‌کننده پایگاه نیز مطابق جدول (۱) است.

نحوه طراحی بهینه در این مقاله بدین صورت بوده است که طراحی برای مدت ۵ سال صورت پذیرفته است. ولی با توجه به الگوی مصرف بار تقریباً ثابت پایگاه، صرفاً بهینه‌سازی با استفاده از اطلاعات مصرف بار ۴ روز از ۴ فصل یک سال صورت می‌پذیرد و سپس تعداد روزهای هر فصل در مدت ۵ سال، در میزان

این اعداد هزینه‌های بخش‌ها برای مدت ۵ سال طول دوره طراحی هستند. نتایج شبیه‌سازی کاملاً مؤید این قضیه است که نصب سیستم تجدیدپذیر به صورت کاملاً چشمگیری هزینه تأمین انرژی پایگاه را کاهش می‌دهد.

سرمایه‌گذاری صورت پذیرفته برای پایگاه کاملاً اقتصادی خواهد بود و از قطع بار به صورت کامل جلوگیری خواهد نمود. همان‌گونه که در جدول نشان داده شده است با نصب تعداد بهینه ۱ توربین بادی، ۵ عدد پنل خورشیدی و ۵ ذخیره‌سازی انرژی (باتری) که مشخصات آن‌ها در جدول پارامترها آمده است، می‌توان هزینه تأمین انرژی پایگاه را در مدت ۵ سال به میزان ۸۱ درصد کاهش داد. مزیت دیگر این امر کاهش ۸۷ درصدی مصرف گازوئیل خواهد بود. این کاهش مصرف کاملاً پایگاه را در برابر مشکلات انتقال سوخت و جیره‌بندی روزانه، مقاوم و مصون می‌سازد.

جدول ۴. نتایج اقتصادی شبیه‌سازی

عنوان	واحد	حالت ۱ (عادی کنونی)	حالت ۲ (با تجدیدپذیر)
هزینه سوخت	میلیون ریال	۱۳۵۲/۱۰۶	۱۶۷/۹۰۶
هزینه قطع بار	میلیون ریال	۱۷۹۴/۶۳۸	۰
هزینه قطع تجدیدپذیر	میلیون ریال	۰	۱۴/۸۹۱
تعداد بهینه توربین	عدد	۰	۱
تعداد بهینه پنل	عدد	۰	۵
تعداد بهینه ذخیره‌ساز	عدد	۰	۵
هزینه سیستم تجدیدپذیر	میلیون ریال	۰	۳۹۵/۵۴۵
هزینه کل	میلیون ریال	۳۱۴۶/۷۴۴	۵۷۸/۳۴۲

استفاده از سیستم انرژی تجدیدپذیر تأثیر بسیار قابل توجهی در میزان قطع بار پایگاه داشته است. نحوه قطع بار بهینه پایگاه در حالت عادی تأمین انرژی دیزلی در شکل (۱) برای ۴ فصل متفاوت (۴ روز انتخاب شده) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشهود است وجود قطع بار در بسیاری از ساعات بی‌انگیز محدودیت وجود دسترسی به انرژی الکتریکی به دلیل محدودیت سوخت است. علاوه بر آن وجود پیک‌هایی در قطع بار بهار و تابستان حاکی از وضعیت نامناسب‌تر تأمین انرژی در این فصل‌ها دارد. قابل ذکر است نمودار نشان داده شده میانگین قطع بار سناریوهای مختلف است. علاوه بر آن، همان‌گونه که در جدول اقتصادی نیز مورد بحث قرار گرفت میزان قطع بار در زمان حضور منابع تجدیدپذیر صفر است. میزان مصرف سوخت دیزل ژنراتور که خود به‌عنوان یکی از دغدغه‌های پایگان مورد بحث بود، کاهش می‌یابد. شکل (۲) میزان میانگین مصرفی سوخت سناریوهای مختلف را به ازای هر دو حالت مورد مطالعه و در طی

استفاده از تابع توزیع احتمالاتی نرمال انجام شده است. در این تابع میانگین برای فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب برابر ۲۰، ۲۵، ۱۵ و درجه سانتی‌گراد و انحراف معیار برابر ۲ درجه در نظر گرفته شده است. جهت تولید سناریو تابش خورشید نیز از تابع توزیع احتمالاتی بتا با پارامترها $A=6/38$ و $B=3/43$ استفاده شده است.

جدول ۳. لیست پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار	واحد
C_w	۱۰۵	میلیون ریال بر واحد
C_{so}	۱۱/۱	میلیون ریال بر واحد
C_{st}	۲۵/۲	میلیون ریال بر واحد
C_f	۲۴۶۹۶	ریال بر لیتر
C_{sh}	۶۳۰۰۰	ریال بر کیلووات ساعت
C_{cu}	۶۳۰۰	ریال بر کیلووات ساعت
LV_{st}^{max}	۱/۲	کیلووات ساعت
η_{ch}	۰/۹۸	-
η_{dis}	۰/۹۸	-
N_{so}^{max}	۵	پنل
L_f^{max}	۳۰	لیتر
η_{diset}	۰/۰۵	-
β	۱۰/۷۳	کیلووات بر لیتر
P_{DSL}^{max}	۱۰	کیلووات آمپر
P_w^r	۰/۸	کیلووات
v^r	۱۲	متر بر ثانیه
v^{in}	۲	متر بر ثانیه
v^{out}	۲۰	متر بر ثانیه
V_{MPP}	۳۳/۸	ولت
I_{MPP}	۶/۷۲	آمپر
V_{OC}	۴۲/۴	ولت
I_{SC}	۷/۳	آمپر
k_v	۰/۱۳۶	ولت
k_i	۰/۰۰۴	آمپر
T_{OT}	۴۵	درجه سانتی‌گراد

۵. نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی در این مقاله، در دو حالت مورد ارائه واقع شده است و بحث‌های فنی و اقتصادی صورت گرفته برای این دو حالت مورد بررسی قرار گرفته است.

(۱) عملکرد عادی کنونی

(۲) عملکرد اصلاح‌شده با سیستم انرژی‌های تجدیدپذیر

ارائه نتایج شبیه‌سازی را از بحث اقتصادی طراحی صورت گرفته آغاز می‌نماییم. همان‌گونه که قابل مشاهده است جدول (۴)، هزینه‌ی بخش‌های مختلف تابع هدف را برای دو حالت مورد بحث نشان می‌دهد. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد،

۶. پیاده‌سازی عملی سیستم

منافع بسیار مورد بحث در بخش‌های پیشین در مورد استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر جهت تأمین انرژی پایگاه‌های واقع شده در مناطق صعب‌العبور باعث توجیه اقتصادی پروژه مجهز نمودن پایگاه تته‌ورا ۱ به منابع انرژی تجدیدپذیر شده است. در این پایگاه به پیاده‌سازی عملی طرح اقدام گشته و از توربین بادی و پنل‌های خورشیدی جهت تأمین انرژی مصرفی پایگاه و از ذخیره‌ساز انرژی جهت پایدارسازی عملکرد استفاده شده است. شکل (۳) تصاویر سیستم‌های پیاده‌سازی شده در پایگاه است.

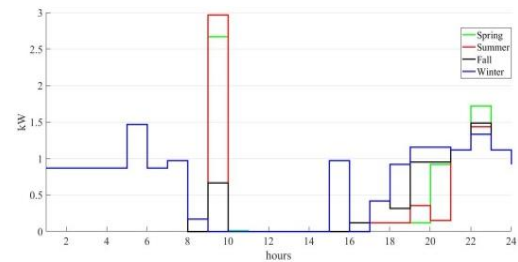


شکل ۳. تصویری از سیستم بادی و خورشیدی و باتری‌خانه پیاده‌شده در پایگاه تته‌ورا ۱

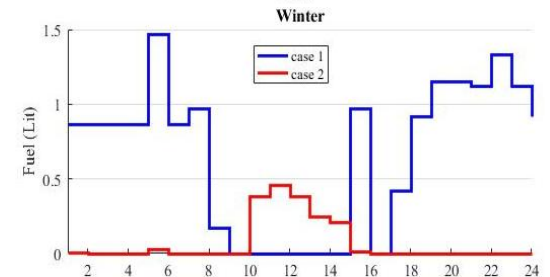
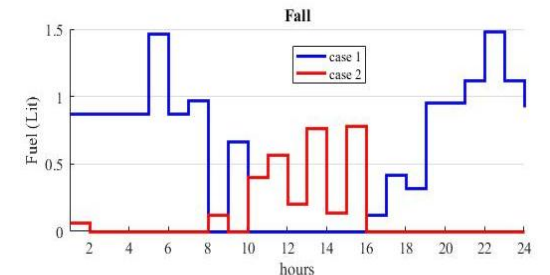
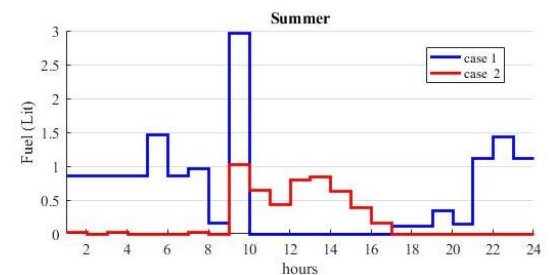
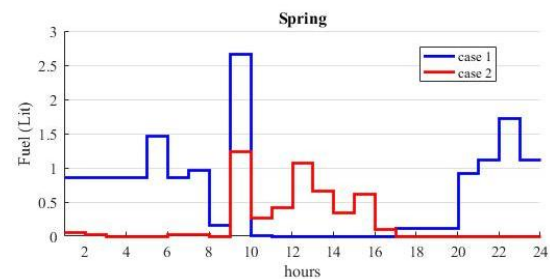
۷. نتیجه‌گیری

استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر جهت حل چالش انرژی پایگاه‌های مرزی کشور پیشنهادی است که می‌تواند ساعات خاموشی و هزینه‌های تأمین این انرژی این پایگاه‌های حساس را به صورت چشمگیری کاهش دهد. نتایج شبیه‌سازی مسئله بهینه‌سازی مطرح‌شده در این مقاله نشان می‌دهد که استفاده از

۴ روز منتخب ۴ فصل متفاوت به نمایش گذاشته است. این شکل نشانگر کاهش چشمگیر مصرف سوخت به دلیل تأمین انرژی به وسیله منابع انرژی تجدیدپذیر است. این کاهش سوخت علاوه بر رفع بحث جیره‌بندی سوخت جهت کاهش ساعات خاموشی، مشکلات حمل و ارسال سوخت از مراکز پشتیبانی مخصوصاً در فصل‌های سردسیر سال را حل می‌کند.



شکل ۱. قطع بار بهینه پایگاه در حالت عادی در طول ۴ روز نمونه



شکل ۲. مقایسه میانگین مصرف سوخت پایگاه در حالت‌های دوگانه مورد مطالعه به ازای روزهای انتخابی

- [13] Ghaffarpour, R.; Jam, A.; Ranjbar, A. "Optimal Mix of Distributed Generation Allocation to Improve the Security of Energy Supply in Defensive Sites Using Principles of Passive Defence"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 2016, 7, 19-32
- [14] Vahid-Pakdel, M. J.; Nojavan, S.; Mohammadi-Ivatloo, B.; Zare, K; "Stochastic Optimization of Energy Hub Operation with Consideration of Thermal Energy Market and Demand Response"; *Energy Convers. Manage.* 2017, 145, 117-128.

سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر جهت تأمین انرژی پایگاه‌های مرزی امری کاملاً باصرفه اقتصادی است و با منافع فنی کاملاً مشهود است. نتایج به دست آمده در مورد پایگاه تته‌ورا مؤید نشانگر این موضوع است که هزینه‌های تأمین انرژی این پایگاه در مدت طراحی که ۵ سال در نظر گرفته شده است ۸۱ درصد کاهش می‌یابد. استفاده از این سیستم‌ها باعث می‌شود که ساعات خاموشی این مرکز صفر گشته و مصرف گازوئیل به‌عنوان سوخت مصرفی پایگاه ۸۷ درصد کاهش می‌یابد.

پارامترها و متغیرها

پارامتر یا متغیر	توضیحات
t, s, h	نشانگرهای روز، سناریو و ساعت
C_w, C_{so}, C_{st}	هزینه هر واحد توربین بادی، پنل خورشیدی و ذخیره کننده
N_w, N_{so}, N_{st}	تعداد توربین بادی، پنل خورشیدی و ذخیره کننده
ρ	احتمال سناریو
C_f, C_{sh}, C_{cu}	هزینه هر لیتر سوخت و هزینه هر کیلووات ساعت قطع بار و قطع تولید منابع تجدید پذیر
L_f	میزان سوخت مصرفی دیزل ژنراتور بر حسب لیتر
P_{sh}, P_{cu}	میزان قطع بار و قطع تولید منابع تجدید پذیر بر حسب کیلووات
P_{so}, P_w	میزان توان تولیدی هر پنل خورشیدی و هر توربین بادی
P_{ch}, P_{dis}	میزان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی
p_i^{load}	میزان بار مصرفی تجهیز i
D	تعداد تجهیز مصرف کننده برق پایگاه
I_{ch}, I_{dis}	متغیرهای باینری نشان دهنده حالت‌های شارژ و دشارژ
M	ثابت مقدار بزرگ
LV_{st}, LV_{st}^{mc}	سطح انرژی ذخیره‌ساز و بیشینه سطح ذخیره‌سازی انرژی
η_{ch}, η_{dis}	بازده شارژ و دشارژ
N_{so}^{max}	بیشترین تعداد پنل قابل نصب در محیط پایگاه
L_f^{max}	بیشترین مقدار سوخت قابل مصرف روزانه
P_{DSL}	توان تولیدی دیزل ژنراتور بر حسب کیلووات
η_{diesel}	بازده دیزل ژنراتور
β	ارزش حرارتی سوخت گازوئیل (کیلووات ساعت بر لیتر)
P_{DSL}^{max}	بیشینه توان تولیدی دیزل ژنراتور
v	سرعت باد
P_w^r, v^r	توان و سرعت باد نامی توربین
v^{in}, v^{out}	سرعت‌های کات این و کات اوت توربین
V_{MPP}, I_{MPP}	ولتاژ و جریان نقطه توان بیشینه پنل خورشیدی
V_{OC}, I_{SC}	ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه پنل
k_v, k_i	ضرایب دمایی ولتاژ و جریان پنل
r	تابش خورشید بر حسب کیلووات بر مترمربع
T_A, T_{OT}	دمای محیط و دمای کار پنل بر حسب درجه سلسیوس

۸. مرجع‌ها

- [1] Bahramara, S.; Parsa Moghaddam M.; Haghifam, M. R. "Optimal Planning of Hybrid Renewable Energy Systems Using HOMER: A Review"; *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2016, 62, 609-620.
- [2] Chang, K.; Grace, L. "Optimal Design of Hybrid Renewable Energy Systems Using Simulation Optimization"; *Simul. Model. Pract. Theor.* 2015, 52, 40-51.
- [3] Ramli, M. A.; Hiendro, A.; Sedraoui, K.; Twaha, S. "Optimal Sizing of Grid-Connected Photovoltaic Energy System in Saudi Arabia"; *Renew. Energ.* 2015, 75, 489-495.
- [4] Che, L.; Zhang, X.; Shahidehpour, M.; Alabdulwahab, A.; Abusorrah, A. "Optimal Interconnection Planning of Community Microgrids with Renewable Energy Sources"; *IEEE Trans. Smart Grid* 2017, 8.3, 1054-1063.
- [5] Jung, J.; Villaran, M. "Optimal Planning and Design of Hybrid Renewable Energy Systems for Microgrids"; *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2017, 75, 180-191.
- [6] Mohammadi, M.; Ghasempour, R.; Astaraei, F. R.; Ahmadi, E.; Aligholian, A.; Toopshekan, A. "Optimal Planning of Renewable Energy Resource for a Residential House Considering Economic and Reliability Criteria"; *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2018, 96, 261-273.
- [7] Liu, Y.; Yu, S.; Zhu, Y.; Wang, D.; Liu, J. "Modeling, Planning, Application and Management of Energy Systems for Isolated Areas: A Review"; *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2018, 82, 460-470.
- [8] Sadeghi, H.; Abodollahi, A.; Mohammadian, M.; Rashidinejad, M. "Evaluating The Effects of Renewable Energy Resources from Passive Defence and Social Welfare perspectives in the Context of Expansion Planning"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 2015, 6, 71-86.
- [9] Khanzade, M. H.; Nabati Rad, M. "Energy Supply of Sensitive Areas as an Inverter-Based Microgrid During Stiff Power System Black Out"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 2017, 8, 85-95.
- [10] Zaman, F.; Elsayed, S. M.; Ray, T.; Sarker, R. A. "Evolutionary Algorithms for Power Generation Planning with Uncertain Renewable Energy"; *Energy* 2016, 112, 408-419.
- [11] Zeng, B.; Zhang, J.; Yang, X.; Wang, J.; Dong, J.; Zhang, Y. "Integrated Planning for Transition to Low-Carbon Distribution System with Renewable Energy Generation and Demand Response"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2014, 29, 1153-1165.
- [12] Soroudi, A.; Aien, M.; Ehsan, M. "A Probabilistic Modeling of Photo Voltaic Modules and Wind Power Generation Impact on Distribution Networks"; *IEEE Sys. J.* 2012, 6, 254-259.