

طراحی بهینه و پیاده‌سازی عملی سیستم‌های انرژی تجدید پذیر ترکیبی در مناطق دور افتاده: مطالعه موردی

عباس خان احمدی^۱ رضا غفارپور^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه جامع امام حسین (ع)- تهران- ایران

akhanahmadi@ihu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه جامع امام حسین (ع)- تهران- ایران

rgaffarpour@ihu.ac.ir

چکیده: با توجه به عدم دسترسی به شبکه توزیع الکتریکی در مناطق دور افتاده و افزایش بهای سوخت‌های فسیلی و هزینه‌های حمل‌ونقل سوخت، اهمیت استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در این مناطق رو به افزایش است. به دلیل قیمت بالای تجهیزات از قبیل توربین بادی، پنل خورشیدی و باتری، تعیین ظرفیت بهینه تجهیزات امری حیاتی به شمار می‌رود. در این پژوهش، به طراحی بهینه و پیاده‌سازی عملی سیستم‌های انرژی تجدید پذیر در یک منطقه دور افتاده در سیستان و بلوچستان پرداخته شده و تابع هدف خالص ارزش فعلی هزینه‌ها، توسط نرم‌افزار GAMS به صورت MILP مدل‌سازی و حل شده است. در ادامه به پیاده‌سازی عملی بر مبنای شبیه‌سازی کامپیوتری پرداخته شده و سناریو اجرایی به صورت ۴ کیلووات پنل خورشیدی، ۲۸ عدد باتری سیلد اسید، توربین بادی ۱۲۰۰ وات و اینورتر ۴ کیلوواتی تعیین و اجرا می‌گردد. بررسی‌های اقتصادی نشان می‌دهد که سیستم انرژی‌های تجدید پذیر با ۳۵ درصد کاهش هزینه نسبت به تأمین انرژی با دیزل ژنراتور صورت می‌پذیرد.

واژه‌های کلیدی: طراحی بهینه، انرژی تجدید پذیر ترکیبی، مدل‌سازی ریاضی، پیاده‌سازی عملی، نقاط دور افتاده، MILP.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.18.2.139

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۹/۱۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۴/۹

نام نویسنده‌ی مسئول: رضا غفارپور

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران - اتوبان بابایی غرب - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

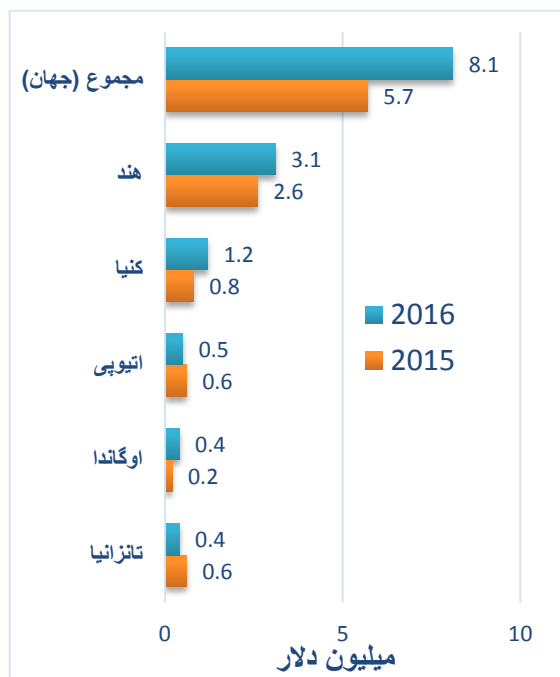
۱- مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر به تدریج جایگزین منابع انرژی سوخت فسیلی در جهان می‌شوند. منابع انرژی سوخت فسیلی محدود هستند و استفاده از این منابع باعث آلودگی محیط‌زیست و کاهش لایه اوزون می‌شود [۱]. گرچه ایران منابع نفت و گاز غنی دارد، تجزیه و تحلیل منابع انرژی تجدیدپذیر بیانگر این است که این کشور مناسب برای استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و باد است. در بین منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی باد، قابل دسترسی تر و نسبتاً ارزان تر است [۲]. بسیاری از مناطق در حال توسعه با کمبود انرژی الکتریکی و حرارتی و همچنین کمبود آب آشامیدنی مواجه هستند. به عنوان یک عمل پیشگیرانه برای مناطق دور افتاده، تمرکز بر روی انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش یافته است [۳]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کشور ایران با ۳۰۰ روز آفتابی و میانگین تابش خورشیدی $2200 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{year}$ به صورت بالقوه یکی از بهترین مناطق جهت استفاده از انرژی خورشیدی است [۴].

یکی از چالش‌های بزرگی که در سیستم‌های منفصل از شبکه وجود دارد، نیاز به ذخیره انرژی در ذخیره‌سازها به دلیل طبیعت غیرقابل پیش‌بینی این منابع انرژی است. ذخیره‌سازهای انرژی نقش مهمی در عملکرد سیستم‌های تجدیدپذیر منفصل از شبکه ایفا می‌کند [۵]. امروزه اکثر سیستم‌های برق تجدیدپذیر از باتری به عنوان سیستم ذخیره‌سازی استفاده می‌کنند. مهم‌ترین عامل در انتخاب باتری برای سیستم‌های فتولتائیک قابلیت تخلیه شدن و شارژ شدن شدید در دفعات مختلف بدون ایجاد هرگونه خسارت و آسیب برای باتری است. برای دستیابی به ظرفیت‌های بالاتر می‌توان باتری‌ها را با یکدیگر سری یا موازی نمود. باتری، هم در سیستم‌های مجزا از شبکه و هم متصل به شبکه کاربرد دارد و در زمانی که تولید سیستم فتولتائیک بیشتر از بار است، مازاد انرژی را ذخیره می‌سازد [۶].

در سال‌های اخیر انرژی خورشیدی مستقل از شبکه یکی از سریع‌ترین صنایع در حال رشد در جهت ایجاد دسترسی به انرژی است. بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶ حدود ۲۳،۵ میلیون سیستم خورشیدی مستقل از شبکه در سراسر دنیا فروخته شد که شامل مجموعه‌ای از خدمات نیز می‌شود. در سال ۲۰۱۶، نزدیک به ۸،۲ میلیون سیستم خورشیدی مستقل از شبکه به فروش رسید که نشان‌دهنده افزایش جهانی ۴۱ درصدی در مقایسه با سال ۲۰۱۵ است. در سال ۲۰۱۶، بیش از ۱۰۰ شرکت در سراسر جهان به طور فعال بر روی چراغ‌های خورشیدی مستقل و کیت‌های خورشیدی خانگی تمرکز کردند. در پنج کشور برتر از نظر صنعت خورشیدی مستقل از شبکه، فروش در هند، کنیا و اوگاندا در سال ۲۰۱۶ نسبت به سال ۲۰۱۵ افزایش یافت، در حالی که فروش در اتیوپی و تانزانیا کاهش را تجربه کرده است. بیشترین میزان فروش در کشورهای جنوب صحرای آفریقا بوده است. اگرچه در سال ۲۰۱۶ میلادی فروش این منطقه در

مقایسه با سال ۲۰۱۵ با کاهش ۳۵ درصدی به حدود ۱ میلیون کاهش یافت [۷].



شکل (۱): فروش ۵ کشور برتر دنیا در زمینه سیستم‌های مستقل از شبکه [۷]

تاکنون پژوهش‌های با ارزشی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر صورت گرفته است. در سال ۱۹۸۹ میلادی، تاکاهاشی^۱ به درخواست آژانس علم و فناوری صنعت^۲ تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه انرژی خورشیدی و زمین‌گرایی و زغال‌سنگ و هیدروژن شروع کرد که این تحقیقات Sunshine Project نام گرفت. این تحقیقات در بخش انرژی خورشیدی به سه بخش فتولتائیک خورشیدی، سیستم گرمایش و سرمایش خورشیدی و حرارتی خورشیدی تقسیم می‌شود. در این تحقیقات وضعیت فعلی و معایب و مزایای انواع پنل‌های خورشیدی بررسی می‌شود. طبق این برنامه ظرفیت نصب‌شده کشور ژاپن تا پیش از سال ۲۰۰۰ میلادی به ۱۰۰ مگاوات باید افزایش پیدا می‌کرد. این در حالی بود که تا سال ۱۹۸۳ ظرفیت پنل‌های نصب‌شده حدود ۵ مگاوات بود که تا سال ۱۹۸۶ این ظرفیت به ۱۲،۵ مگاوات افزایش یافت [۸].

[۹] یک برنامه‌ریزی ریاضی برای بهینه‌سازی ظرفیت سیستم‌های ترکیبی بادی-فتولتائیک و تعیین موقعیت آن‌ها در ریز شبکه با توجه به تقاضای نقاط مصرف و پتانسیل انرژی حل می‌کند. معیار این طراحی، به حداقل رساندن هزینه سرمایه‌گذاری اولیه موردنیاز برای پاسخگویی به تقاضای بار است. مدل ترکیبی پیشنهاد شده با نمونه‌های واقع‌بینانه مورد آزمایش قرار گرفته و این مدل به مطالعه موردی واقعی در کشور پرو^۳ اعمال می‌شود. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل پیشنهادی به طور قابل توجهی هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. در [۱۰] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح-مختلط^۴

قالب یک پروژه عملی و در یک روستای دور افتاده اجرا می‌کند. در ادامه این مقاله، بخش بیان مسئله ارائه می‌گردد. پس از آن به مدل‌سازی ریاضی اجزای مختلف سیستم منفصل از شبکه و مسئله کمینه‌سازی پرداخته می‌شود و نتایج بهینه‌سازی سیستم انرژی‌های تجدید پذیر ترکیبی ارائه می‌شود. سپس تصاویر و تجربه‌های اجرای عملی پروژه ارائه می‌گردد. نهایتاً داده‌های عملی و داده‌ها شبیه‌سازی شده مقایسه می‌شوند و چالش‌ها نکات مرتبط با آن‌ها بیان می‌گردند...

۲- بیان مسئله

تأمین بار مصرفی موردنیاز در هر لحظه $L(t)$ توسط منابع تولید توان و منابع ذخیره‌ساز با کمترین هزینه سالانه، مسئله‌ای است که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود. بدین ترتیب در یک مجموعه زمانی سالانه به صورت $t \in T = 1, 2, \dots, 8760$ ، منابع تولید انرژی الکتریکی شامل مازول‌های خورشیدی (P_{pv}) و توربین بادی (P_{wt}) و منبع ذخیره‌ساز باتری، انرژی موردنیاز بار مصرفی در هر ساعت را با شرط کمترین هزینه دوره عمر شامل هزینه‌های احداث، تعمیر-نگهداری و هزینه تعویض، تأمین می‌کنند. بدین ترتیب ضمن تعیین تعداد بهینه تجهیزات، وضعیت شارژ (SOC) باتری‌ها هیچ‌گاه از حداقل آن تجاوز نخواهد کرد. با توجه به اینکه توان تولیدشده توسط مازول‌های خورشیدی و توربین بادی و همچنین انرژی ذخیره‌شده در باتری‌ها از نوع جریان مستقیم و بار مصرفی از نوع جریان متناوب است، از اینورتر استفاده می‌شود. جهت ساده‌سازی مدل ریاضی، از مدل‌سازی دینامیکی باتری و اینورتر خودداری می‌گردد.

۳- مدل‌سازی ریاضی

در روش MILP تمامی روابط ریاضی اعم از قیود و تابع هدف، باید به صورت خطی برنامه‌ریزی می‌شوند. طبیعتاً استفاده از ضرب یا تقسیم دو متغیر در یکدیگر و استفاده از توابع خاص مانند قدر مطلق که باعث تبدیل روابط به شکل غیرخطی می‌شوند، مجاز نیست و تمامی موارد اشاره‌شده باید با روابط ریاضی، خطی سازی شوند. همچنین عدم وجود حلقه‌های شرطی و حلقه‌های تکرار در GAMS تا حدودی باعث سخت شدن مدل‌سازی ریاضی می‌شود. در ادامه این قسمت، به بیان مدل ریاضی تجهیزات به همراه مشخصات فنی و اقتصادی آن‌ها و داده‌های جغرافیایی پرداخته می‌شود.

۳-۱- پنل خورشیدی

عملکرد مازول‌های خورشیدی به چند عامل مختلف مانند میزان تابش خورشید، درجه هوا و رطوبت و وضعیت شارژ باتری‌ها و غیره بستگی دارد. در مطالعه موردی پیش رو، از یک مدل ریاضی با دقت بالا جهت محاسبه توان الکتریکی خروجی مازول‌های خورشیدی استفاده شده است و در رابطه (۱) مشهود است [۱۷]:

(MILP) سیستم فتولتائیک-باتری که هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری را به حداقل می‌رساند، توسعه یافته است. هدف مرجع [۱۱] ارزیابی اقتصادی انرژی تجدید پذیر ترکیبی مستقل از شبکه شامل فتولتائیک-باد و سیستم ذخیره‌سازی هیدروژن برای کاربردهای دور افتاده است. در [۱۲] مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط متداول سیستم یکپارچه توسعه داده شده و در قالب یک مطالعه موردی اعمال شده است. نتیجه مطالعه موردی نشان می‌دهد که افزایش رزرو ۲۰ درصدی تولید فتولتائیک باعث افزایش ۲ درصدی کل هزینه می‌شود. [۱۳] بهینه‌سازی و ارزیابی یک سیستم ریز شبکه ترکیبی در شهرهای مختلف سوئد را در نظر می‌گیرد تا پتانسیل هر مکان برای سرمایه‌گذاری سیستم‌های ریز شبکه ترکیبی را مشخص کند. سیستم ریز شبکه موردنظر بر روی پنل‌های فتولتائیک-توربین‌های بادی-دیزل ژنراتور و ذخیره‌ساز باتری تأکید می‌کند. برای تعیین ظرفیت بهینه برای هر محل، الگوریتم بهینه‌سازی ذرات چندهدفه مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۱۴] یک سیستم ترکیبی پنل خورشیدی-توربین بادی-باتری را برای یک ناحیه روستایی در الجزایر طراحی می‌کند و با در نظر گرفتن دو شاخص قابلیت اطمینان احتمال کمبود انرژی^۵ و مازاد انرژی، بهینه‌سازی چندهدفه را انجام داده است. در [۱۵] بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم هوش جمعی مبتنی بر روش فازی، برای تعیین اندازه و مکان مولد های الکتریکی تجدیدپذیر معرفی شده است. این الگوریتم بر روی یک سیستم تست ۷۰ باسه با در نظر گرفتن ترکیبی از مولد های تجدید پذیر به منظور کمینه کردن اهداف اقتصادی، آلاینده‌گی و تلفات سیستم توزیع انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اندازه و چینش مناسب تحت سناریو های مختلف انتخاب مولدها به طور قابل ملاحظه ای هزینه، آلودگی و تلفات سیستم توزیع را کاهش می‌دهند. در [۱۶] مقاله، روشی جدید برای تعیین تعداد بهینه واحدهای موجود در سیستم ترکیبی توربین باد و سلول های فتولتائیک، با هدف حداکثر کردن نرخ تطابق بازه‌های تولید و مصرف توان در حداقل هزینه اقتصادی، ارائه شده است. از داده های آب و هوایی و تقاضای بار برای روستایی در جنوب شرقی ایران، به عنوان یک مطالعه موردی استفاده شده است. الگوریتم کنترلی طراحی شده، راه اندازی ژنراتور دیزل و یا استفاده از باتری را در زمان های کمبود توان کنترل میکند. اینچنین مطالعاتی قبل از راه اندازی عملی پروژه، علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم، سبب صرفه جویی اقتصادی نیز میشود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تعیین ظرفیت بهینه سیستم انرژی‌های تجدید پذیر امری مهم و ضروری است و پژوهش‌های متعددی در این زمینه صورت گرفته است که معمولاً به پیاده‌سازی نتایج شبیه‌سازی شده نمی‌پردازند و نتایج را فقط در قالب گزارش تئوری بیان می‌کنند؛ اما پژوهش پیش رو توسط برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح-مختلط، به طراحی بهینه سیستم‌های انرژی تجدید پذیر ترکیبی در مناطق دور افتاده می‌پردازد و نتایج طراحی بهینه را در

جدول (۱): مشخصات فنی و اقتصادی ماژول خورشیدی

توان نامی	۲۶۰ وات
بازده ماژول	۱۵٫۴٪
ضریب دمایی توان حداکثر	-۰٫۴۲٪
ولتاژ در توان حداکثری	۳۰٫۳ ولت
ولتاژ مدارباز	۳۷٫۷ ولت
جریان در توان حداکثری	۸٫۵۹ آمپر
عمر مفید	۲۰ سال
هزینه خرید	۸۰۰ دلار بر کیلووات
هزینه تعویض	۶۵۰ دلار بر کیلووات
هزینه تعمیر و نگهداری	۰

۳-۲- توربین بادی

توان الکتریکی خروجی توربین بادی در هر ساعت، P_{wt} از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد [۱۹]:

$$P_{wt} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ P_r \left(\frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} \right)^3 & v_{ci} < v < v_r \\ P_r & v_r < v < v_{co} \\ 0 & v > v_{co} \end{cases} \quad (4)$$

همان‌طور که در رابطه (۴) مشاهده می‌شود، توان الکتریکی توربین بادی وابسته به سرعت لحظه‌ای باد $v(t)$ (m/s)، سرعت نامی v_r (m/s)، توان نامی توربین بادی P_r (W) است که توسط سرعت قطع ورودی v_{ci} (m/s) و سرعت قطع خروجی v_{co} (m/s)، محدود شده است.

شکل (۳) تصویر توربین بادی این مطالعه موردی را نشان می‌دهد. مشخصات فنی و اقتصادی توربین بادی در این مطالعه موردی در جدول (۲) آمده است.

$$P_{pv}(t) = \eta_{pvg}(t) \times A_{pvg} \times G(t) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، پارامتر $G(t)$ تابش لحظه‌ای خورشید (KW/m^2)، A_{pvg} مساحت هر ماژول (m^2) و $\eta_{pvg}(t)$ بازده کل سیستم خورشیدی است و از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\eta_{pvg}(t) = \eta_{pv} \times \eta_{rec} \left[1 - \beta (T_c(t) - T_{c,ref}) \right] \quad (2)$$

که η_{pv} بازده هر ماژول خورشیدی، η_{rec} بازده شارژ کنترلر است که به دلیل استفاده از اینورتر-شارژر از نوع MPPT مقدار آن برابر با $\eta_{rec} = 1$ است. همچنین β ضریب دمایی توان حداکثر $^\circ C$ (ماژول موردنظر، $T_{c,ref}$ دمای مرجع سلول‌های خورشیدی است و $T_c(t)$ از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$T_c(t) = T_a(t) + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \times G_t \quad (3)$$

در رابطه (۳)، NOCT دمای عادی کارکرد سلول، $T_a(t)$ دمای هوای محیط ($^\circ C$) در هر لحظه است. نهایتاً توان کل خروجی ماژول‌های خورشیدی از $P_{pv}(t) = N_{pv} \times p_{pv}(t)$ محاسبه می‌شود که N_{pv} تعداد کل ماژول‌های خورشیدی است. شکل (۲) پلاک ماژول خورشیدی نصب‌شده در مطالعه موردی و جدول (۱) مشخصات فنی و اقتصادی آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۲): پلاک پنل‌های خورشیدی در مطالعه موردی

با توجه به اطلاعاتی که در شکل (۴) آمده است ساختمانی با ارتفاع معلوم H ، ناحیه آشفته‌گی بزرگی تا حداکثر فاصله سطحی $20 \times H$ و حداکثر ارتفاع $2 \times H$ ایجاد می‌کند. به همین دلیل هیچ‌گاه نباید در فاصله‌های نزدیک و کم ارتفاع نسبت به ساختمان محل زندگی، اقدام به نصب توربین شود. شکل (۵) تصویر توربین بادی متلاشی‌شده در مطالعه موردی را نشان می‌دهد که به دلیل سرعت بالای باد و همچنین جایابی اشتباه توربین بادی در ناحیه اغتشاش باد رخ داده است.



شکل (۳): توربین بادی موردنظر در مطالعه موردی

جدول (۲): مشخصات فنی و اقتصادی توربین بادی

توان نامی	۱۲۰۰ وات
ولتاژ نامی	۴۸ ولت
سرعت باد نامی	۱۲ متر بر ثانیه
سرعت شروع چرخش ^{۱۰}	۸,۳۹ آمپر
سرعت قطع ورودی	۲,۵ متر بر ثانیه
سرعت قطع خروجی	۱۶ متر بر ثانیه
عمر مفید	۱۵ سال
هزینه خرید	۲۰۰۰ دلار
هزینه تعویض	۱۸۰۰ دلار
هزینه تعمیر و نگهداری	۱۰۰ دلار در سال



شکل (۵): توربین بادی آسیب‌دیده در مطالعه موردی

۳-۳- باتری

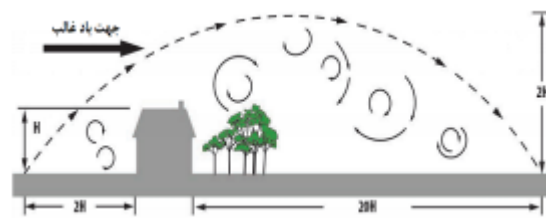
با توجه به ماهیت خطی مسئله، لازم است برای باتری، مدلی خطیبیان گردد. یکی از نکات مهمی که همواره هنگام استفاده از باتری باید به آن توجه شود، رعایت حداکثر و حداقل جریان شارژ و دشارژ باتری است. در صورت عدم رعایت این نکته، آسیب جدی به باتری وارد شده و به سرعت مستهلک می‌شوند. حداکثر و حداقل انرژی شارژ و دشارژ باتری به صورت خطی در رابطه (۵) به کمک متغیرهای باینری $S_B 1(t)$ و $S_B 2(t)$ ، آمده است [۲۱]:

$$\begin{aligned} Ch(t) &\leq E_{ch, rated} \times S_B 1(t) \\ Disch(t) &\leq E_{disch, rated} \times S_B 2(t) \end{aligned} \quad (5)$$

که $E_{ch, rated}$ حداکثر توان شارژ (kWh)، $E_{disch, rated}$ حداکثر توان دشارژ (kWh)، متغیر شارژ $Ch(t)$ در محدودیت $0 \leq Ch(t) \leq E_{ch, rated}$ و متغیر دشارژ $Disch(t)$ در محدودیت $0 \leq Disch(t) \leq E_{disch, rated}$ صدق می‌کنند. با توجه به این‌که در هر لحظه فقط عمل شارژ یا دشارژ صورت می‌گیرد و صورت ریاضی آن در رابطه (۶) آمده است:

$$S_{1B}(t) + S_{2B}(t) \leq 1 \quad (6)$$

ارزیابی سایت مناسب یک روند دقیق است که شامل ارزیابی منابع باد و ارزیابی ویژگی‌های سایت می‌شود. با توجه به حضور موانع و ساختمان در محل موردنظر، بررسی اثر اغتشاش باد^{۱۱} جهت مکان‌یابی مناسب محل نصب توربین بادی ضروری است. اگر محدوده اطراف مکان بالقوه نصب توربین بادی حداقل تا شعاع ۱۵۰ متر چندان صاف و هموار نیست، ارزیابی ویژگی‌های توپوگرافی شامل شکل، ارتفاع، طول، عرض و فاصله و جهت اشیاء مختلف مانند درختان و ساختمان‌ها لازم است [۲۰]. شکل (۴) ناحیه آشفته‌گی باد در اطراف یک ساختمان کوچک را نشان می‌دهد.



شکل (۴): ناحیه اغتشاش باد در اطراف یک ساختمان

۳-۴- دیزل ژنراتور

در نواحی دوردست و قسمت‌هایی که به شبکه توزیع الکتریکی دسترسی وجود ندارد، راه‌حل ساده و کوتاه‌مدت، استفاده از دیزل ژنراتور است؛ اما به دلیل هزینه‌های زیاد سوخت و همچنین تعمیر-نگهداری، استفاده از دیزل ژنراتور به‌عنوان تنها منبع تأمین انرژی به‌صرفه اقتصادی نیست [۲۳]؛ استفاده از دیزل ژنراتور جهت افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش خاموشی‌های سیستم پیل خورشیدی-توربین بادی بسیار رایج است و باعث کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌شود. مدل ریاضی سوخت مصرفی هر دیزل ژنراتور، توسط رابطه (۹) تعیین می‌گردد:

$$Cons_{fuel}(t) = \beta \cdot P_{dg, rated} + \alpha \cdot P_{dg}(t) \quad (9)$$

که $P_{dg, rated}$ توان نامی دیزل ژنراتور (kW)، P_{dg} توان الکتریکی دیزل ژنراتور در هر لحظه (kW)، $\alpha = 0.08415 \frac{Lit}{kW}$ و $\beta = 0.2461 \frac{Lit}{kW}$ ضرایب منحنی سوخت ژنراتور هستند [۲۴]. $C_{dg, fuel}$ کل هزینه سوخت سالانه دیزل ژنراتور در هر لحظه، توسط رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$C_{dg, fuel} = \sum Cons_{fuel}(t) \times C_{fuel} \quad (10)$$

که در رابطه (۱۰)، C_{fuel} هزینه سوخت مصرفی (\$) است. همچنین لازم است متغیر تصمیم $S_{dg}(t)$ ، حضور یا عدم حضور دیزل ژنراتور در تولید توان الکتریکی را تعیین نماید که صورت ریاضی آن در رابطه (۱۱) آمده است:

$$P_{dg, out}(t) \leq P_{dg, rated} \times S_{dg}(t) \quad (11)$$

که $P_{dg, out}(t)$ توان خروجی دیزل ژنراتور در هر لحظه است. بدین ترتیب رابطه (۹) به‌صورت رابطه (۱۲) اصلاح می‌گردد:

$$Cons_{fuel}(t) = \beta \cdot P_{dg, rated} + \alpha \cdot U_{dg}(t) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، $U_{dg}(t) = S_{dg}(t) \times P_{dg, out}(t)$ است که صورت خطی شده آن در رابطه (۱۳) آمده است:

$$\begin{aligned} U_{dg}(t) &\leq S_{dg}(t) \times m \\ U_{dg}(t) &\geq 0 \\ U_{dg}(t) &\leq P_{dg, out}(t) \end{aligned} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، m یک عدد ثابت بسیار بزرگ جهت خطی سازی روابط غیرخطی است. در جدول (۴) مشخصات فنی و اقتصادی دیزل ژنراتور آمده است.

در هر لحظه میزان شارژ باتری دارای محدودیت‌های حداقل و حداکثر است که به‌صورت رابطه (۷) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} SOC_{min} &\leq SOC(t) \leq SOC_{max} \\ SOC_{min} &= N_{bat} \times (V_{bat} \times M_{Ah} \times (1 - dod)) / 1000 \\ SOC_{max} &= N_{bat} \times (V_{bat} \times M_{Ah}) / 1000 \end{aligned} \quad (7)$$

در رابطه (۷) SOC_{min} حداقل میزان شارژ مجموعه باتری‌ها (kWh)، SOC_{max} حداکثر میزان شارژ مجموعه باتری‌ها (kWh)، V_{bat} ولتاژ نامی باتری (V)، M_{Ah} ظرفیت هر باتری (Ah)، dod عمق دشارژ^{۱۲} باتری است که در این پژوهش میزان آن برابر با $dod = 0.5$ در هر لحظه در نظر گرفته شده است [۲۲]. بدین ترتیب در یک دوره یک‌ساله، حداکثر می‌توان ۵۰ درصد از انرژی باتری‌ها را تخلیه نمود. همچنین $SOC(t)$ وضعیت شارژ در هر لحظه است که رابطه (۸) مدل خطی آن را نمایش می‌دهد [۲۱]:

$$SOC(t) = SOC(t-1) \times (1 - \sigma) + [U_{ch}(t) \times \eta_{bat} - U_{disch}(t) / \eta_{bat}] \quad (8)$$

σ ضریب خود دشارژی، η_{bat} بازده شارژ و دشارژ باتری است. همچنین $U_{ch}(t)$ و U_{disch} به ترتیب متغیرهای خطی شده شارژ و دشارژ باتری هستند.

شکل (۶) یکی از باتری‌های نصب‌شده در محل موردنظر را نشان می‌دهد که در حال آزمون ولتاژ است. در جدول (۳) مشخصات فنی و اقتصادی باتری ذکر شده است.



شکل (۶): باتری‌های استفاده شده در مطالعه موردی

جدول (۳): مشخصات فنی و اقتصادی باتری

نوع باتری	سیلد اسید
ظرفیت	۱۰۰ آمپر ساعت
ولتاژ نامی	۱۲ ولت
حداکثر جریان شارژ	۳۰ آمپر
عمر مفید در عمق دشارژ ۵۰ درصد	۶۵۰ سیکل
هزینه خرید	۱۱۲ دلار
هزینه تعویض	۱۱۲ دلار
هزینه تعمیر و نگهداری	۰

جدول (۴): مشخصات فنی و اقتصادی دیزل ژنراتور

نوع دیزل ژنراتور	پرکینز/ کنترل فرکانس خودکار
ظرفیت	۶ کیلوولت آمپر
ولتاژ نامی	۲۳۰ ولت
قیمت سوخت	۰٫۱ دلار
عمر مفید	۲۵۰۰ ساعت
هزینه خرید	۱۵۰۰ دلار
هزینه تعویض	۱۵۰۰ دلار
هزینه تعمیر و نگهداری	۱۰۰ دلار

۳-۵- روابط اقتصادی

روش‌های مختلفی برای امکان‌سنجی اقتصادی هر ساختاری در تولید برق وجود دارد. روش محاسبه خالص ارزش فعلی^{۱۳} یکی از مواردی است که در پژوهش‌های بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد و از آن در مقایسه سناریوهای اقتصادی استفاده می‌گردد. درواقع NPV یکی از معیارهای اصلی شبیه‌سازی برای تعیین ظرفیت و بهینه‌سازی سیستم ترکیبی انرژی‌های تجدید پذیر است که جهت محاسبه هزینه‌های احداث و عملیاتی با در نظر گرفتن نرخ بهره سالانه^{۱۴} و نرخ تورم^{۱۵} استفاده می‌کند. نرخ بهره تورمزادایی شده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (14)$$

که i' بهره نامی سالانه و f نرخ تورم است. همچنین توسط ضریب بازیابی سرمایه^{۱۶} هزینه‌های سالانه به زمان حال منتقل می‌شوند. پارامتر CRF در رابطه (۱۵) آمده است [۲۶]:

$$CRF(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، n دوره عمر پروژه است که در این مطالعه موردی ۱۵ سال در نظر گرفته شده است.

خالص ارزش فعلی هزینه‌های سیستم، در طول دوره عمر از رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

$$NPV = C_{ini} + C_{O\&M} + C_{rep} \quad (16)$$

که C_{ini} هزینه اولیه احداث سیستم (\$)، $C_{O\&M}$ هزینه تعمیر نگهداری تجهیزات (\$)، C_{rep} هزینه تعویض تجهیزات (\$) است. C_{ini} از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شوند:

$$C_{ini} = C_{ini,pv} + C_{ini,wt} + C_{ini,bat} + C_{ini,inv} + C_{ini,dg} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، $C_{ini,dg}$ هزینه خرید دیزل ژنراتور است. همچنین $C_{ini,pv}$ هزینه خرید و احداث پنل خورشیدی (\$)، $C_{ini,wt}$ هزینه خرید و احداث توربین بادی (\$)، $C_{ini,bat}$ هزینه اولیه باتری (\$)، $C_{ini,inv}$ هزینه اولیه اینورتر (\$) هستند و از رابطه (۱۸) محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned} C_{ini,pv} &= N_{pv} \times C_{pv} \\ C_{ini,wt} &= N_{wt} \times C_{wt} \\ C_{ini,bat} &= N_{bat} \times C_{bat} \\ C_{ini,inv} &= N_{inv} \times C_{inv} \end{aligned} \quad (18)$$

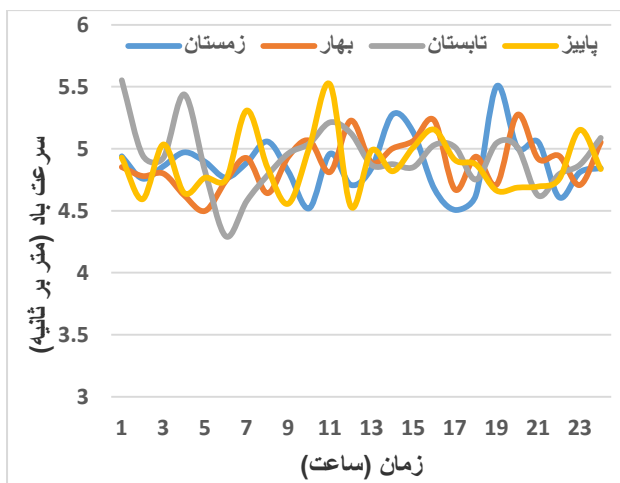
که N_{pv} تعداد پنل‌های خورشیدی، C_{pv} هزینه هر پنل (\$)، N_{wt} تعداد توربین‌های بادی، C_{wt} هزینه هر توربین بادی (\$)، N_{bat} تعداد باتری، C_{bat} هزینه هر باتری (\$)، N_{inv} تعداد اینورتر، C_{inv} هزینه هر اینورتر (\$) است. هزینه‌های عملیاتی سیستم که شامل هزینه‌های تعمیر-نگهداری و هزینه تعویض تجهیزات می‌شوند از رابطه (۱۹) به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} C_{O\&M} = C_{O\&M,dg} \times (CRF(i, 15)) + C_{O\&M,wt} \times (CRF(i, 15)) \\ C_{rep} = C_{rep,bat} \times \left(\sum_{n=3,6,9,12} \frac{1}{(1+i)^n} \right) \end{cases} \quad (19)$$

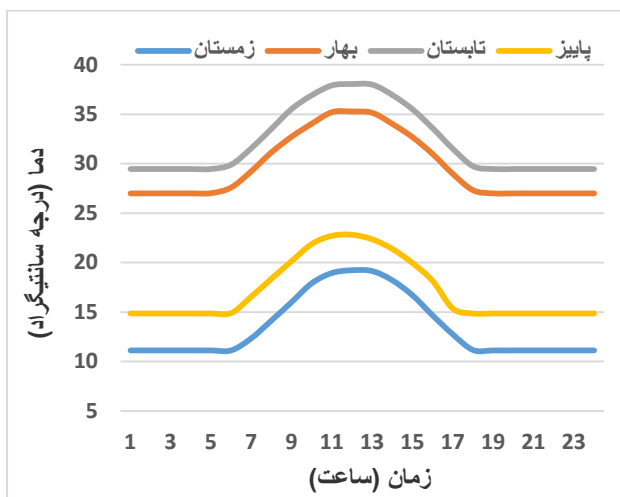
در رابطه (۱۹)، $C_{O\&M,dg}$ هزینه تعمیر-نگهداری سالانه دیزل ژنراتور (\$)، $C_{O\&M,wt}$ هزینه تعمیر نگهداری سالانه توربین بادی (\$)، $C_{rep,bat}$ هزینه تعویض باتری (\$) است. در جدول (۵) مشخصات فنی و اقتصادی اینورتر آمده است.

جدول (۵): مشخصات فنی و اقتصادی اینورتر

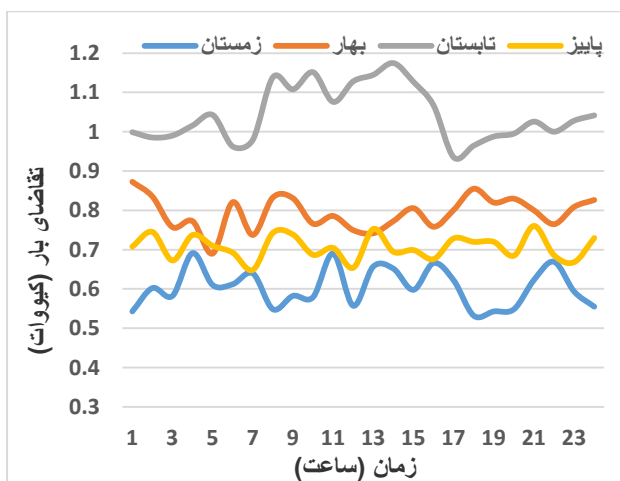
نوع اینورتر	اینورتر شارژر با ورودی دیزل ژنراتور
ظرفیت	۵ کیلوولت آمپر / ۴ کیلووات
ولتاژ نامی ورودی/خروجی متناوب	۲۳۰ ولت
حداکثر جریان شارژ دیزل ژنراتور	۶۰ آمپر
ولتاژ نامی باتری	۴۸ ولت
ولتاژ ورودی سولار	۱۵۰ - ۰ ولت



شکل (۸): میانگین سرعت لحظه‌ای باد در چهار فصل مختلف سال



شکل (۹): میانگین دمای هوا در چهار فصل مختلف سال



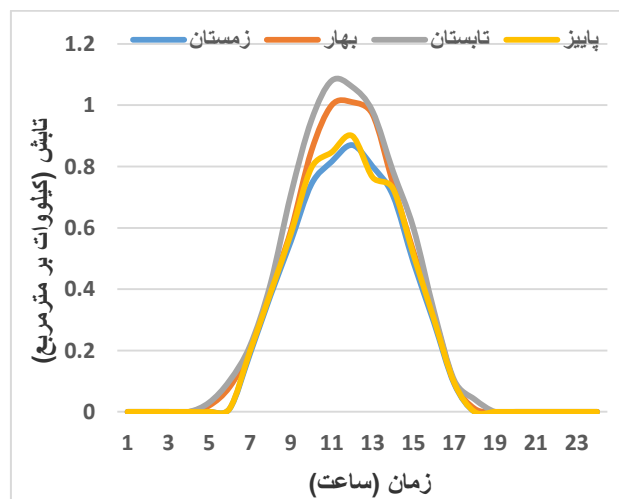
شکل (۱۰): میانگین تقاضای بار لحظه‌ای در چهار فصل مختلف سال

حداکثر جریان شارژ سولار	۸۰ آمپر
عمر مفید	۱۰ سال
هزینه خرید	۱۲۵۰ دلار
هزینه تعویض	۱۲۵۰ دلار
هزینه تعمیر و نگهداری	۰ دلار

۳-۶- داده‌های جغرافیایی

با توجه به تأثیر شرایط جوی بر منابع تولید توان تجدیدپذیرها، لازم است اطلاعات و داده‌های جغرافیایی محل اجرای پروژه نظیر تابش خورشید، سرعت باد و دمای محیط بررسی گردد. به دلیل واقع شدن محل موردنظر در استان سیستان و بلوچستان، از اثر رطوبت بر تولید انرژی تجدید پذیر صرف نظر شده است. اطلاعات تابش خورشید از داده‌های ماهواره‌ای اداره کل ملی هوانوردی و فضا^{۱۷} مورداستفاده قرار گرفته است.

جهت نمایش بهتر اطلاعات جغرافیایی ساعتی محل موردنظر، چهار روز نمونه از چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان انتخاب شده است. در ادامه اطلاعات جغرافیایی شامل تابش خورشید، سرعت باد، دمای محیط و همچنین تقاضای بار الکتریکی به ترتیب در شکل‌های (۷) تا (۱۰) آمده است.



شکل (۷): میانگین تابش خورشید در چهار فصل مختلف سال

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این پژوهش، برنامه‌ریزی و تعیین ظرفیت بهینه سیستم‌های انرژی تجدید پذیر ترکیبی در مناطق دور افتاده با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان صورت گرفته است که طی آن ظرفیت بهینه تجهیزات خورشیدی اعم از ماژول‌های خورشیدی، توربین بادی و باتری را پیشنهاد و برنامه‌ریزی بهینه را طی دوره یک‌ساله انجام می‌دهد که دوره عمر پروژه موردنظر ۱۵ سال و نرخ بهره تورمزدایی شده در دوره عمر، ۱۰ درصد است. در هردو سناریو ۱ و ۲، با توجه به نتایج آزمون ولتاژ باتری‌ها که در شکل (۶) نشان داده شده است و نشان دهنده ولتاژ اولیه است، شارژ اولیه باتری‌ها ۹۰ درصد ظرفیت کل باتری‌ها در نظر گرفته شده است.

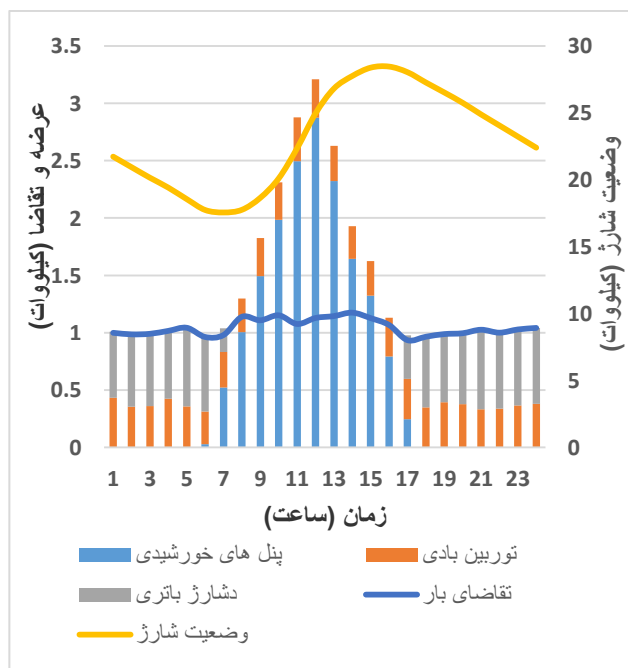
تابع هدف موردنظر، کمینه‌سازی خالص ارزش فعلی هزینه‌های دوره عمر است. جهت سهولت، برنامه‌ریزی استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر، در دوره یک‌ساله (۸۷۶۰ ساعت) صورت گرفته است و بر مبنای هزینه‌های حاصل‌شده و نرخ بهره، هزینه‌های سال‌های آینده به زمان حال منتقل می‌شوند و در نهایت تابع هدف تعیین و کمینه‌سازی می‌شود. شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار GAMS 24.1.2 به روش برنامه‌ریزی MILP و به کمک CPLEX صورت گرفته است. رایانه‌ای که در آن شبیه‌سازی صورت گرفته است دارای سیستم Intel CoreTM i5-2410M CPU 2.3 GHz, 4GB RAM در محیط Windows 10 است. همچنین میانگین زمان شبیه‌سازی حدود ۱۰ دقیقه است. ظرفیت بهینه تجهیزات و نتایج سناریو شبیه‌سازی شده در جدول (۶) آمده است.

جدول (۶): نتایج سناریوهای شبیه‌سازی شده

ردیف	عنوان	واحد	سناریو ۱	سناریو ۲
۱	ماژول خورشیدی ۲۵۰ وات	تعداد	۱۳	۰
۲	توربین بادی ۱۲۰۰ وات	تعداد	۱	۰
۳	کانورتر	کیلووات	۴	۰
۴	باتری ۱۰۰ آمپر ساعت	تعداد	۲۵	۰
۵	خالص هزینه‌های دوره عمر (NPV)	دلار	۱۶۳۹۵	۲۵۲۶۸
۶	هزینه خرید (اولیه)	دلار	۸۶۵۰	۱۵۰۰
۷	هزینه تعمیر و نگهداری	دلار	۱۵۰۰	۱۷۷۶۸
۸	هزینه تعویض	دلار	۶۲۴۵	۶۰۰۰
۹	قیمت انرژی (COE ^{۱۸})	دلار بر کیلووات ساعت	۰,۲۷۶	۰,۴۲۶
۱۰	کل انرژی تجدید پذیر	کیلووات ساعت	۸۹۹۳	۰

تولیدی	در سال	در سال	در سال
۱۱	کل کارکرد دیزل	ساعت در سال	۸۷۶۰
۱۲	سوخت (گازوئیل)	لیتر در سال	۲۰۳
۱۳	کل انرژی بار مصرفی	کیلووات ساعت در سال	۷۸۰۱

همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، با وجود این‌که سناریو ۱ که شامل سیستم ترکیبی پنل خورشیدی/ توربین بادی/ باتری/ دیزل می‌شود، دارای هزینه اولیه (ردیف ۶) کمتری نسبت به سناریو ۲ (تأمین انرژی با دیزل ژنراتور) است، خالص هزینه‌های دوره عمر (ردیف ۵) نسبت به سناریو ۲ بسیار کمتر است. این تفاوت شدید به دلیل هزینه‌های مرتبط با سوخت و تعمیر-نگهداری دیزل ژنراتور است. در سناریو ۱ قیمت انرژی $COE = 0.276 \$ / kWh$ و در سناریو ۲ قیمت انرژی $COE = 0.426 \$ / kWh$ است که دلیل آن هزینه دوره عمر کمتر سناریو ۱ است. هزینه تعویض (ردیف ۹) بیشتر سناریو ۲ نسبت به سناریو ۱ به دلیل افزایش تعداد باتری‌ها است. دلیل دیگر آن عدم حضور توربین بادی در سناریو ۲ است که باعث افزایش دفعات تعویض مجموعه باتری‌ها می‌شود. بدین ترتیب با اجرای سناریو تأمین انرژی با انرژی‌های تجدید پذیر و عدم اجرای سناریو تأمین انرژی با دیزل ژنراتور، برق‌رسانی با رقمی بیش از ۳۵ درصد صرفه‌جویی اقتصادی انجام می‌شود که نشان از اقتصادی بودن تأمین انرژی با انرژی‌های تجدیدپذیر است.



شکل (۱۱): میانگین عرضه و تقاضای انرژی و وضعیت شارژ باتری در فصل تابستان

ترتیب تعداد باتری‌ها باید به صورت مضارب صحیح عدد چهار انتخاب شوند که نزدیک‌ترین عدد بزرگ‌تر از مقدار بهینه، تعداد ۲۸ عدد است. همچنین لازم است که ولتاژ ورودی ماژول‌های خورشیدی همواره در محدوده مجاز اینورتر قرار گیرند. با توجه به ولتاژ حداکثری ۱۴۵ ولت اینورتر و ولتاژ مدار باز ۳۷٫۷ ولت ماژول‌های خورشیدی، تعداد حداکثر ماژول‌های سری از رابطه

$$N_{series, max}^{pv} = \frac{V_{oc, inv}}{V_{oc, pv}} = \frac{155}{37.7} = 4.11 \approx 4$$

به دست می‌آید که در این

رابطه حداکثر تعداد ماژول‌های سری شده در یک ردیف هستند. جهت جلوگیری از افت توان انتقالی از ماژول‌های خورشیدی تا اینورتر و همچنین سهولت در سربندی ماژول‌ها، استفاده از حداکثر تعداد ماژول‌ها به صورت سری توصیه می‌شود. با توجه به انتخاب تعداد چهار ماژول در هر ردیف، تعداد بهینه ۱۳ عدد ماژول را نمی‌توان مورد استفاده قرار داد و به همین دلیل نزدیک‌ترین مضرب چهار بزرگ‌تر از مقدار بهینه ماژول‌ها انتخاب می‌گردد که در این مطالعه موردی ۱۶ عدد ماژول خورشیدی مورد قبول است. نهایتاً جهت پیاده‌سازی عملی سیستم انرژی‌های تجدید پذیر، تجهیزات مورد نیاز طبق جدول (۷) در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۷): سناریو عملی و اجرایی در مطالعه موردی

ردیف	عنوان	واحد	سناریو عملی
۱	ماژول خورشیدی	تعداد	۱۶
	۲۵۰ وات		
۲	توربین بادی	تعداد	۱
	۱۲۰۰ وات		
۳	باتری	تعداد	۲۸
	۱۰۰ آمپر ساعت		
۴	اینورتر	کیلووات	۴

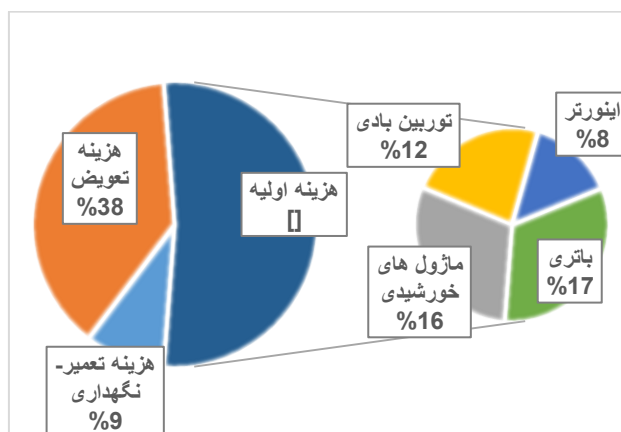
در ادامه شکل (۱۳) فضای بیرونی و شکل‌های (۱۴) و (۱۵) فضای داخلی سیستم‌های انرژی تجدید پذیر ترکیبی نصب شده در مطالعه موردی را نشان می‌دهند.



شکل (۱۳): نمای کلی سیستم نصب شده در مطالعه موردی

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود معمولاً در طول شب که تولید توان کم است، بار مصرفی از طریق انرژی ذخیره شده در باتری‌ها تأمین می‌گردد. به همین دلیل شارژ باتری‌ها به‌مرور زمان در طول شب افت می‌کند و این روند تا زمان طلوع آفتاب ادامه دارد. با طلوع آفتاب و افزایش شدت تابش، تولید ماژول‌های خورشیدی افزایش یافته و در کنار توان تولیدی توربین بادی، شارژ باتری‌ها افزایش پیدا می‌کند. واضح است که همواره تقاضای بار توسط تولید انرژی توربین بادی، ماژول‌های خورشیدی و دشارژ باتری، تأمین می‌گردد و هنگامی که تولید انرژی بیش از تقاضای انرژی است، مازاد آن به صورت انرژی شارژ به باتری‌های تزریق می‌شود.

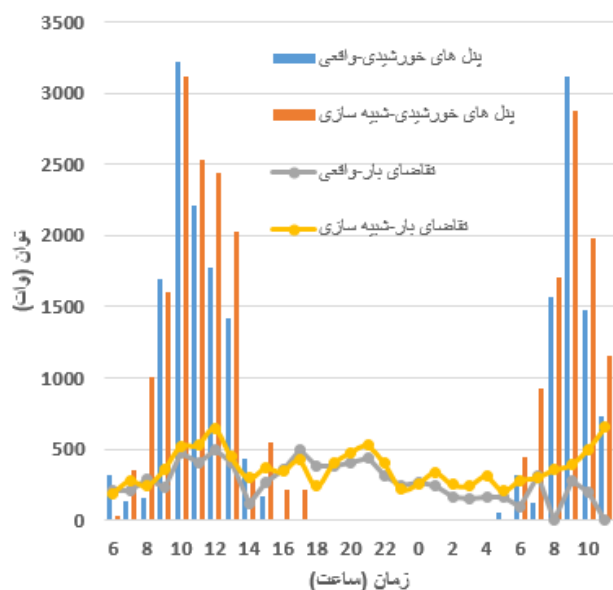
شکل (۱۲) نمودار دایره‌ای هزینه‌های سیستم انرژی‌های تجدید پذیر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد هزینه تعمیر-نگهداری در طول دوره عمر بسیار کمتر از سایر هزینه‌ها است که دلیل آن عدم نیاز به تعمیر-نگهداری تجهیزاتی مانند ماژول‌های خورشیدی و باتری و اینورتر است. بخش اعظم خالص هزینه‌های فعلی شامل هزینه اولیه است که حدود ۵۳ درصد از هزینه‌ها را تشکیل می‌دهد و در این بین ماژول‌های خورشیدی و باتری، ۳۳ درصد از کل هزینه‌های دوره عمر را تشکیل می‌دهند که بسیار قابل توجه است. در واقع یکی از مهم‌ترین دلایلی که باعث کاهش سرعت رشد انرژی‌های تجدید پذیر مستقل از شبکه در سراسر جهان و کشور ایران شده است، هزینه اولیه نسبتاً زیاد آن نسبت به دیزل ژنراتور است. این در حالی است که هزینه‌های ناشی از خرابی‌های پی‌درپی و تأمین سوخت دیزل ژنراتور، هزینه‌های بسیار زیادی را متحمل سیستم خواهد کرد.



شکل (۱۲): تقسیم‌بندی هزینه‌های دوره عمر انرژی‌های تجدید پذیر

۵- اجرای عملی پروژه

با توجه به مشخصات فنی تجهیزات مختلف، پیاده‌سازی عملی سیستم انرژی‌های تجدید پذیر با محدودیت‌هایی مواجه است که باید به آن توجه کرد. با توجه به ولتاژ کاری ۴۸ ولت اینورتر، لازم است مجموعه باتری‌ها نیز به صورت باس ۴۸ ولت سربندی شوند. بدین



شکل (۱۶): مقایسه داده‌های واقعی و داده‌های شبیه‌سازی در مطالعه موردی

همچنین تقاضای بار در حالت شبیه‌سازی تا حد زیادی نزدیک به تقاضای بار واقعی است. علت این اختلاف ناچیز مربوط به عدم نصب دستگاه ثبت داده^{۱۹} است. یکی از راهکارهای افزایش دقت تخمین تقاضای بار، استفاده از تکنیک عدم قطعیت در سمت تقاضا است. راهکار دیگر آن، برداشت داده‌های کوتاه‌مدت بار مصرفی به کمک دستگاه ثبت داده و تخمین بار مصرفی روزها و ماه‌های آینده توسط روش‌های هوشمند است. جدول (۸) بررسی‌های آماری روی تقاضای بار در این ۳۰ ساعت را نشان می‌دهد.

جدول (۸): بررسی آماری روی داده‌ها تقاضای بار

عنوان	مجموع انرژی	میانگین تقاضای بار	واریانس	انحراف از معیار
تقاضای بار شبیه‌سازی	۱۰۹۸۰	۳۶۶	۱۵۰۲۶	۱۲۲
تقاضای بار واقعی	۸۱۲۰	۲۷۱	۱۷۴۶۰	۱۳۲

در شبیه‌سازی صورت گرفته، با توجه به اینکه یکی از قیود مسئله تأمین تقاضای بار است، همواره میزان انرژی تولیدی (و همچنین انرژی در دسترس باتری‌ها) در هر لحظه بیش از تقاضای بار است و تقاضای بار همواره پاسخ داده می‌شود و هیچ‌گاه انرژی موجود در بانک باتری‌ها کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت نمی‌شود. این در حالی است که اگر در واقعیت بار مصرفی بیش از تقاضای بار پیش‌بینی شده باشد (ممکن است وسیله پرمصرفی همچون کف کش جهت انتقال آب به تانکر مورد استفاده قرار بگیرد)، بار مصرفی توسط اینورتر و انرژی موجود در باتری‌ها تأمین می‌گردد و ممکن است در صورت تداوم این موضوع، انرژی موجود در بانک باتری‌ها به کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت برسد. حداکثر ولتاژ بانک باتری‌ها تا ۴۲ ولت افت کند که این عدد حد بحرانی برای باتری‌ها محسوب می‌گردد. یک از قابلیت‌های مهم و کارا



شکل (۱۴): مجموعه باتری‌های نصب شده در مطالعه موردی



شکل (۱۵): مجموعه اینورتر و شارژ کنترلر نصب شده در مطالعه موردی

به دلیل ماهیت عملی و اجرایی این پژوهش، مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی سیستم نصب شده در این مطالعه موردی، با یکدیگر مقایسه و نکات و چالش‌های آنان بررسی گردد. متأسفانه به دلیل نبود امکانات و تجهیزات، از مجموع همه دیتاهای ممکن تنها داده‌های ۳۰ ساعت از سیستم نصب شده در دسترس هستند. این داده‌ها پس از تکمیل و راه‌اندازی سیستم، از ساعت ۶ روز ۱۳۹۶/۹/۱۵ تا ساعت ۱۱ روز ۱۳۹۶/۹/۱۶ توسط یک رایانه شخصی و از طریق اتصال به اینورتر-شارژر به دست آمده است. در شکل (۱۶) به دلیل امکان نبودن اتصال شارژ کنترلر توربین بادی به رایانه شخصی و نهایتاً عدم برداشت داده‌های واقعی، میزان تولید توربین بادی مورد بررسی قرار نگرفته است. لازم به ذکر است که در ساعات ۱۶ و ۱۷ روز ۱۳۹۶/۹/۱۵ به دلیل اعمال تغییرات و تعمیرات در سیستم، مجموعه پنل های خورشیدی به مدت ۲ ساعت مدار باز بودند. به همین دلیل میزان تولید پنل های خورشیدی در ساعت‌ها ۱۶ و ۱۷ مقدار صف ثبت شده است.

همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود، میزان تولید پنل های خورشیدی در حالت شبیه‌سازی و واقعی، اختلاف کمی دارند. علت این اختلاف مربوط به تخمین داده‌های تابش خورشید توسط ناسا و داده‌های واقعی تابش خورشید است. یکی از راهکارهای کاهش این اختلاف، بررسی عدم قطعیت سمت تولید به کمک توابع احتمالاتی است. راهکار دیگر آن، استفاده از دستگاه solar meter است که با توجه به قیمت دستگاه و اینکه داده‌های بلندمدت آن معتبر است، روشی کارا محسوب نمی‌شود.

نهایتاً منزل مسکونی موردنظر توسط ۴ کیلووات پنل خورشیدی، ۲۸ عدد باتری سیلد اسید، توربین بادی ۱۲۰۰ وات و اینورتر ۴ کیلوواتی به صورت عملی پیاده‌سازی گردید. بدین ترتیب هزینه‌های سیستم انرژی‌های تجدید پذیر با ۳۵ درصد کاهش به بهره‌برداری رسید. جهت کاهش هزینه احداث و بهره‌برداری پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، مطالعات مرتبط با مدیریت بار صورت گیرد و مدیریت مصرف در سمت تقاضا اعمال گردد. همچنین جهت افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی و افزایش اعتبار آن، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی عدم قطعیت در سمت تولید و تقاضا بررسی گردد.

مراجع

- [1] D. Fadai, "The feasibility of manufacturing wind turbines in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 3, pp. 536-542, 2007/04/01/ 2007.
- [2] I. Janghorban Esfahani, P. Ifaei, J. Kim, and C. Yoo, "Design of Hybrid Renewable Energy Systems with Battery/Hydrogen storage considering practical power losses: A MEPoPA (Modified Extended-Power Pinch Analysis)," *Energy*, vol. 100, pp. 40-50, 2016/04/01/ 2016.
- [3] R. Ghaffarpour, B. Mozafari, A. M. Ranjbar, and T. Torabi, "Resilience oriented water and energy hub scheduling considering maintenance constraint," *Energy*, vol. 158, pp. 1092-1104, 2018/09/01/ 2018.
- [4] G. Najafi, B. Ghobadian, R. Mamat, T. Yusaf, and W. H. Azmi, "Solar energy in Iran: Current state and outlook," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 931-942, 2015/09/01/ 2015.
- [5] R. Hosseinalizadeh, H. Shakouri, G. Mohsen S. Amalnick, and P. Taghipour, "Economic sizing of a hybrid (PV-WT-FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 139-150, 2016/02/01/ 2016.

[۶] "راهنمای طراحی سیستم‌های فتوولتائیک به منظور تأمین انرژی الکتریکی به تفکیک اقلیم و کاربری" معاونت نظارت راهبردی، امور نظام فنی، وزارت نیرو، پژوهشگاه نیرو، تهران ۱۳۹۳، www.nri.ac.ir

- [7] E. M. Galán and G. Wetstone, "renewables 2017 Global Status Report (GSR)," *Renewable Energy policy Network for the 21st Century*, 2017. Available: <http://ren21.net/gsr-2017>.
- [8] K. Takahashi, "Sunshine project in Japan - solar photovoltaic program," *Solar Cells*, vol. 26, no. 1-2, pp. 87-96, 2// 1989.
- [9] L. Ferrer-Martí, B. Domenech, A. García-Villoria, and R. Pastor, "A MILP model to design hybrid wind-photovoltaic isolated rural electrification projects in developing countries," *European Journal of Operational Research*, vol. 226, no. 2, pp. 293-300, 2013/04/16/ 2013.
- [10] T. Beck, H. Kondziella, G. Huard, and T. Bruckner, "Assessing the influence of the temporal resolution of electrical load and PV generation profiles on self-consumption and sizing of PV-battery systems," *Applied Energy*, vol. 173, pp. 331-342, 2016/07/01/ 2016.
- [11] A. Khosravi, R. N. N. Koury, L. Machado, and J. J. G. Pabon, "Energy, exergy and economic analysis of a

در اینورتر مطالعه موردی، قابلیت تغییر ولتاژ قطع باتری^{۲۰} است که در حالت تنظیمات پایه، بر روی عدد ۴۲ ولت ثابت شده است و قابلیت تغییر از ۴۰ تا ۴۸ ولت را دارد. ولتاژ قطع باتری‌ها در این مطالعه موردی رو عدد ۴۴ ولت تنظیم شده است. توصیه می‌گردد که ولتاژ قطع باتری هیچ‌گاه کمتر از ۴۲ ولت نباشد.

۶- تجربه‌ها و پیشنهادهای اجرای عملی انرژی‌های تجدید پذیر

پس از شبیه‌سازی سیستم‌های انرژی تجدید پذیر، فاز عملی پروژه شروع می‌گردد. لازم است پیش از نصب سیستم انرژی‌های تجدید پذیر، نکات زیر رعایت شود:

۱. پیش از اجرای عملی، لازم است مجری پروژه، بازدید میدانی از محل موردنظر داشته باشد و سایه‌اندازی موانع و ساختمان‌ها در محوطه (به صورت بصری و همچنین شبیه‌سازی) و مسیر طلوع و غروب خورشید بررسی و در صورت وجود پتانسیل بادی در محل، شبیه‌سازی‌های مرتبط با اثر اغتشاش باد صورت گیرد. متأسفانه در مطالعه موردی پیش رو، مطالعات اغتشاش و آشفته‌گی باد در محل احداث پروژه صورت نگرفت و باعث از بین رفتن کامل توربین بادی شد.
۲. محل انتخابی جهت نصب پنل‌ها، باید حتی‌الامکان نزدیک به محل نصب اینورتر باشد. فاصله زیاد از اینورتر، باعث افت ولتاژ شدید شده و افزایش تلفات و نهایتاً کاهش بازدهی سیستم را کاهش می‌دهد.
۳. پیش از اجرای پروژه، بسیار مهم است که اصلاح مصرف‌کننده‌های الکتریکی صورت گیرد. بدین معنا که تجهیزات پرمصرف قدیمی و با راندمان پایین از مدار خارج و تجهیزات کم‌مصرف با راندمان بالا جایگزین آن‌ها شوند. در مورد پروژه اجرا شده، لامپ‌ها و نورافکن کم‌مصرف ال ای دی جایگزین لامپ‌ها و نورافکن پرمصرف متال هالاید قدیمی شدند.

۷- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر انرژی‌های تجدید پذیر رشد قابل توجهی را در سراسر دنیا داشته‌اند. یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه طراحی سیستم انرژی‌های تجدید پذیر، به دست آوردن ظرفیت بهینه تجهیزات است و خوشبختانه پژوهش‌های زیادی در این زمینه صورت گرفته است، اما متأسفانه هیچ‌یک از آن‌ها نتایج شبیه‌سازی‌شده را به صورت عملی و در قالب یک پروژه اجرا نمی‌کنند. در این پژوهش به طراحی بهینه و پیاده‌سازی عملی سیستم‌های انرژی تجدید پذیر و مدل‌سازی ریاضی تجهیزات مختلف سیستم پرداخته شد و تابع هدف خالص ارزش فعلی هزینه‌ها توسط نرم‌افزار GAMS کمینه‌سازی شد.

Islande Multisource combined Power system using Genetic Algorithm (GA)," *jiaeee*, vol. 3, no. 2, pp. 24-32, 2006.

- [26] P. Peerapong and B. Limmeechokchai, "Optimal electricity development by increasing solar resources in diesel-based micro grid of island society inThailand," *Energy Reports*, vol. 3, pp. 1-13, 2017/11/01/ 2017.

¹ Kiyoshi Takahashi

² Agency of Industrial Science and Technology

³ Peru

⁴ Mixed Integer Linear Programming (MILP)

⁵ Loss of Power Supply Probability (LPSP)

⁶ State Of Charge (SOC)

⁷ Temperature coefficient of maximum power

⁸ Cut-in speed

⁹ Cut-out speed

¹⁰ Start-up speed

¹¹ Wind turbulence

¹² Depth Of Discharge

¹³ Net Present Value (NPV)

¹⁴ Annual interest rate

¹⁵ Inflation rate

¹⁶ Capital Recovery Factor

¹⁷ National Aeronautics and Space Administration

¹⁸ Cost Of Energy

¹⁹ Data logger

²⁰ Battery cut-off voltage

hybrid renewable energy with hydrogen storage system," *Energy*, vol. 148, pp. 1087-1102, 2018/04/01/ 2018.

- [12] T. Hamada and R. Matsushia, "Optimal Operation for Integrated Residential Distributed Energy Resources Considering Internal Reserve," *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 250-254, 2017/12/01/ 2017.
- [13] M. Azaza and F. Wallin, "Multi objective particle swarm optimization of hybrid micro-grid system: A case study in Sweden," *Energy*, vol. 123, pp. 108-118, 2017/03/15/ 2017.
- [14] A. Kaabeche, M. Belhamel, and R. Ibtouen, "Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system," *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 1214-1222, 2011/02/01/ 2011.
- [15] M.-A. Yazdanpanah Jahromi and S. M. Barakati, "A New Perspective in Design and Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems: Consideration of Supply/Demand Match Evaluation Criteria together with the reliability of the system," *jiaeee*, vol. 13, no. 3, pp. 37-48, 2016.
- [16] M. Parvizmosaed, F. Farmani, A. Anvari-Moghaddam, A. Rahimi-kian, and H. Monsef, "A Multi-Objective Algorithm for Sizing and Sizing of Renewable Resources in Distribution Network Considering Load Model," *jiaeee*, vol. 12, no. 1, pp. 59-68, 2015.
- [17] D. Saba, F. Z. Laallam, A. E. Hadidi, and B. Berbaoui, "Optimization of a Multi-sourceSystem with Renewable Energy Based on Ontology," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 608-615, 2015/08/01/ 2015.
- [18] D. Guangqian, K. Bekhrad, P. Azarikhah, and A. Maleki, "A hybrid algorithm based optimization on modeling of grid independent biodiesel-based hybrid solar/wind systems," *Renewable Energy*, vol. 122, pp. 551-560, 2018/07/01/ 2018.
- [19] A. Abbassi, M. A. Dami, and M. Jemli, "A statistical approach for hybrid energy storage system sizing based on capacity distributions in an autonomous PV/Wind powergeneration system," *Renewable Energy*, vol. 103, pp. 81-93, 2017/04/01/ 2017.
- [20] R. P. Tim Olsen, "Small Wind Site Assessment Guidelines," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Denver West Parkway Golden2015, Available: www.nrel.gov/publications.
- [21] M. H. Amrollahi and S. M. T. Bathaee, "Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response," *Applied Energy*, vol. 202, pp. 66-77, 9/15/ 2017.
- [22] M. Boxwell, *Solar Electricity Handbook*. Greenstream Publishing, 2011.
- [23] A. Haghighat Mamaghani, S. A. Avella Escandon, B. Najafi, A. Shirazi, and F. Rinaldi, "Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia," *Renewable Energy*, vol. 97, no. Supplement C, pp. 293-305, 2016/11/01/ 2016.
- [24] R. Dufo-López, I. R. Cristóbal-Monreal, and J. M. Yusta, "Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation," *Renewable Energy*, vol. 94, no. Supplement C, pp. 280-293, 2016.
- [25] A. Shahirinia, S. M. Moghadas Tafreshi, A. Hajizadeh, and A. Mpghadamjoo, "Optimal Design of