

## امکان‌سنجی و آنالیز سامانه هیبریدی باد-خورشیدی-دیزل

### (مطالعه موردی: منطقه روستایی شهرستان دامغان)

قاسم نجفی<sup>۱</sup>، مجید خانعلی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

ghasem.najafi@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران،

کرج، ایران

khanali@ut.ac.ir

چکیده: برق‌رسانی به روستا و مناطق دورافتاده، با اتصال به شبکه محدود و یا بدون اتصال به شبکه، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در کشورهای در حال توسعه مانند ایران است. از طرفی در ایران، بیشتر نیاز الکتریسیته به واسطه مولدهای دیزل تأمین می‌شود. مولدهای دیزل نگرانی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی زیادی دارند که توسط استفاده از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر هیبریدی به حداقل رسیده‌اند. این مقاله به کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر به منظور تأمین نیاز الکتریسیته یک روستا با جمعیت ۱۰ خانواده در شهرستان دامغان پرداخته است. برای گسترش کنترل سیستم بهینه بر اساس استراتژی مدیریت بار از مدل نرم‌افزاری هومر استفاده شده است. در این مقاله، تحقیقی درباره آنالیز کارایی یک سیستم انرژی هیبریدی باد/فتوولتاییک/دیزل و باتری است. نتایج حاصل نشان داد که هزینه خالص فعلی سیستم \$ ۷۵۳۱۵ و میزان انتشارات آلاینده‌ها برابر  $6470 \text{ kg/yr}$  است؛ که منجر به کاهش انتشارات آلاینده‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های رایج می‌شود. سیستم انرژی هیبریدی تحلیل شده ممکن است برای سایر مناطق ایران که در وضعیت اقلیمی مشابهی قرار دارند کارآمد باشد.

واژه‌های کلیدی: سیستم انرژی هیبریدی، نرم‌افزار هومر، بهینه‌سازی، فتوولتاییک، باد، دیزل ژنراتور.

\* نویسنده مسئول

۱. مقدمه

خاطر اینکه منابع آن به‌طور پیوسته و بادوام نیست، برای تولید انرژی راه‌حل مناسبی نیست. یک سیستم هیبریدی ماندگار و اقتصادی با ترکیب منابع انرژی به‌همراه یک واحد پشتیبان می‌تواند این موارد را حل کند [۹]. فعالیت یک مولد دیزل به‌همراه یک سامانه هیبریدی قابلیت سامانه را افزایش می‌دهد و منجر به هزینه‌های کمتر تولید انرژی می‌شود. بهینه‌سازی ابعاد اجزای یک سامانه هیبریدی برای تأمین احتیاجات با کمترین سرمایه‌گذاری و هزینه‌های کارکرد می‌تواند بزرگ‌ترین چالش هر سامانه باشد [۱۰]. ترکیب دیزل ژنراتور با فتوولتاییک و سیستم بادی برای تضمین حداقل مصرف سوخت دیزل باعث حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی و کاهش ردپای کربن از سیستم می‌شود [۱۱]. با استفاده از ترکیب باد-دیزل-فتوولتاییک می‌توان روشی مطمئن‌تر برای تأمین تقاضای برق از مناطق دورافتاده در مقایسه با سیستم‌های خورشیدی، یا بادی تنها ایجاد کرد [۱۲]. بهترین وسیله برای اینکه مزارع کشاورزی را از سیستم‌های متصل به شبکه مرسوم، مستقل و غیروابسته کنیم، انرژی‌های تجدیدپذیر به‌صورت سیستم‌های مستقل‌اند که به‌صورت پیوسته می‌توانند برق را تأمین کنند [۱۰]. علاوه بر آن، تلاش‌هایی در زمینه فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر مستقل مانند سیستم مسکونی توان‌دهی خورشیدی و سیستم‌های کوچک توان آبی، تمرکز یافته است؛ اما این سیستم اغلب برای مصرف‌کننده‌های در دسترس نیستند و فقط بر این منابع محدود تکیه دارند. محققان و مدل‌سازان بخش انرژی برای مدل‌سازی از ابزار و برنامه‌های گوناگونی استفاده کرده‌اند تا عملکرد و قابلیت اعتماد این سیستم‌ها را سنجیده، ابزارهای مدل‌سازی انرژی نرم‌افزار هومر که اهداف مدل‌سازی بهینه‌سازی توسط محققان استفاده شده است. ابزار بهینه‌سازی سیستم برای امکان‌سنجی پروژه به‌وسیله آزمایشگاه انرژی تجدیدپذیر آمریکا توسعه یافته است. این ابزار می‌تواند تمام انواع فناوری‌های نوظهور چون فتوولتاییک، باد، سلول سوختی، هیدرو و... را به کار ببرد و می‌تواند شبیه‌سازی ساعت‌به‌ساعت انجام دهد. این ابزار برای تجزیه و تحلیل امکان‌سنجی و مطالعات سیستم‌های توان‌دهی مستقل در جهان به کار می‌رود. تحقیقاتی درباره استفاده از سیستم‌های مرکب و منفرد انرژی، تاکنون انجام شده است؛ از جمله:

مونوسومای و همکاران [۱۳] آنالیز مقایسه‌ای هزینه‌بر روی سیستم متصل به شبکه یک مرکز سلامت در مناطق روستایی با استفاده از پیل سوختی، به‌وسیله نرم‌افزار هومر انجام داده‌اند. نتایج حاصل از بررسی آن‌ها نشان داد که تأمین برق متصل از منفصل ارزان‌تر است اگر فاصله پایگاه تأمین شبکه بیش از  $4/4 \text{ km}$  باشد.

تخلیه سریع منابع سوخت‌های فسیلی در مقیاس جهانی و افزایش تدریجی تقاضای انرژی و قیمت سوخت‌های فسیلی انگیزه‌ای برای کاهش وابستگی به این سوخت‌ها شده است [۱]. به‌منظور مقابله با موانع فوق مربوط به روش‌های رایج تولید توان برای تهیه تقاضای انرژی در حال حاضر، توسعه سیستم‌های برق بر اساس انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان یک راه حل سبز جلب توجه می‌کند [۲]. منابع انرژی تجدیدپذیر عملاً آن‌قدر فراوان است که می‌تواند بیش از تقاضای برق جهانی انرژی را فراهم کند. همچنین بدون هیچ‌گونه هزینه‌ای می‌تواند به‌عنوان منبع توان استفاده شوند [۳]. در طول چند دهه گذشته منابع انرژی تجدیدپذیر با توجه به اهمیت تولید برق بدون انتشار گازهای گلخانه‌ای و سازگاری با محیط‌زیست و پایان‌ناپذیری طبیعی در حال رشد نشان داده شده است [۴]. علاوه بر این، بخش بزرگی از جمعیت جهان در مناطق روستایی دورافتاده زندگی می‌کنند؛ به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، این مناطق تا حدی به شبکه برق متصل‌اند، ولی توزیع برق در آنجا ضعیف است. زیرا به دلیل ناهمواری‌های جغرافیایی، فقدان زیرساخت‌های الکتریکی و هزینه بالای سرمایه‌گذاری، توزیع و گسترش شبکه در این مناطق به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نیست [۵]. در نتیجه تولید پراکنده، فناوری مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، به نام سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر مستقل است که می‌تواند به‌عنوان گزینه مناسب در مناطق دورافتاده استفاده شود [۶]. گسترش شبکه هنوز به‌عنوان حالت برگزیده برای برق‌دار کردن مناطق روستایی باقی مانده، ولی گسترش شبکه مرکزی برق برای روستاهای دورافتاده و پراکنده جغرافیایی از نظر اقتصادی قابل‌اعتماد است نه از نظر کاربردی، و در بعضی موارد خارج از شبکه می‌تواند مفید باشد [۷]. در برخی از مناطق روستایی برای تأمین نیازهای برقی خود از مولدهای دیزلی استفاده می‌کنند. مولدهای دیزلی مضرات زیادی دارند. دیزل یک سوخت فسیلی است که از سوختن سوخت‌های فسیلی گازهای گلخانه‌ای تولید می‌شود. گازهای گلخانه‌ای منجر به گرمای جهانی می‌شود [۸]. در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت‌های فناوری و سیاست‌های دولت ارتقا استفاده از منابع تجدیدپذیر و در نتیجه کاهش قابل توجه هزینه‌های دستگاه‌های هیبریدی بر پایه انرژی‌های تجدیدپذیر به یک واحد جایگزین و تجاری قابل‌دوام برای تأمین برق مناطق دورافتاده تبدیل شده است. تهیه منابع تجدیدپذیر نامحدود است و قابلیت جایگزین شدن با سوخت‌های متداول را دارد. با این حال استفاده تنها از منابع تجدیدپذیر مانند توربین‌های بادی یا سلول فتوولتاییک مستقل به

برخی از ساعات شبانه روز در دسترس نیستند، ذخیره انرژی برای استفاده در ساعات عدم تولید، امری ضروری محسوب می شود. این در حالی است که هزینه اولیه باتری بسیار بالا و عمر آن بسیار کوتاه است و کسر قابل توجهی از هزینه های سیستم را در بر می گیرد. با توجه به دلایل فوق، پژوهش به سمتی پیش می رود که وابستگی به ذخیره سازی انرژی در سیستم مستقل حداقل گردد.

## ۲. مطالب اصلی

### ۱.۲. منطقه مورد مطالعه و منابع انرژی تجدیدپذیر

شهرستان دامغان در استان سمنان با  $12110 \text{ km}^2$  وسعت واقع شده است. مختصات جغرافیایی آن به طول  $54^\circ$  درجه و  $20'$  دقیقه و  $48^\circ$  ثانیه، عرض  $36^\circ$  درجه،  $9'$  دقیقه و  $48''$  ثانیه، ارتفاع آن از سطح دریا  $1130$  متر و دارای اختلاف ساعتی برابر با  $11$  دقیقه و  $5$  ثانیه است. مطالعه حاضر به منظور تأمین نیاز الکتریسیته روستای عبیرآباد شهرستان دامغان که دارای جمعیتی برابر  $10$  خانواده فعال در زمینه کشاورزی و باغات پسته انجام شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. به لحاظ آب و هوایی شهرستان دامغان به علت وزش بادهای شمالی و بارندگی ناشی از بادهای نواحی گرگان و مازندران زمستان های سرد و تابستان های معتدل دارد؛ و در فصول گرم سال این شهر از خنک ترین شهرهای ایران به شمار می آید [۲۰].



شکل (۱): موقعیت جغرافیای روستای عبیرآباد

داده های مربوط به تابش خورشیدی برای روستای عبیرآباد با استفاده از نرم افزار هومر به دست آمده است. داده های نرم افزار بر اساس داده های هواشناسی ناسا و پایگاه انرژی های تجدیدپذیر تهیه می شود. میانگین تابش سالیانه در شکل (۲) نشان داده شده است و با توجه به موقعیت منطقه مورد مطالعه که به عنوان داده ورودی برای نرم افزار هومر تعریف می شود، اطلاعات مربوط به سرعت باد منطقه را در اختیار ما قرار می دهد. اطلاعات به دست آمده در شکل (۳) نشان داده شده است.

امگیت و همکاران [۱۴] یک طرح بهینه و آنالیز امکان سنجی برای یک جامعه روستایی با فتوولتاییک، زیست سوخت هیدرو و دیزل به عنوان منابع تولید برق برای اوج بار  $55049 \text{ kWh}$  انجام دادند. آن ها با استفاده از شبیه ساز نرم افزار هومر<sup>۱</sup> به این نتیجه رسیدند که سیستم متشکل از  $6 \text{ kWh}$  گاز زیستی،  $16 \text{ kWh}$  زیست سوخت،  $60 \text{ kWh}$  فتوولتاییک و  $10 \text{ kWh}$  ژنراتور دیزل، با قابلیت ذخیره سازی مناسب ترین گزینه برای سطح مورد مطالعه است.

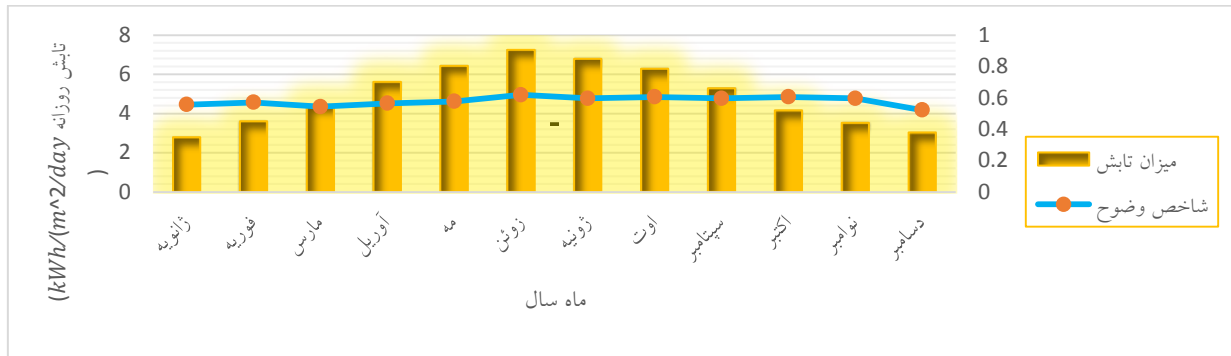
تان و نگان امکان پذیری سامانه های هیبریدی را با استفاده از نرم افزار شبیه سازی HOMER در جوهور بهرو، مالزی تحلیل کردن و نشان دادند که کارایی اقتصادی و محیطی در ساختارهای فتوولتاییک-باد-دیزل-باتری، مزیت دارند و جایگزین مناسبی برای دستگاه ها دیزل تنها هستند [۱۵].

نگن و همکاران سامانه هیبریدی باد و دیزل را در یک روستای توریستی در اسپانیا نصب کردند و عملکرد آن را در حدود یک سال زیر نظر داشتند. آن ها مشاهده کردند که فناوری باد کارایی بهتری را نسبت به سایر سامانه های انرژی نشان می دهد [۱۶].

امکان سنجی توسط بکل و پالم برای تأمین انرژی الکتریکی، با استفاده از سامانه مستقل هیبریدی خورشیدی-باد برای یک جامعه مدل  $200$  خانواده (شامل  $1000$  نفر جمعیت) در یک منطقه خارج از شبکه در اتیوپی انجام پذیرفت؛ با توجه به نتایج حاصل دریافتند که سامانه های هیبریدی مزایای متعددی از نظر بازدهی دارد [۱۷].

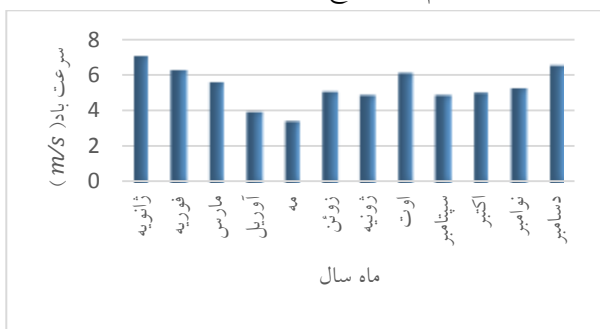
عبدالله و همکاران اظهار داشتند که طرح های قدرت هیبریدی به علت عدم تابش خورشیدی از نظر تأمین برق، به یک مرکز پایدار نسبت به یک سامانه فتوولتاییک مستقل در مناطق روستایی تبدیل می شوند [۱۸].

سراسکانرود و زاهدی به تحلیل فنی و اقتصادی سامانه هیبریدی جدا از شبکه انرژی باد و پیل سوختی در منطقه کوهین قزوین پرداختند؛ نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که استفاده از سامانه هیبریدی باعث افزایش  $2/8$  درصدی ضریب ظرفیت نیروگاه بادی می شود. هزینه انرژی محاسبه شده برای سامانه هیبریدی  $76$  سنت و ارزش فعلی سرمایه  $5235066$  دلار خواهد بود [۱۹]. هدف از این تحقیق، تأمین انرژی الکتریکی روستاهای محروم از شبکه برق شهری با استفاده از یک سیستم هیبریدی شامل منابع انرژی فسیلی و تجدیدپذیر است. یک سیستم هیبریدی برای تأمین تقاضای برق روستای  $10$  خانوار مدل در شهرستان دامغان مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجایی که انرژی های تجدیدپذیر از قبیل باد و خورشیدی در



شکل (۲): میانگین تابش منطقه مورد مطالعه

انرژی مورد نیاز در بخش کشاورزی و مسکونی روزانه برابر با  $79940 \text{ Wh/day}$  و  $138010 \text{ Wh/day}$  است. پروفیل روزانه این روستا در فصل تابستان با هم ترکیب شده و در شکل (۴) نشان داده شده است. بیشترین میزان مصرف برق مربوط به فصل تابستان است؛ زیرا در این فصل تنها فعالیت‌های کشاورزی انجام می‌شود و در فصول زمستان و پاییز تقریباً فعالیت خاصی در بخش کشاورزی صورت نمی‌گیرد و از طرفی بیشترین نیاز مصرفی نیز مربوط به بخش کشاورزی است. پس با تأمین برق در فصل تابستان، در واقع سیستم طراحی شده برای تمام سال پاسخ‌گو خواهد بود.



شکل (۳): میانگین سرعت باد منطقه مورد مطالعه

### ۳.۲. اجزای اصلی سیستم

#### ۱.۳.۲. توربین بادی

در یک توربین بادی، انرژی جنبشی باد به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. مزارع توربین بادی در حال تبدیل شدن به منابع مهم انرژی تجدیدپذیرند و باعث کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تولید گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه کاهش آلاینده‌ها می‌شوند [۲۱]. توربین‌های بادی استفاده شده در این تجزیه و تحلیل دارای ظرفیت ۱ کیلووات و ولتاژ خروجی  $AC^1$  هستند. هزینه سرمایه مرتبط با سیستم انرژی باد شامل هزینه توربین، برج، اینورتر، سیم‌کشی، بسته‌های ضد

### ۲.۲. بار مصرفی

این سیستم مستقل از شبکه برای تأمین نیاز الکتریسیته یک جامعه روستایی کوچک با ۱۰ خانواده طراحی شده است. بار مصرفی مورد نیاز برای منطقه روستایی شامل بخش مربوط به مسکونی و کشاورزی می‌باشد. بار مصرفی محاسبه شده برای هر یک از بخش‌های مسکونی و کشاورزی به ترتیب در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است.

جدول (۱): انرژی الکتریکی مورد نیاز خانگی

شماره	وسایل مورد نیاز	توان مصرفی (W)	تعداد	ساعات کارکرد (h)	مصرف روزانه (Wh/day)
۱	پنکه سقفی	۱۰۰	۲	۱۴	۲۸۰۰
۲	پنکه معمولی	۷۰	۱	۹	۶۳۰
۳	لامپ	۲۴	۴	۹	۸۶۴
۴	تلویزیون	۱۷۵	۱	۴	۷۰۰
۵	یخچال	۱۵۰	۱	۱۲	۱۸۰۰
۶	اتو	۱۲۰۰	۱	۰.۵	۶۰۰
مجموع انرژی مصرفی یک خانواده					۷۹۹۴
مجموع انرژی مصرفی ۱۰ خانواده					۷۹۹۴۰

جدول (۲): انرژی الکتریکی مورد نیاز کشاورزی

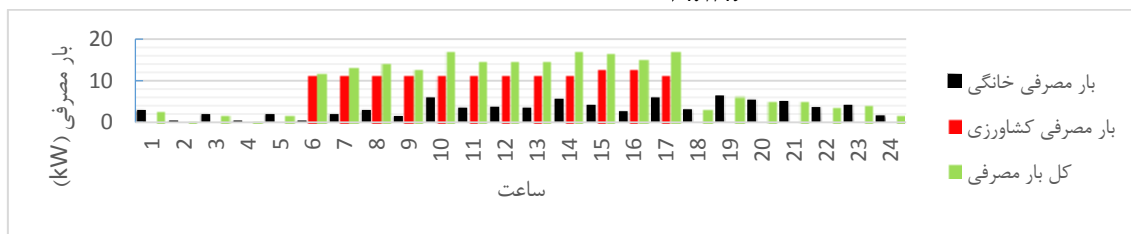
شماره	وسایل کشاورزی	توان مصرفی (W)	تعداد	زمان استفاده	مصرف روزانه (Wh/day)
۱	پمپ آبیاری	۱۱۱۹۰	۱	۶:۰۰ - ۱۸:۰۰	۱۳۴۲۸۰
۲	دستگاه چمنزن	۱۴۰۰	۱	۱۵:۰۰ - ۱۷:۰۰	۲۸۰۰
۳	لامپ	۲۴	۵	۱۸:۰۰ - ۶:۰۰	۷۲۰
۴	پنکه زمینی	۷۰	۱	۱۳:۰۰ - ۱۶:۰۰	۲۱۰
مجموع انرژی الکتریکی در بخش کشاورزی					۱۳۸۰۱۰

خوردگی و هزینه نصب می‌شود. هزینه سرمایه کل یک توربین یک کیلوواتی \$ ۲۰۰۰ است؛ هزینه جایگزینی و تعمیر نگهداری نیز به ترتیب \$ ۱۴۰۰ و \$ ۴۰۰ است [۱۰].

**۲.۳.۲ ژنراتور**

طیف گسترده‌ای از ژنراتورها در دسترس هستند. هزینه سرمایه‌گذاری برای طیف دیزل ژنراتورهای تجاری در دسترس از \$/kWh ۸۰۰ تا

هزینه دیزل ژنراتور گرفته شده برای این تجزیه و تحلیل \$/kW ۱۰۰۰ لحاظ شده است. هزینه نگهداری و جایگزینی به ترتیب \$/hr ۰/۰۲ و \$/kW ۹۰۰ در نظر گرفته شده است. طول عمر ژنراتور ۱۵۰۰۰ ساعت ارزیابی شده است [۲۲].



شکل (۴): پروفیل بار مصرفی روزانه

### ۴.۳.۲ باتری

به دلیل طبیعت متناوب سیستم بادی خورشیدی، اهمیت استفاده از سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی برای ایجاد توان پیوسته نمایان می‌شود. با توجه به اهمیت اقتصادی در این تجزیه و تحلیل، از باتری اسید سرب برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده شده است. باتری مدل Surrette6CS25P با ظرفیت ۱۴۰۰ آمپر ساعت انتخاب شده است. هزینه نصب و راه‌اندازی و هزینه جایگزینی آینده به ترتیب برابر ۱۲۰۰ و ۱۱۰۰ دلار در هر کیلووات تخمین زده می‌شود. هزینه تعمیر و نگهداری ۱۰ دلار بر ساعت است [۲۴].

### ۳.۳.۲ ماژول فتوولتائیک

سیستم‌های فتوولتائیک یکی از منابع مهم انرژی تجدیدپذیرند که با استفاده از انرژی خورشیدی برق جریان مستقیم تولید می‌کنند. پنل‌های خورشیدی از سلول‌های فتوولتائیک مخصوص ساخته شده و به یکدیگر وصل شده‌اند. معمولاً به صورت ولتاژ ۱۲V دسته‌بندی می‌شوند. ولتاژهای بالاتر نیز در دسترس است. هزینه خرید نصب و راه‌اندازی برای یک کیلووات آرایه فتوولتائیک در ایران، \$ ۳۵۰۰ فرض می‌شود؛ و در این فرض هزینه نگهداری سالانه ۲۵ دلار بر کیلووات است [۲۳]. در این مطالعه، از ۶ آرایه در اندازه‌های (۱، ۲، ۳، ۴، ۶، ۸) کیلووات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. طول عمر سیستم فتوولتائیک ۲۰ سال فرض شده است.

جدول (۳): داده‌های ورودی نرم‌افزار هومر

اجزا	مدل یا اندازه	طول عمر	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه جایگزینی	هزینه تعمیر و نگهداری	مقدار
فتوولتائیک	۱-۲-۳-۴-۶-۸ kW	۲۰ yr	\$/kW ۳۵۰۰	\$/kW ۳۵۰۰	\$/kW/yr ۲۰	-
دیزل ژنراتور	۲-۴-۶-۸-۱۲ kW	۱۵۰۰۰ hr	\$/kW ۱۰۰۰	\$/kW ۱۵۰۰	\$/hr ۰/۰۲	-
توربین بادی	Generic 3 kW	۲۰ yr	\$/Turbin ۶۵۰۰	\$/Turbin ۶۰۰۰	\$/Turbin/yr ۲۰۰	۱-۲-۳-۵-۶-۸
مبدل قدرت	۲-۴-۶-۸-۱۲ kW	۱۵ yr	\$/kW ۹۰۰	\$/kW ۸۰۰	\$/kW/yr ۴۰	-
باتری	Surrette 6CS25P (6V , 1156 Ah)	۹۶۴۵ kWh	\$/kW ۱۲۰۰	\$/kW ۱۱۰۰	\$/hr ۵۰	۴-۸-۱۲-۱۴-۱۶-۲۰

AC هزینه اولیه خرید ۹۰۰ دلار در نظر گرفته شده است. هزینه جایگزینی ۸۰۰ دلار و طول عمر مبدل توان ۱۵ سال در نظر گرفته شده است. همچنین مبدل‌ها با اندازه‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۲ برای تعیین

### ۵.۳.۲ مبدل قدرت

برای یک مبدل قدرت به منظور حفظ جریان بین منابع قدرت<sup>۱</sup> DC به

1. Direct Current

سرعت باد، میانگین متوسط تابش روزانه، قیمت دیزل و بیشینه کمبود ظرفیت سالیانه به‌عنوان پارامترهای حساسیت سیستم در نظر گرفته شده است. رایج‌ترین مقدار برای کمبود ظرفیت سالیانه برابر صفر است. موقعی که برابر صفر قرار می‌دهیم باید سیستم قدرت ۱۰۰٪ بار الکتریکی و همچنین مقدار انرژی لازم برای ذخیره‌سازی را تأمین کند. از سوی دیگر اگر بخواهیم برخی از تقاضای بار برآورده نشود، می‌توان مقادیر خاصی برای کمبود ظرفیت سالیانه گرفت. اگر شما میزان کمبود ظرفیت سالیانه را ۵٪ بگیرید، در واقع سیستم ۹۵٪ از بار الکتریکی سالانه به‌علاوه مقدار ذخیره انرژی را تأمین می‌کند. مقادیر در نظر گرفته شده برای آنالیز حساسیت در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۴): پارامترهای حساسیت

میانگین تابش خورشیدی ( $kWh/m^2$ )	سرعت متوسط باد ( $m/s$ )	کمبود ظرفیت سالیانه (%)	قیمت دیزل ( $\$/lit$ )
۳	۳	۰	۰/۵
۵/۴۲	۴	۱۵	۱
۶/۵	۵/۴۲	۳۰	۱/۵
	۶/۵	۴۵	۲

### ۳. نتایج و بحث

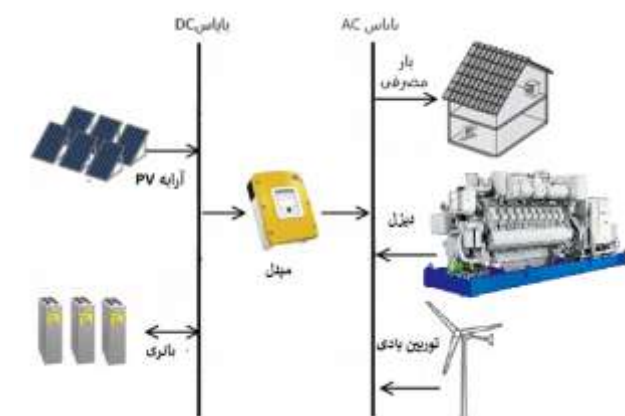
#### ۱.۳. نتایج بهینه مربوط به نرم‌افزار هومر

با توجه به وضعیت آب‌وهوایی و محیطی منطقه، یعنی موقعی که میزان تابش متوسط خورشید در روز  $4.35 kWh/m^2$ ، و میانگین سرعت باد  $4.75 m/s$ ، قیمت سوخت دیزل  $0.16 \$/lit$  و کمبود ظرفیت سالانه صفر در نظر گرفته شود. سیستم بهینه پیشنهادی نرم‌افزار هومر شامل  $3 kW$  آرایه فتوولتاییک، یک توربین بادی  $3 kW$ ،  $2 kW$  دیزل ژنراتور، ۶ عدد باتری Scc25P و  $3 kW$  کانورتر است. مشخصات کلی سیستم در جدول (۵) ارائه شده است. هزینه خالص فعلی سیستم  $3125 \$$  دلار، هزینه انرژی  $0.45$  و هزینه عملیاتی سیستم  $3125 \$$  است. میزان الکتریسیته تولیدی هریک از اجزا به‌طور خلاصه در شکل (۶) نشان داده شده است.

اندازه بهینه لحاظ شده‌اند [۲۱]. مشخصات کلی به‌همراه پارامترهای ورودی نرم‌افزار در جدول (۳) گزارش شده است.

#### ۴.۲. پیکربندی سیستم هیبریدی

پنل‌های خورشیدی و توربین بادی، دو گزینه اصلی تأمین انرژی الکتریکی از انرژی‌های تجدیدپذیرند. استفاده هم‌زمان از این دو منبع انرژی، احتمال تأمین بار مورد نیاز مصرف‌کننده در ساعات مختلف شبانه‌روز را افزایش می‌دهد؛ اما همواره مصرف‌کننده در ساعتی از شبانه‌روز با عدم تأمین انرژی توسط منابع تجدیدپذیر مواجه خواهد شد. لذا باطری به‌عنوان ذخیره‌کننده انرژی در ساعتی که انرژی مورد نیاز بیش از مصرف است، مورد استفاده قرار گرفته و همچنین دیزل ژنراتور برای زمان‌هایی که سایر منابع قادر به تأمین مصرف‌کننده نیستند، در سیستم هیبریدی استفاده می‌شود. پیکربندی سیستم هیبریدی پیشنهادی در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل (۵): طرح‌واره سیستم هیبریدی

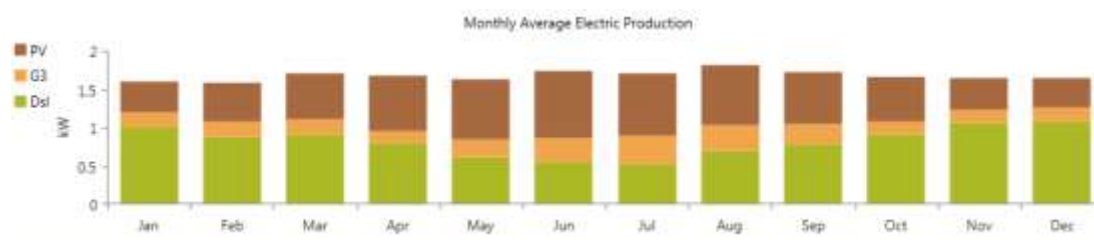
#### ۵.۲. پارامترهای حساسیت

به‌منظور تجزیه و تحلیل حساسیت، چند مقدار برای هریک از متغیرهای ورودی در نرم‌افزار هومر تعریف می‌شود. نرم‌افزار با تکرار فرایند بهینه‌سازی برای هریک از مقادیر متغیرها، اثر آن‌ها را روی نتایج بررسی می‌کند. متغیرهای حساسیت، همان متغیرهای ورودی هستند که چندین مقدار خاص برای هریک جزء از سیستم وارد شده است؛ می‌توان متغیرهای حساسیت مختلفی را با توجه به نوع سیستم مدنظر تعریف کرد. نرم‌افزار هومر قابلیت‌های گرافیکی قدرتمندی به‌منظور بررسی نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل حساسیت در اختیار ما قرار می‌دهد.



جدول (۵): نتایج سیستم بهینه پیشنهادی نرم افزار هومر

دی اکسید گوگرد ( $kg/yr$ )	اکسید نیتروژن ( $kg/yr$ )	کربن مونواکسید ( $kg/yr$ )	انتشارات کربن دی اکسیدی ( $kg/yr$ )	هزینه سرمایه گذاری \$	هزینه عملیاتی \$/yr	LCOE \$/kW	TNPC \$	باتری	کانتورتر (kW)	دیزل ژنراتور (kW)	توربین بادی 3 kW	فتولتائیک (kW)
۱۲/۶۸	۱۳۹/۰۳	۱۵/۸۵	۶۳۱۲	۳۴۹۰۰	۳۱۲۶	۰/۴۵۶	۷۵۳۱۵	۶	۳	۲	۱	۳



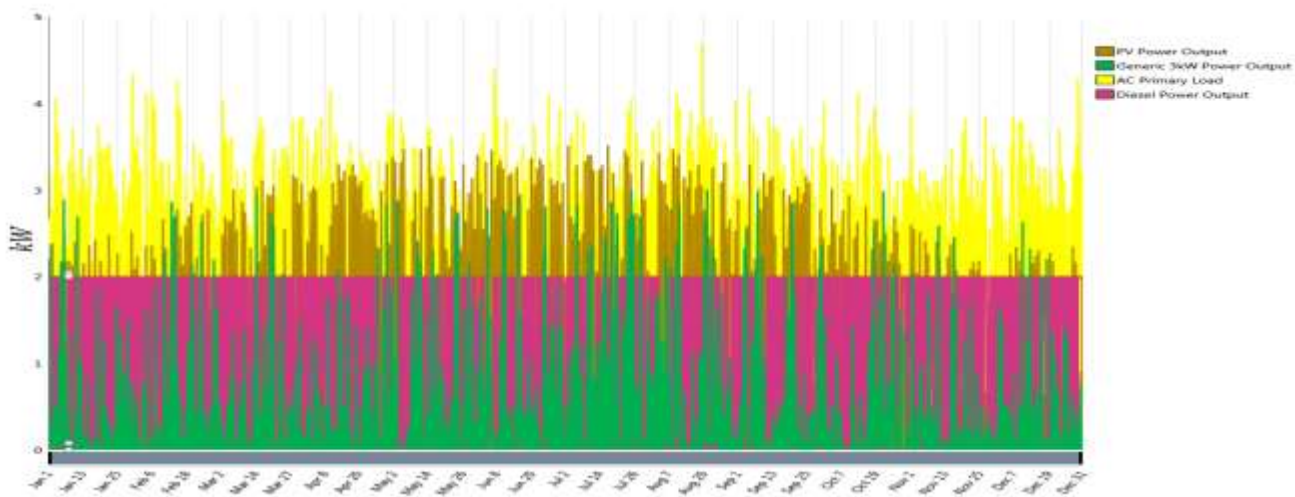
شکل (۶): میانگین الکتریسیته تولیدی ماهیانه

yr	۹	عمر مورد انتظار
----	---	-----------------

متوسط تولید برق ماهیانه برای هر یک از اجزای سیستم نیز در جدول (۶) آمده است. در سیستم مورد بحث آرایه فتولتائیک  $55 kWh/yr$  (۳۷/۶٪) و سیستم دیزل ژنراتور  $7167 kWh/yr$  که  $48\%$  از تولیدات منطقه را به خود اختصاص می دهد. توربین بادی  $2008 kWh/yr$ ،  $13/6\%$  را تولید می کند. یعنی میزان تولید الکتریسیته سالانه کل سیستم  $14697 kWh$  می باشد. میزان الکتریسیته اضافی  $198/9 kWh/yr$  است که تنها  $0/14\%$  از توان کل سیستم است. همچنین مقادیر مربوط به تعداد ساعات کارکرد و توان ورودی و خروجی هر یک از اجزا را نیز می توان محاسبه کرد. مقادیر جدول (۵) آلاینده های مربوط به سیستم در حالتی است که تنها  $48\%$  از دیزل ژنراتور استفاده شده است. از آنجایی که بیشتر آلاینده های تولیدی مربوط به سیستم دیزل است، می توان برآورد کرد که اگر تمام نیاز الکتریسیته به واسطه دیزل ژنراتور تأمین شود، در واقع همه آلاینده ها دو برابر مقادیر سیستم موجود خواهد شد، و اگر بحث مربوط به جریمه های انرژی برای سیستم مطرح شود، سیستم دیزل یک سیستم گرانی خواهد شد. ولی چون سیستم با توجه به شرایط کنونی منطقه طراحی شده، و از آنجایی که در ایران هنوز بحث های مربوط به جریمه های انرژی مطرح نشده است، این هزینه ها در هزینه کلی سیستم لحاظ نشده است. کسر تجدیدپذیری سیستم  $43/9\%$  است. میزان تولید سالیانه اجزای تولید توان به طور خلاصه در شکل (۷) نشان داده شده است.

جدول (۶): میزان تولیدات اجزای سیستم

واحد	مقدار	کمیت
آرایه فتولتائیک		
کل تولیدات $kWh/yr$	۵۵۲۸	
ظرفیت نسبت به کل سیستم ٪	۴۳/۳	
میانگین خروجی kW	۰/۶۳	
هزینه انرژی \$/kW	۰/۱۸۱	
ساعات کارکرد hr/yr	۴۳۸۶	
توربین بادی		
کل تولیدات $kWh/yr$	۲۰۰۸	
ظرفیت نسبت به کل سیستم ٪	۱۵/۷۲	
میانگین خروجی kW	۰/۲۳	
هزینه انرژی \$/kW	۰/۳۸	
ساعات کارکرد \$/yr	۴۳۲۰	
دیزل		
کل تولیدات $kWh/yr$	۷۱۶۱	
ظرفیت نسبت به کل سیستم ٪	۴۰/۹	
میانگین خروجی kW	۱/۸۹	
ساعات کارکرد	۳۷۹۲	
تعداد استارت ها Start/yr	۵۵۳	
مصرف سوخت lit	۲۳۹۷	
باتری		
انرژی ورودی $kWh/yr$	۳۵۶۶/۸	
انرژی خروجی $kWh/yr$	۲۸۶۱	
تلفات $kWh/yr$	۶۹۶	
توان سالیانه $kWh/yr$	۳۱۹۹	



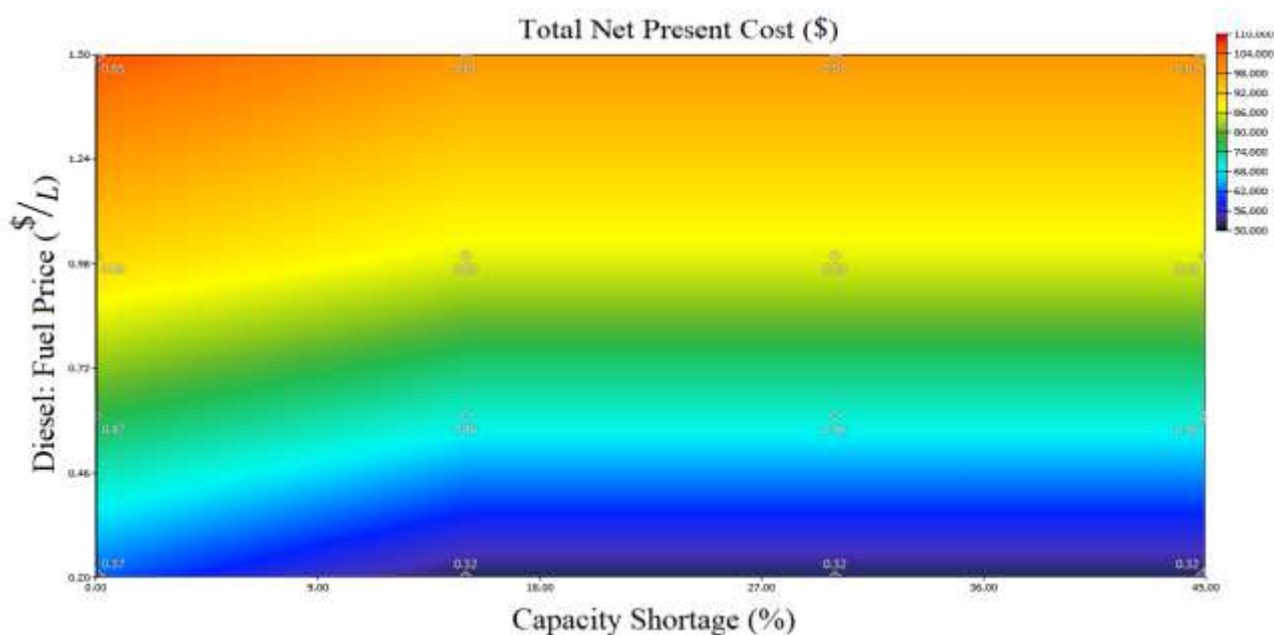
شکل (۷): توان تولیدی اجزای سیستم

### ۲.۳. اثر پارامترهای حساسیت

بیشتر تحت تأثیر سوخت دیزل است؛ یعنی با افزایش قیمت سوخت دیزل هزینه انرژی افزایش می‌یابد.

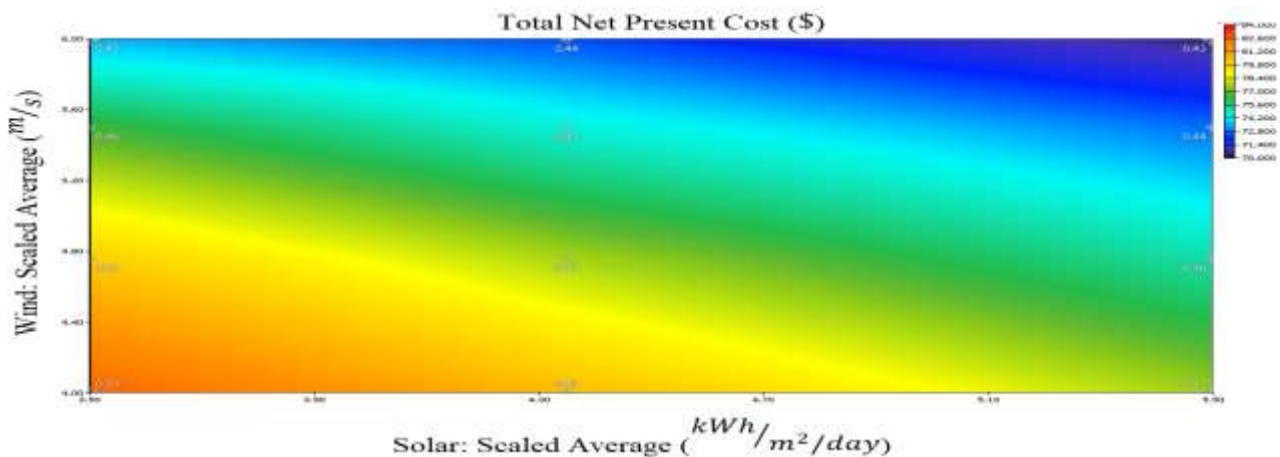
در شکل (۹) اثر پارامترهای حساسیت مربوط به سرعت باد با میانگین تابش خورشیدی، وقتی که قیمت دیزل  $\$/lit$  ۰/۱۶ و کمبود ظرفیت سالیانه صفر باشد، ارائه شده است. نتایج حاصل از شکل نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد و تابش خورشیدی، هر دو مقادیر مربوط به هزینه خاص فعلی و هزینه انرژی کاهش می‌یابد. می‌توان مشاهده کرد که تغییرات سرعت باد و تابش خورشیدی، قیمت سیستم را تا ۱۵۰۰ دلار می‌تواند تغییر دهد.

در این بخش، اثر هر یک از پارامترهای حساسیت روی نتایج بهینه سیستم مورد بحث، تجزیه و تحلیل شده است. اثر پارامترهای حساسیت مربوط به قیمت دیزل و کمبود ظرفیت سالیانه با توجه به شرایط محیطی (تابش و سرعت باد منطقه) در شکل (۸) مشاهده می‌شود. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که هرچه کمبود ظرفیت سالیانه بیشتر و قیمت دیزل کمتر باشد، سیستم هیبریدی خورشیدی-باد-دیزل، هزینه خالص فعلی کمتری خواهد داشت. با افزایش این جزء از پارامترهای حساسیت، هزینه خالص فعلی سیستم نیز افزایش می‌یابد. هزینه انرژی در بین این دو پارامتر حساسیت،

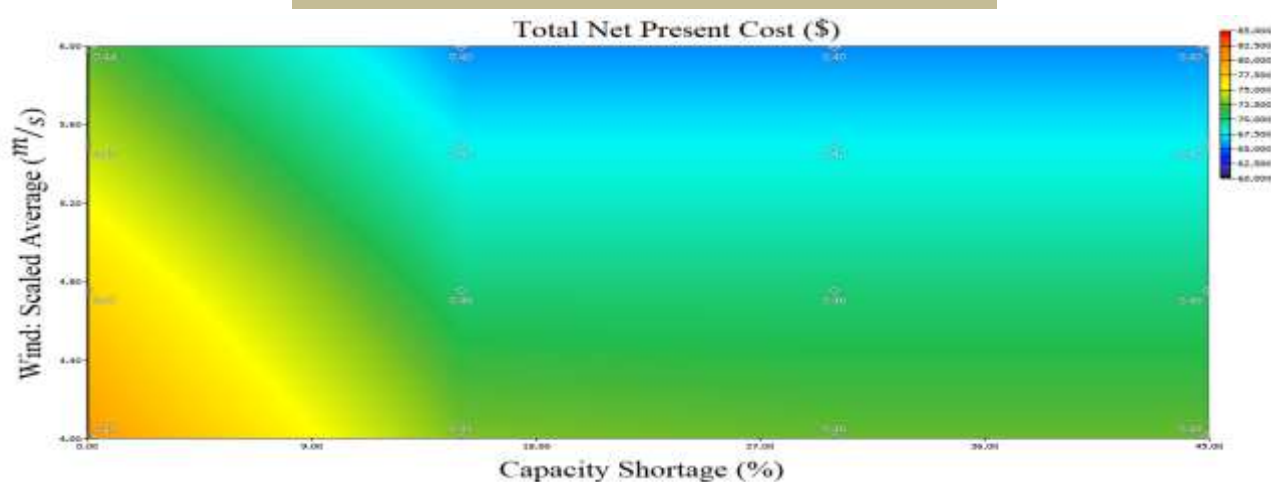


شکل (۸): اثر پارامترهای حساسیت قیمت دیزل و کمبود ظرفیت بر هزینه خالص سیستم





شکل (۹): اثر پارامترهای حساسیت مربوط به میانگین سرعت باد و تابش خورشیدی

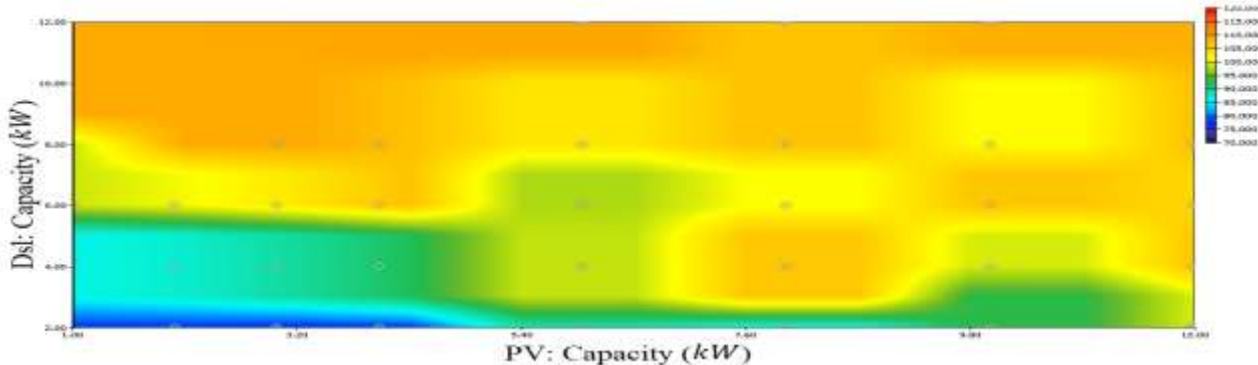


شکل (۱۰): اثر پارامترهای حساسیت مربوط به سرعت باد و کمبود ظرفیت سالیانه

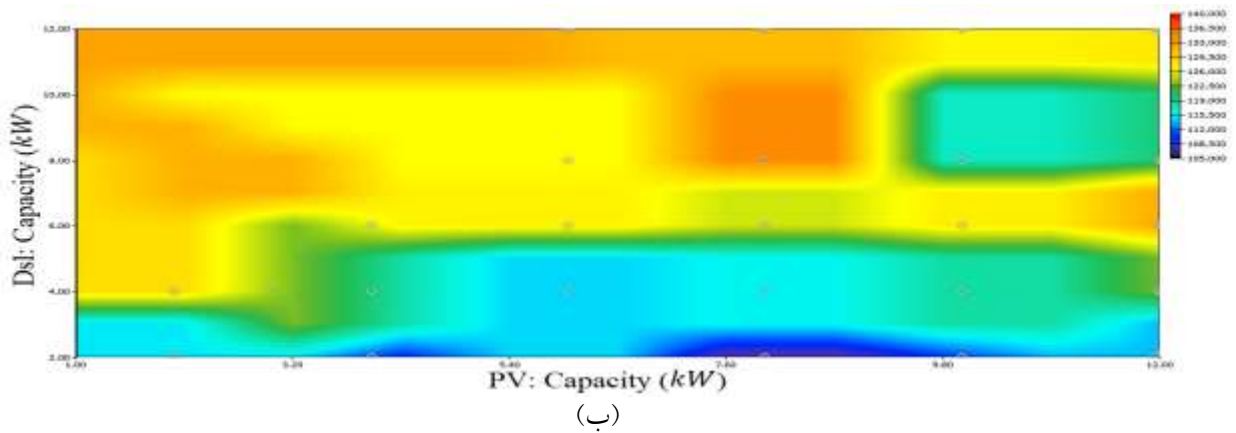
۱/۵ مقایسه شده است. چنانچه قیمت دیزل از  $\$ / lit$  به  $\$ / lit$  افزایش پیدا کند، سیستم حاوی دیزل به هیچ وجه توجیه اقتصادی نخواهد داشت. و همانطور که در شکل (۱۱) نیز مشاهده می شود، اگر قیمت دیزل به  $\$ / lit$  افزایش پیدا کند، استفاده از سیستم دیزل ژنراتور اصلاً توجیه پذیر نخواهد بود.

اثر کمبود ظرفیت سالیانه و سرعت باد در موقعی که هزینه مربوط به سوخت دیزل  $\$ / lit$  و میزان تابش خورشیدی برابر تابش منطقه باشد، بررسی شده است. با توجه به شکل (۱۰) که اثر این دو پارامتر را نشان می دهد، با افزایش سرعت باد و میزان کمبود ظرفیت سالیانه، میزان هر دو کمیت هزینه خالص فعلی و هزینه انرژی کاهش می یابد.

اثر قیمت دیزل بر روی سیستم در دو حالت  $\$ / lit$  و  $\$ / lit$



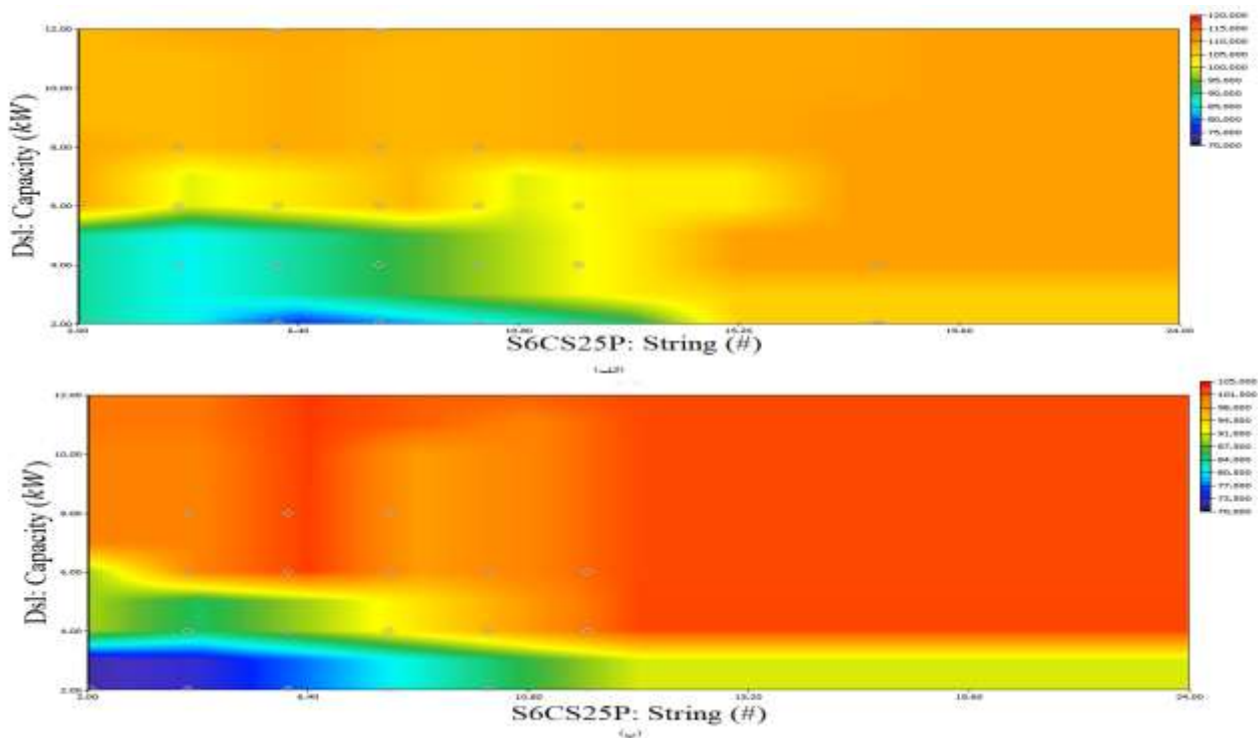
(الف)



شکل (۱۱): اثر قیمت دیزل روی سیستم در حالت (الف) قیمت دیزل  $0/6 \$/lit$  و در حالت (ب) قیمت دیزل  $1/5 \$/lit$

بیشتر باتری و دیزل ژنراتور مطرح است. اثر کمبود ظرفیت سالیانه روی ظرفیت فتوولتائیک و توربین بادی نیز مطابق با میزان کمبود ظرفیت در دو حالت صفر و ۴۵ مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج حاصل در شکل (۱۳) ارائه شده است. ظرفیت‌های سیستم در کمبود ظرفیت صفر در شکل (۱۳-الف) و سایر شرایط مطابق با شرایط منطقه است. ظرفیت‌های سیستم فتوولتائیک و باد در کمبود ظرفیت ۴۵ در شکل (۱۳-ب) نشان داده شده است. در مقایسه بین دو سیستم خورشیدی و بادی، لزوم استفاده از سیستم خورشیدی به نسبت بیشتر از سیستم بادی خواهد بود. در واقع نتایج ظرفیت‌ها مشابه با نتایج سیستم بهینه پیشنهادی است.

به‌منظور تعیین اثر کمبود ظرفیت سیستم روی میزان دیزل و باتری، اثر پارامتر حساسیت مربوط به کمبود ظرفیت سیستم در دو حالت ۴۵ و صفر روی ظرفیت باتری و دیزل ژنراتور بررسی گردید؛ زیرا این دو به‌منظور تأمین نیاز ذخیره‌سازی استفاده می‌شوند. با توجه به شکل (۱۲) که در حالت (الف) مربوط به وضعیتی است که کمبود ظرفیت برابر صفر و در حالت (ب) میزان این پارامتر برابر ۴۵ است، مشاهده می‌شود که هرچه کمبود ظرفیت سالیانه بیشتر شود، لزوم استفاده از دیزل ژنراتور و باتری کاهش می‌یابد؛ در حالت بهینه سیستم از تعداد کمتری باتری و دیزل ژنراتور با توان کمتری استفاده شده است. ولی در حالتی که کمبود ظرفیت سالیانه برابر صفر باشد، به نسبت قابلیت استفاده از توان‌های



شکل (۱۲): اثر کمبود ظرفیت سالیانه روی ظرفیت باتری و دیزل ژنراتور

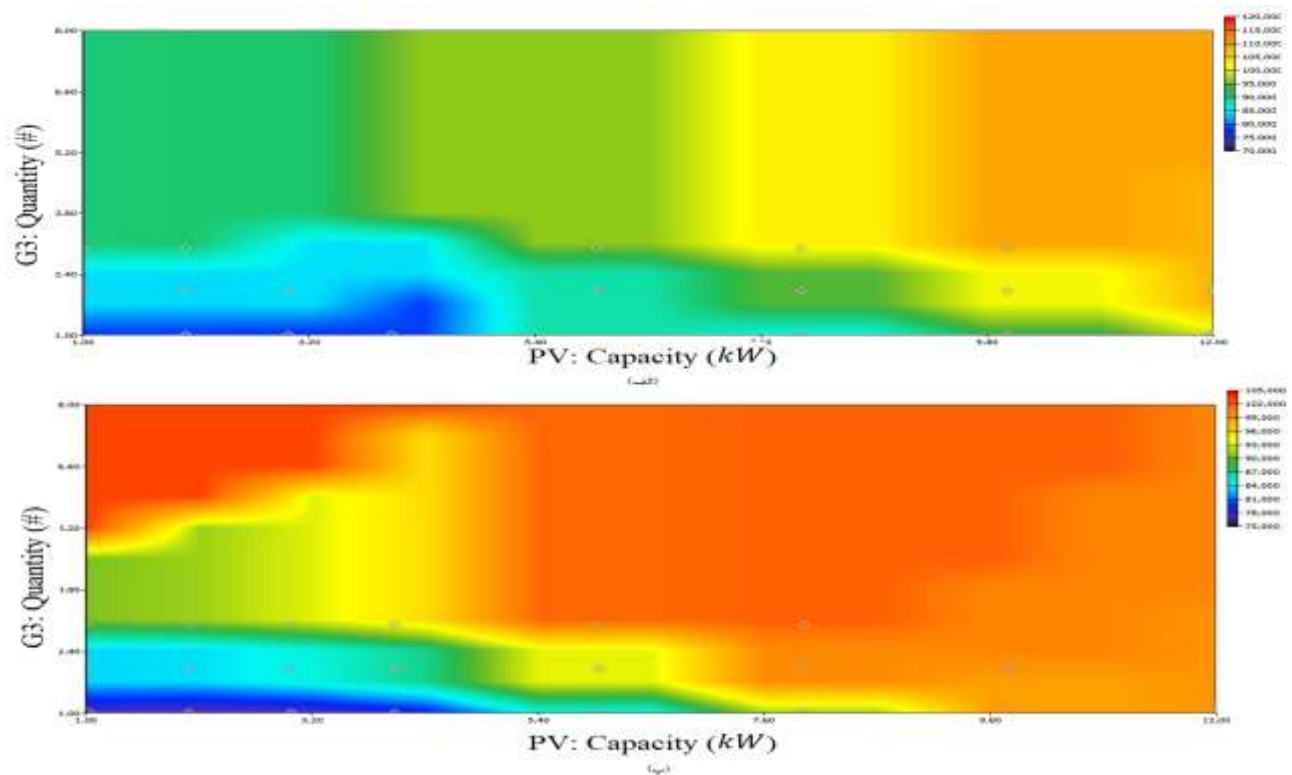
۳.۳. گسترش شبکه

۷۹۵۰۰ kW، سالانه نزدیک به ۴۸ میلیون تومان خرج خواهد شد. همچنین هزینه احداث هر کیلومتر شبکه برق فشار متوسط، حداقل ۵۰ میلیون تومان برآورد شده است. این هزینه‌ها در واقع شامل هزینه‌های راه‌اندازی، بهره‌برداری، نگهداری و سرویس‌های جانبی، خدمات انرژی، هزینه ترانسفورماتورهای شبکه و... است [۲۸]. با توجه به اینکه روستای مورد نظر در فاصله ۱۰ کیلومتری از شهر قرار دارد، هزینه انتقال شبکه در حدود ۵۰۰ میلیون برآورد می‌شود.

بنابراین با توجه به فاصله روستا و همچنین توان برق مورد نیاز آن، هزینه سیستم هیبریدی کمتر از هزینه انتقال شبکه می‌گردد. در واقع هزینه اتصال به شبکه در حدود ۶۰۰ میلیون تومان خواهد بود. در این صورت استفاده از سیستم هیبریدی اقتصادی‌تر خواهد بود. برای بررسی این موضوع باید تمام هزینه‌های عمر ۲۰ سال پروژه را قبل از احداث محاسبه کرد و این مقدار با هزینه احداث خطوط انتقال قدرت برق مقایسه شود. در واقع برای سیستم هیبریدی باید هزینه خالص فعلی را که مجموع همه هزینه‌ها (شامل هزینه تعمیر و نگهداری، هزینه تمام‌ساخت سالانه، هزینه تعویض سالیانه و...) است، با هزینه احداث خط مقایسه کرد. هزینه خالص فعلی پروژه \$۷۵۳۱۵ (معادل ۲۴۱ میلیون تومان) است که در مقایسه با هزینه انتقال خط بسیار کمتر خواهد بود.

تأمین برق از طریق برق شبکه نیاز به توسعه شبکه تا محل مورد نظر را دارد. از مزایای این روش می‌توان به پایداری و بالا بودن قابلیت اطمینان سیستم (در صورت پایدار بودن شبکه برق و کم بودن دفعات قطع برق در محل موردنظر) اشاره کرد. از معایب این روش، سختی اجرا و هزینه‌های هنگفت آن برای توسعه شبکه برق سراسر برای یک روستا در مناطق صعب‌العبور و با جمعیت محدود است. بر اساس قیمت‌های جهانی، هزینه سرمایه‌ای ساخت نیروگاه حرارتی در مقیاس متوسط، ۱۵۰۰ دلار به‌ازای هر کیلووات است [۲۵]. با توجه به اینکه پیک مصرفی در حدود ۱۴ کیلووات است، باید معادل آن به ظرفیت نیروگاه‌های کشور اضافه شود. در نتیجه هزینه افزودن ظرفیت مورد نظر برابر با ۲۱۰۰۰ دلار است.

با توجه به قیمت دلار (هر دلار ۳۲۰۰ تومان) ۶۷ میلیون تومان هزینه افزایش ظرفیت نیروگاه برای تأمین توان مورد نیاز است. از طرفی با توجه به تعرفه‌های مصوب مجلس در سال ۱۳۹۶، متوسط قیمت برق خانگی ایران ۱۳۰۰ ریال بر کیلووات ساعت است [۲۶]. این در حالی است که قیمت تمام‌شده هر کیلووات ساعت برق با احتساب هزینه آزاد سوخت برای نیروگاه به ۶۰۰۰ ریال می‌رسد. لذا تا واقعی شدن قیمت برق، همچنان گران شدن برق ادامه پیدا می‌کند [۲۷]. بنابراین برای تأمین برق روستا عبیرآباد با مصرف سالانه



شکل (۱۳): اثر کمبود ظرفیت بر ظرفیت سیستم فتوولتائیک و بادی

یارانه سوخت‌های فسیلی، گسترش تدریجی استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، در آینده رویکرد مناسبی خواهد بود. به‌عنوان تجزیه و تحلیل حساسیت هزینه انرژی سیستم تحت تأثیر قیمت دیزل قرار دارد و با افزایش کمبود ظرفیت سالیانه نیز هزینه انرژی کاهش می‌یابد.

### سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان این مقاله، از جناب آقای محمد محراب مهدوی و جناب آقای محمد نجفی که در پیشبرد اهداف پژوهشی این تحقیق کمک و یاری رساندند، همچنین از دانشگاه تهران به‌سبب برعهده‌گرفتن حمایت مالی این پروژه، بسیار سپاسگزاری می‌شود.

### ۴. نتیجه‌گیری

مطالعه امکان‌سنجی سیستم انرژی هیبریدی باد-خورشیدی-دیزل با باتری برای تأمین برق یک روستا با ۱۰ خانوار جمعیت در شهرستان دامغان بررسی شد. با استفاده از نرم‌افزار هومر، نتایج برای سیستم بهینه به‌دست‌آمده بیانگر این است که اقتصادی‌ترین سیستم، دارای  $3 \text{ kW}$  آرایه فتوولتائیک، ۱ عدد توربین بادی  $3 \text{ kW}$ ، دیزل ژنراتور ۲ کیلوواتی و ۶ عدد باتری S6CS25P می‌باشد. هزینه خالص فعلی سیستم ۷۵۳۱۵ دلار، و کسر تجدیدپذیری سیستم ۴۴٪ و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای  $6470 \text{ kg/yr}$  است. هزینه مربوط به گسترش شبکه برق برای روستای مدنظر، حدود ۶۰۰ میلیون تومان برآورد شده است، درحالی‌که هزینه مربوط به سیستم هیبریدی ۲۴۰ میلیون خواهد بود. بنابراین با توجه به برنامه حفاظت انرژی ایران، در خصوص حذف

### مراجع

- [1] Manwell, J.F., McGowan, J.G. and Rogers, A.L., "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application", John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Najafi, B., Mamaghani, A.H., Rinaldi, F. and Casalegno, A., "Fuel Partialization and Power/Heat Shifting Strategies Applied to a 30 kW High Temperature PEM Fuel Cell based Residential Micro Cogeneration plant", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, No. 41, pp. 14224-14234, 2015.
- [3] Asrari, A., Ghasemi, A., and Javidi, M., "Economic Evaluation of Hybrid Renewable Energy Systems for Rural Electrification in Iran—A Case Study", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 5, pp. 3123-3130, 2012.
- [4] Fazelpour, F., Soltani, N. and Rosen, M.A., "Feasibility of Satisfying Electrical Energy Needs with Hybrid Systems for a Medium-Size Hotel on Kish Island, Iran", Energy, Vol. 73, pp. 856-865, 2014.
- [5] Rehman, S., Alam, M.M., Meyer, J.P. and Al-Hadhrami, L.M., "Feasibility Study of a Wind-PV-Diesel Hybrid Power System for a Village", Renewable energy, Vol. 38, No. 1, pp. 258-268, 2012.
- [6] Kumar, B.S. and Sudhakar, K., "Performance Evaluation of 10 MW Grid Connected Solar Photovoltaic Power Plant in India", Energy Reports, Vol. 1, pp. 184-192, 2015.
- [7] Singh, S., Singh, M. and Kaushik, S.C., "Feasibility Study of an Islanded Microgrid in Rural Area Consisting of PV, Wind, Biomass and Battery Energy Storage System", Energy Conversion and Management, Vol. 128, pp. 178-190, 2016.
- [8] Rahimi, S., Meratizaman, M., Monadizadeh, S. and Amidpour, M., "Techno-Economic Analysis of Wind Turbine-PEM (Polymer Electrolyte Membrane) Fuel Cell Hybrid System in Standalone Area", Energy, Vol. 67, pp. 381-396, 2014.
- [9] Ngan, M.S. and Tan, C.W., "Assessment of Economic Viability for PV/Wind/Diesel Hybrid Energy System in Southern Peninsular Malaysia", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 1, pp. 634-647, 2012.
- [10] Hosseinalizadeh, R., Shakouri, H., Amalnick, M.S. and Taghipour, P., "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.
- [11] Luna-Rubio, R., Trejo-Perea, M., Vargas-Vázquez, D. and Ríos-Moreno, G.J., "Optimal Sizing of Renewable Hybrids Energy Systems: A Review of Methodologies", Solar Energy, Vol. 86, No. 4, pp. 1077-1088, 2012.
- [12] Saheb-Koussa, D., Koussa, M., Haddadi, M. and Belhamel, M., "Hybrid Options Analysis for Power Systems for Rural Electrification in Algeria", Energy Procedia, Vol. 6, pp. 750-758, 2011.
- [13] Shafiullah, G.M., Amanullah, M.T.O., Ali, A.S., Jarvis, D. and Wolfs, P., "Prospects of Renewable Energy—a Feasibility Study in the Australian Context" Renewable Energy, Vol. 39, No. 1, pp. 183-197, 2012.
- [14] Fernández-García A, Zarza E, Valenzuela L, Pérez M., "Parabolic-Trough Solar Collectors and Their Applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 7, pp. 1695-721, 2010.
- [15] Ngan, M.S. and Tan, C.W., "Assessment of Economic Viability for PV/Wind/Diesel Hybrid Energy System in Southern Peninsular Malaysia", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 1, pp. 634-647, 2012.
- [16] Arribas, L., Cano, L., Cruz, I., Mata, M. and Llobet, E., "PV-Wind Hybrid System Performance: A New Approach and a Case Study", Renewable Energy, Vol. 35, No. 1, pp. 128-137, 2010.
- [17] Bekele, G. and Palm, B., "Feasibility Study for a Standalone Solar-Wind-based Hybrid Energy System for Application in Ethiopia", Applied Energy, Vol. 87, No. 2, pp. 487-495, 2010.
- [18] Abdullah, M.O., Yung, V.C., Anyi, M., Othman, A.K., Hamid, K.A. and Tarawe, J., "Review and Comparison Study of Hybrid Diesel/Solar/Hydro/Fuel Cell Energy

- Schemes for a Rural ICT Telecenter*", Energy, Vol. 35, No. 2, pp. 639-646, 2010.
- [۱۹] حبیبی سراسکانرود، کاوه و زاهدی، علیرضا، «تحلیل فنی اقتصادی سامانه هیبریدی به صورت جدا از شبکه انرژی بادی و پیل سوختی: مطالعه موردی منطقه کوهین قزوین»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، دوره هشتم، شماره ۱، صفحه ۳۰-۳۹، ۱۳۹۷.
- [20] <https://en.wikipedia.org/wiki/Template:Damghan-geo-stub>
- [21] Iranian Renewable Energy Organization (SUNA) Tehran, Iran. Available from: [http://www.sun.org.ir/suna\\_content/media/image/2013/04/1991\\_orig.jpg](http://www.sun.org.ir/suna_content/media/image/2013/04/1991_orig.jpg) ?
- [22] Lee, Y., Paredes, J.R. and Lee, S.H., "Smart Grid and Its Application in Sustainable Cities", Inter-American Development Bank, 2012.
- [23] Rehman, S., Alam, M.M., Meyer, J.P. and Al-Hadhrami, L.M., "Feasibility Study of a Wind-PV-Diesel Hybrid Power System for a Village", Renewable Energy, Vol. 38, No. 1, pp. 258-268, 2012.
- [24] Lau, K.Y., Yousof, M.F.M., Arshad, S.N.M., Anwari, M. and Yatim, A.H.M., "Performance Analysis of Hybrid Photovoltaic/Diesel Energy System under Malaysian Conditions", Energy, Vol. 35, No. 8, pp. 3245-3255, 2010.
- [25] Mahapatra, S. and Dasappa, S., "Rural Electrification: Optimising the Choice between Decentralised Renewable Energy Sources and Grid Extension", Energy for Sustainable Development, Vol. 16, No. 2, pp. 146-154, 2012.
- [۲۶] توانیر، محاسبه صورت حساب مشترکین خانگی، <http://wamp.tavanir.org.ir/bill/>
- [۲۷] ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۴، تهران- وزارت نیرو معاونت امور برق، ۱۳۹۶.
- [۲۸] ربیعی، مصطفی، «هزینه احداث هر کیلومتر شبکه برق روستایی»، سازمان انرژی های نو ایران، ۱۳۹۴.

