

# طراحی بهینه و تحلیل فنی اقتصادی یک سیستم قدرت هیبریدی برای برق پایدار در مناطق روستایی: مطالعه موردی

اکبر ملکی<sup>\*</sup>، علی صادقی، سید ابوالفضل موسویان

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

## اطلاعات مقاله

## چکیده



### واژه‌های کلیدی:

بهینه‌سازی، سیستم‌های قدرت ترکیبی،  
سیستم خورشیدی-بادی-دیزل،  
تحلیل فنی-اقتصادی، برق رسانی پایدار

### Keywords:

Optimization,  
Hybrid power systems,  
Solar-Wind-Diesel system,  
Techno-Economic analysis,  
Sustainable electrification

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

امروزه تأمین انرژی پایدار برای مناطق دورافتاده به یکی از چالش‌های اساسی در سطح جهانی تبدیل شده است. در این راستا، استفاده از سیستم‌های هیبریدی انرژی مبتنی بر منابع تجدیدپذیر به عنوان راهکاری عملی و اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر به بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم انرژی هیبریدی شامل پنل‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، دیزل ژنراتور و باتری‌ها برای تأمین برق یک روستای نمونه می‌پردازد. اهداف طراحی شامل حداقل‌سازی هزینه‌های سیستم، حداکثرسازی قابلیت اطمینان و کاهش انتشار کربن دی‌اکسید است. بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار هومر پرو و دو استراتژی مدیریت انرژی انجام شده است. در این مطالعه، علاوه بر تحلیل‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، سه تحلیل حساسیت جامع نیز بر روی قیمت سوخت، شدت تابش خورشیدی و سرعت باد صورت گرفته است تا پایداری و انعطاف‌پذیری سیستم پیشنهادی در مواجهه با تغییرات پارامترهای کلیدی سنجیده شود. نتایج نشان می‌دهد که سیستم ترکیبی باد، خورشید، دیزل ژنراتور و باتری نسبت به سایر پیکربندی‌ها از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی برتری دارد و هزینه انرژی و هزینه خالص فعلی آن به ترتیب ۰٫۱۹۱ دلار بر کیلووات ساعت و ۴٫۶۵ میلیون دلار به دست آمد. همچنین، تحلیل حساسیت نشان داد که افزایش قیمت سوخت و تغییرات منابع تجدیدپذیر می‌تواند بر انتخاب بهینه اجزای سیستم و سهم هر منبع تأثیرگذار باشد. در نهایت، استفاده از سیستم هیبریدی پیشنهادی نسبت به سیستم کاملاً دیزلی، به طور میانگین موجب کاهش بیش از ۷۳ درصدی انتشار کربن دی‌اکسید می‌شود و پایداری بیشتری را در تأمین انرژی مناطق دورافتاده فراهم می‌آورد.

## مقدمه

این حجم از مصرف باعث نتایج ناگواری همچون افزایش گرمای زمین و تغییر اقلیم جهانی شده است. ایران نیز با توجه به فراوانی منابع سوخت فسیلی و اتکا به این منابع، سهم قابل توجهی از انتشار کربن دی‌اکسید

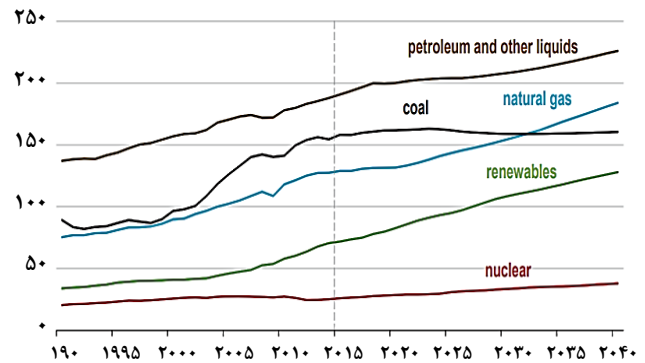
امروزه، یکی از چالش‌های قرن بیست و یکم افزایش روزافزون رشد جهانی جمعیت و به بالتبع آن، رشد تقاضای انرژی است. عمده مصرف تولید انرژی در جهان امروز از سوخت‌های فسیلی است که

\*E-mail: Akbar.maleki20@yahoo.com & a\_maleki@shahroodut.ac.ir

\*عهده‌دار مکاتبات

رجاع: اکبر ملکی، علی صادقی، سید ابوالفضل موسویان، طراحی بهینه و تحلیل فنی اقتصادی یک سیستم قدرت هیبریدی برای برق پایدار در مناطق روستایی: مطالعه موردی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۴۴: ۷۹ تا ۱۰۰ (۱۴۰۴).

۲۲۱۳۴۸ دلار شد. در پژوهشی دیگر، اوکونکو<sup>۱</sup> و همکاران [۴] باتوجه به هدف گذاری کشور عمان برای حرکت بیشتر به سمت انرژی های پاک تا ۲۰۴۰، پیشنهاد یک سیستم هیبریدی تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و باتری متصل به شبکه دیزل ژنراتوری را برای تأمین برق کلینیک سلامتی واقع در این کشور را دادند. نتایج به دست آمده نشان دهنده برتری اقتصادی و زیست محیطی سیستم تجدیدپذیر شامل خورشیدی و باتری نسبت به خورشیدی، دیزل ژنراتور و باتری و سیستم شبکه تنها است. آراتویه<sup>۲</sup> و همکاران [۵] بر مدل سازی فنی-اقتصادی و اندازه بندی بهینه سیستم های ریز شبکه هیبریدی خارج از شبکه شامل پنل های خورشیدی، توربین باد، ژنراتور بیوگاز و باتری با استفاده از نرم افزار هومر پرو و الگوریتم جدید فرا ابتکاری بهینه سازی ملخ تمرکز نمودند. اهداف این تحقیق، به حداقل رساندن کل هزینه خالص فعلی و هزینه انرژی و بار برآورده نشده در جامعه انسوکا که شامل ۸۸ روستاست، بوده است. با تجزیه و تحلیل مقایسه ای بین الگوریتم و هومر، پیکربندی بیوگاز و دیزل با هزینه انرژی برابر با ۰،۱۷۸۳ دلار بر کیلووات ساعت به عنوان راه حل بهینه شناخته شد. سماتار<sup>۳</sup> و همکاران [۶] به بررسی یک سیستم هیبریدی مستقل از شبکه با اجزای موجود پنل های فتوولتائیک، توربین باد، ژنراتور دیزل و باتری برای تأمین برق منطقه ای روستایی در کشور سومالی واقع در قاره آفریقا پرداختند. تجزیه و تحلیل و آنالیز حساسیت با کمک نرم افزار هومر و متلب انجام شده و بهترین سیستم قابل اجرا از نظر اقتصادی با هزینه خالص فعلی ۹۶۸۹۹،۱۶ دلار و هزینه هم سطح انرژی ۰،۰۹۰ دلار بر کیلووات ساعت به دست آمد. انمیری<sup>۴</sup> و همکاران [۷] به بررسی عملکرد اقتصادی و زیست محیطی یک سیستم هیبریدی شامل سیستم انرژی خورشیدی، بیوگاز و باتری برای تأمین برق یک پلت فرم تجاری در مراکش پرداختند. هدف مدل بهینه سازی، تعیین ظرفیت بهینه سیستم های انرژی تجدیدپذیر به منظور دستیابی به مقرون به صرفه ترین هزینه برق، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر محلی در دسترس با کمک از نرم افزار هومر بوده است. مشخص شد که ترکیب پنل های خورشیدی، بیوگاز و باتری در مقایسه با استفاده از تنها یک منبع تولید برق، از نظر هزینه اقتصادی و در بحث انتشار آلاینده بسیار بهینه می باشد. عمران خان<sup>۵</sup> و همکاران [۸] پیشنهاد یک سیستم ترکیبی شامل پنل های فتوولتائیک و توربین های هیدرو کینتیک را برای برق رسانی به منطقه سند پاکستان دادند. علاوه بر توجه به اهداف اقتصادی و آلودگی های زیستی، طرح پیشنهادی با به کارگیری پنل های خورشیدی بر سطح کانال های آبی و رودها، باعث کاهش تبخیر از سطح آب و حفظ بیشتر آن نیز می شود. چائویانگ ژو<sup>۶</sup> و همکاران [۹] به ارزیابی

World energy consumption by energy source  
quadrillion Btu

شکل ۱ - تولید انرژی در جهان بر حسب سوخت مصرفی [۲]

در جهان را دارد. در دهه اخیر، بحث تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر در ایران و جهان بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است. بسیاری از کشورها برای تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر طرح های تشویقی برای متولیان امر در نظر گرفتند [۱]. شکل ۱ تولید انرژی در جهان بر حسب سوخت مصرفی را نشان می دهد [۲]. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، با وجود رشد نیاز به سوخت های فسیلی و باقی ماندن آن ها به عنوان بازیگر اصلی تولید انرژی جهان، رشد نیاز به انرژی تجدیدپذیر در دو دهه اخیر این نوید را می دهد که در دهه های آتی بتوان از این انرژی ها به عنوان یکی از بازیگران اصلی تأمین انرژی جهانی نام برد. طی سال های اخیر، مطالعات مختلفی در این زمینه انجام شده و برای حل مشکلات بهینه سازی موجود نیز بسیاری از محققین از یک نرم افزار مدل سازی و بهینه سازی به نام هومر استفاده کردند. به عنوان مثال صادقی و همکاران [۳] در تحقیق خود یک سیستم خارج از شبکه تجدیدپذیر هیبریدی متشکل از پنل های فتوولتائیک، توربین باد و بیوگاز ارائه نمودند. هدف اصلی این مطالعه ارائه یک طرح اقتصادی بهینه برای تولید برق با استفاده از این سیستم هیبریدی برای مناطق دورافتاده بود. این تحقیق به تجزیه و تحلیلی شامل توصیفی از منابع منطقه، ضایعات کشاورزی، سیاست های دولتی، مدل سازی همه اجزا و تجزیه و تحلیل حساسیت بر روی نرخ های مختلف زیست توده ورودی، عدم قطعیت های متفاوت، انواع توربین های باد و پارامترهای نرخ تورم پرداخت. مشکل بهینه سازی نیز با استفاده از نرم افزار هومر پرو مرتفع گردید. در تجزیه و تحلیل حساسیت اول با نرخ تورم ۱۵ درصد، سیستم بهینه شامل ۲۲ کیلووات بیوگاز، ۳۳،۹ کیلووات پنل خورشیدی، ۱ عدد توربین ۱۰ کیلوواتی، ۱۱ عدد باتری و مبدل ۱۵،۶ کیلووات به دست آمد. هزینه انرژی (COE) برابر با ۰،۱۷۰ دلار بر کیلووات ساعت و هزینه فعلی خالص (NPC) مقدار

(۱) Okonkwo  
(۳) Samatar  
(۵) Khan

(۲) Araoye  
(۴) Ennemiri  
(۶) Zhou

حاصل شد که یک مدل فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی جامع که به بررسی طرح هیبریدی بادی، خورشیدی، دیزل ژنراتور و باتری خارج از شبکه برای برق‌رسانی مناطق مختلف پیردازد دارای اولویت بالاتر و جذابیت بیشتری برای انجام تحقیق است؛ بنابراین، در این تحقیق، یک سیستم هیبریدی مستقل شامل توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک به‌عنوان منابع اولیه برق‌رسانی و ژنراتور دیزل و بانک باتری به‌عنوان پشتیبان برای سیستم‌های تولید برق پیشنهاد شد. برای دستیابی به نتایج واقعی و عملی از سیستم پیشنهادی، با استفاده از نرم‌افزار هومر، مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم هیبریدی با اجزای پیشنهادی برای برق‌رسانی به روستای فریمان شهرستان جغتای واقع در استان خراسان رضوی انجام شد. برای دستیابی به بهترین پیکربندی و اندازه بهینه برای این سیستم، یک بهینه‌سازی چندهدفه انجام شد. با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی، اهداف این مطالعه شامل به حداقل رساندن هزینه انرژی، هزینه خالص فعلی، به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان تأمین انرژی و به حداقل رساندن انتشار کربن دی‌اکسید بوده است. از دیگر معیارهای در نظر گرفته شده در این تحقیق، استفاده از دو استراتژی مدیریت انرژی قوی برای سیستم پیشنهادی مدنظر است. علاوه بر این، به منظور ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف بر اندازه و طراحی بهینه، سه تحلیل حساسیت تحت شرایط مختلف انجام شد.

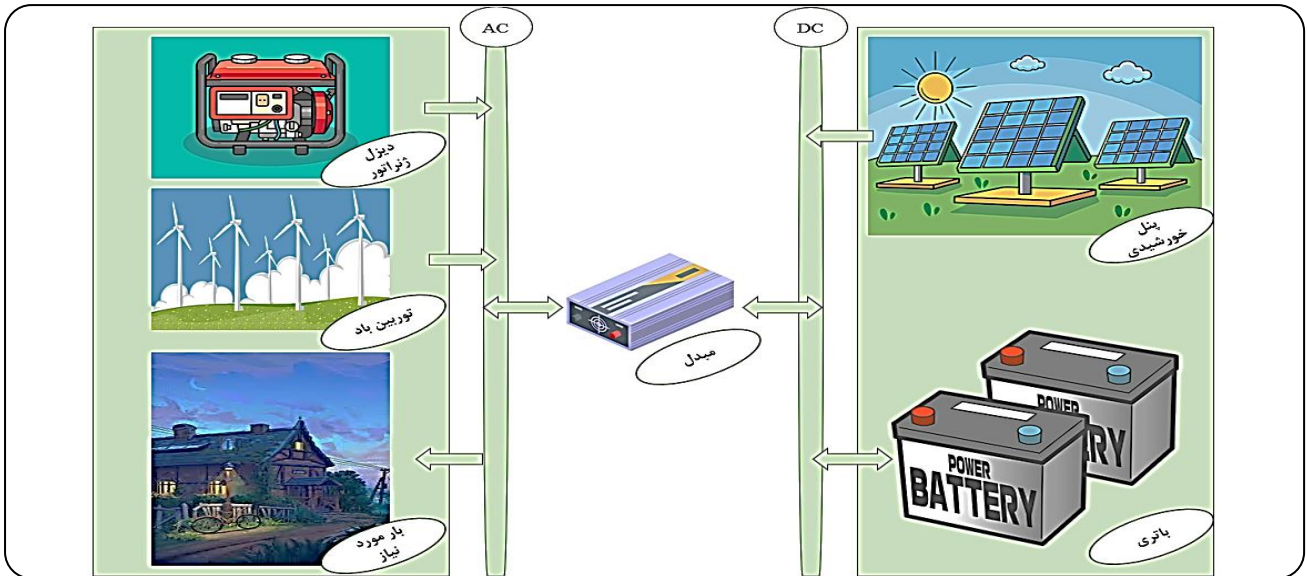
ویژگی اصلی این پژوهش تلفیق جامع رویکرد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی در طراحی و بهینه‌سازی یک سیستم قدرت هیبریدی برای مناطق روستایی خارج از شبکه است. در این راستا، به‌طور همزمان به بهینه‌سازی چندهدفه شامل حداقل‌سازی هزینه کل سیستم، حداکثرسازی قابلیت اطمینان تأمین انرژی و حداقل‌سازی آلودگی زیست‌محیطی پرداخته شده است. در طراحی مدل، پارامترهای واقعی منطقه‌ای (کاهش اثر غیرقطعی داده‌ها از طریق میان‌گیری و تحلیل حساسیت) اعمال گردیده و سناریوهای مختلف ترکیب اجزای هیبریدی، با دو استراتژی مدیریتی و سه تحلیل حساسیت کلیدی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین، مدل پیشنهادی با سناریوهای صرفاً دیزلی و صرفاً تجدیدپذیر مقایسه و برتری با تکیه بر داده‌های بومی و معیارهای عملیاتی اثبات گردید. از جمله ویژگی‌های مهم این پژوهش، انجام سه تحلیل حساسیت جامع بر روی قیمت سوخت، شدت تابش خورشیدی و سرعت باد است که پایداری و انعطاف‌پذیری سیستم پیشنهادی را در مواجهه با تغییرات پارامترهای کلیدی محیطی و اقتصادی به‌طور کامل ارزیابی می‌کند. همچنین، مقایسه اقتصادی سیستم هیبریدی مستقل با توسعه شبکه سراسری برق، کاربردپذیری و مزیت اقتصادی این راهکار را برای مناطق دورافتاده و صعب‌العبور کشور به‌خوبی نشان می‌دهد.

یک سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی که برای یک مکان عملی و خارج از شبکه طراحی شده است، می‌پردازد. این سیستم شامل یک دیزل ژنراتور، پنل‌های فتوولتائیک، سیستم ذخیره‌سازی باتری و مبدل بوده است. در این تحقیق برای اعتبار هر چه بیشتر نتایج، از روش‌های مختلفی اعم از استفاده از روش محدودیت، الگوریتم‌ها و نرم‌افزار هومر برای بهینه‌سازی سیستم پیشنهادی با تأمین اهداف موردنظر انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش بهینه‌سازی ترکیبی پیشنهادی نه تنها محدودیت‌های تعریف‌شده را برآورده می‌کند، بلکه انتشار کربن را به حداقل می‌رساند و بر اثربخشی آن در طراحی سیستم‌های انرژی خارج از شبکه پایدار و کارآمد تأکید می‌کند. *سرات*<sup>۱</sup> و *همکاران* [۱۰] به ارزیابی یک سیستم تجدیدپذیر هیبریدی بدون سیستم ذخیره‌سازی انرژی با تمرکز بر عملکرد انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی، در محیط‌های شهری که در آن مازاد برق تجدیدپذیر می‌تواند به شبکه برق فروخته شود، پرداختند. چهار سناریو با اجزای موجود شامل پنل‌های خورشیدی، توربین‌های باد، ژنراتور دیزل و کمک از شبکه با استفاده از نرم‌افزار هومر پرو برای تعیین کارآمدترین پیکربندی مورد ارزیابی قرار گرفت. این پیکربندی به هزینه انرژی ۰٫۱۷۲ دلار بر کیلووات‌ساعت، بازگشت سرمایه ۸٫۸ درصد و دوره بازپرداخت ۷٫۶۴ سال دست می‌یابد. *آن‌گرا*<sup>۲</sup> و *همکاران* [۱۱] استفاده از نرم‌افزار هومر، به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سیستم انرژی‌های تجدیدپذیر هیبریدی شامل سیستم فتوولتائیک، باد و باتری ادغام شده با ژنراتورهای برق دیزلی موجود در جزیره‌ای در اندونزی، به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان برق با هزینه انرژی منطقی در منطقه پرداختند. طبق نتایج شبیه‌سازی، سیستم ترکیبی شامل پنل‌های خورشیدی و دیزل ژنراتور در مقایسه با سیستم‌های پیشنهادی دیگر بهینه‌تر عمل کرده و علاوه بر تأمین کامل برق با بالاترین ضریب اطمینان، از نظر هزینه نیز مقرون‌به‌صرفه‌تر می‌باشد. *عید گل*<sup>۳</sup> و *همکاران* [۱۲] در مطالعه خود، پیشنهاد یک مدل جدید سیستم انرژی متصل به شبکه مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، شامل آب، زیست‌توده و خورشید را با اجرای استراتژی‌های اعزام جدید و مدل ریاضی پیشرفته در منطقه ای شهری واقع در ایتالیا را دادند. اهداف این تحقیق، به حداقل رساندن هزینه انرژی و هزینه خالص فعلی و به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان است. با انجام تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی، نتایج نشان داد که مقدار ۳۳٫۲ گیگاوات ساعت در سال انرژی پاک با هزینه انرژی ۰٫۰۶۷ یورو بر کیلووات‌ساعت تولید می‌شود. در بحث زیست‌محیطی نیز با پوشش ۷۸ درصدی تأمین انرژی با منابع تجدیدپذیر، کاهش سالانه ۱۳۴۵۲ تن کربن دی‌اکسید نیز به وقوع می‌پیوندد.

پس از بررسی‌های گسترده و با در نظر گرفتن تحقیقات و مطالعات قبلی در مورد سیستم‌های تجدیدپذیر هیبریدی، این نتیجه

(۱) Serat  
(۳) Gul

(۲) Anugrah



شکل ۲ - پیکربندی سیستم هیبریدی

**روش‌شناسی**

**طراحی و مدل‌سازی سیستم**

یک طرح ترکیبی شامل پنل‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، ژنراتور دیزل و باتری برای تأمین انرژی موردنیاز یک روستا در قالبی مستقل در نظر گرفته شده است. این سیستم از پنل‌ها و توربین‌ها به‌عنوان منبع انرژی اولیه استفاده می‌کند، درحالی‌که دیزل ژنراتورها و باتری‌ها به‌عنوان پشتیبان عمل می‌کنند. چرخه عمر این پروژه ۲۵ سال در نظر گرفته شده است و برای ارزیابی‌های اقتصادی، نرخ تورم (۳۰ درصد) و نرخ تنزیل ۳۵ درصد لحاظ شده است. شکل ۲ عناصر طرح هیبریدی را نشان می‌دهد.

**توربین بادی**

برای این تحقیق، توربینی با ۱۰ کیلووات ظرفیت، ارتفاع ۱۲ متر و طول عمر ۲۰ سال انتخاب شده است. جدول ۱ اطلاعات فنی و اقتصادی این توربین را به نمایش می‌گذارد [۱۳].  
توان خروجی توربین بادی نیز بر اساس سرعت باد و مطابق با رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$P_{wind} = \begin{cases} 0 & V \leq V_{in} , V > V_{cut} \\ A+BV+ CV^2 & V_{in} < V \leq V_r \\ P_r & V_r < V \leq V_{cut} \end{cases} \quad (1)$$

که در اینجا  $V_{in}$  برابر با سرعت شروع به کار،  $V_{cut}$  برابر با سرعت قطع،  $V_r$  برابر با سرعت نامی و ضرایب  $A$ ،  $B$  و  $C$  نیز پارامترهای منحنی مشخصه توان توربین بادی هستند که برای مدل‌سازی رابطه بین توان خروجی و سرعت باد در بازه عملکردی توربین به کار می‌روند.

جدول ۱ - اطلاعات فنی-اقتصادی توربین بادی [۱۳]

مدل	عمومی
قدرت نامی (کیلووات)	۱۰
طول عمر (سال)	۲۰
هزینه سرمایه (دلار)	۱۱۰۰۰
هزینه تعویض (دلار)	۱۰۰۰۰
هزینه نگهداری (دلار بر سال)	۳۰
سرعت شروع به کار (متر بر ثانیه)	۳٫۹
سرعت نامی (متر بر ثانیه)	۷٫۴
سرعت قطع (متر بر ثانیه)	۱۴

جدول ۲ - اطلاعات فنی-اقتصادی پنل فتوولتائیک [۱۵]

نوع	صفحه تخت تک کریستالی
دمای عملیاتی (درجه سلسیوس)	۴۷
بازده (درصد)	۱۷
ضریب دما (درصد/ درجه)	-۰٫۳۸
طول عمر (سال)	۲۵
هزینه سرمایه (دلار بر کیلووات)	۸۵۷
هزینه تعویض (دلار بر کیلووات)	۸۵۷
هزینه نگهداری (دلار بر سال)	۱۰

این ضرایب معمولاً بر اساس داده‌های تجربی یا اطلاعات فنی سازنده تعیین می‌شوند.

**پنل فتوولتائیک**

پنل‌های فتوولتائیک، پای ثابت اکثر سیستم‌های هیبریدی پیشنهادی در تحقیقات مختلف هستند [۱۵] در این تحقیق، برای سیستم پیشنهادی، پنل‌های صفحه تخت تک کریستالی در نظر گرفته شده است. اطلاعات پنل پیشنهادی در جدول ۲ آمده است [۱۵].

جدول ۳ - اطلاعات فنی اقتصادی دیزل ژنراتور [۱۹، ۲۰]

Generic	مدل
۱۵۰۰۰	طول عمر (ساعت)
۱۰۰۰	هزینه سرمایه (دلار بر کیلووات)
۹۰۰	هزینه تعویض (دلار بر کیلووات)
۰,۰۲	هزینه نگهداری (دلار بر کیلووات بر ساعت)

برای محاسبه توان خروجی پنل‌ها نیز طبق معادله ۲ عمل می‌شود [۱۶، ۱۷]:

$$P_{pv}(t) = \eta_{pv} \times G_t \times A_{pv} \quad (2)$$

که در آن  $\eta_{pv}$  نشان دهنده بازده پنل‌های خورشیدی است،  $A_{pv}$  مساحت سطح پنل‌ها ( $m^2$ ) را نشان می‌دهد و  $G_t$  هم بیانگر تابش خورشیدی ( $kW/m^2$ ) است. همچنین با استفاده از معادله ۳ می‌توان بازده پنل‌های فتوولتائیک را محاسبه کرد [۱۸]:

$$\eta_{pv} = \eta_r \eta_{pc} \left[ 1 - \omega_{tem} \left( \left( A_{tem} - \left[ \frac{20 - NOCT}{800} \right] R_t \right) - C_{tem} \right) \right] \quad (3)$$

که در آن  $\eta_r$  و  $\eta_{pc}$  به ترتیب نشان دهنده بازده پنل مرجع و بازده تهویه توان هستند.  $A_{tem}$  و  $C_{tem}$  نیز به ترتیب بیانگر دمای سلول در شرایط مرجع و دمای محیط بر حسب درجه سلسیوس هستند.  $NOCT$  دمای عملیاتی و  $\omega_{tem}$  ضریب دمایی پنل است.

### دیزل ژنراتور

همان‌طور که گفته شد، سیستم ترکیبی پیشنهادی از اجزای تجدیدپذیر و نویی همچون توربین‌های باد و پنل‌های خورشیدی بهره می‌برد. برای درک بهتر اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی اجزای وابسته به سوخت‌های فسیلی، از دیزل ژنراتور نیز در برخی از سناریوهای پیشنهادی در سیستم ترکیبی و در یک سیستم تنها استفاده شده است. جدول ۳ اطلاعات دیزل ژنراتور پیشنهادی را درج کرده است [۱۹، ۲۰].

ژنراتور در نظر گرفته شده با گازوئیل کار می‌کند و مقدار انتشار کربن دی‌اکسید آن ۲,۶۲ کیلوگرم بر هر لیتر گازوئیل است [۲۱]. قیمت پیشنهادی هر لیتر گازوئیل نیز ۰,۰۱ دلار بر لیتر در این تحقیق در نظر گرفته شده است [۲۲]. مصرف سوخت دیزل ژنراتور را نیز می‌توان طبق رابطه ۴ محاسبه کرد [۲۳]:

$$F_{DG} = F_0 \times P_G + F_1 \times P_{DG} \quad (4)$$

که در آن  $P_{DG}$  برابر با توان خروجی و  $P_G$  توان نامی دیزل ژنراتور هستند.  $F_0$  و  $F_1$  نیز به ترتیب ضریب و شیب منحنی سوخت هستند. مقادیر  $F_0$  و  $F_1$  به ترتیب برابر با ۰,۸۱۴۵ و ۰,۲۴۶ لیتر بر کیلووات ساعت می‌باشند.

جدول ۴ - اطلاعات فنی اقتصادی باتری [۲۴]

Hoppecke ۲۴ OPzS ۳۰۰۰	نام باتری
Vented LA	نوع باتری
۷,۱۵	ظرفیت نامی (کیلووات ساعت)
۷۲۲	هزینه سرمایه (دلار بر کیلووات)
۶۶۵	هزینه تعویض (دلار بر کیلووات)
۱۸۰	هزینه نگهداری (دلار بر سال)
۱۰	طول عمر (سال)

### باتری

در سیستم‌های هیبریدی وجود سیستم پشتیبان نقش اساسی دارد. از آنجاکه انرژی‌های تجدیدپذیر دارای ماهیت متناوب هستند، برای کاهش عدم قطعیت در تولید انرژی می‌توان از باتری استفاده کرد. جدول ۴ بیانگر مشخصات این باتری است [۲۴].

عواملی چون ولتاژ و ظرفیت اسمی بر کارایی باتری مؤثرند. بازده و ولتاژ باتری را می‌توان به ترتیب از دو معادله ۵ و ۶ محاسبه کرد [۲۵]:

$$\eta_{batt} = 1 - \left( \frac{I_{nom} \times R_{int} \times I_{nom}}{V_{nom} \times I_{nom}} \right) \quad (5)$$

$$V_{batt} = E_0 - (R_{int} \times I_{batt}) \quad (6)$$

که در آن  $E_0$ ،  $R_{int}$  و  $I_{batt}$  به ترتیب ولتاژ بدون بار، مقاومت داخلی و جریان باتری هستند.  $V_{nom}$  نشان دهنده ولتاژ نامی و  $I_{nom}$  جریان نامی است. با تولید انرژی بیش از مقدار موردنیاز، انرژی مازاد صرف باتری می‌شود که تا هنگام کسری بار باتری‌ها با تخلیه خود به کمک سیستم آمده و عدم قطعیت سیستم را به پایین‌ترین حد ممکن برسانند. حالت شارژ و حالت تخلیه باتری در زمان  $t$  را می‌توان به ترتیب از دو معادله ۷ و ۸ به دست آورد [۲۶، ۲۷]:

$$E_{BAT}(t) = E_{BAT}(t-1) \times (1 - \sigma) + [E_{Tot}(t) - \frac{E_{Load}}{\eta_{inv}}] \times \eta_c \quad (7)$$

$$E_{BAT}(t) = E_{BAT}(t-1) \times (1 - \sigma) - \frac{[E_{Load} - E_{Tot}(t)]}{\eta_d} \quad (8)$$

که در آن  $E_{BAT}(t)$  برابر با مقدار شارژ باتری در زمان  $t$ ،  $E_{BAT}(t-1)$  مقدار شارژ باتری در زمان  $t-1$ ،  $E_{Tot}(t)$  برابر با کل انرژی تولید شده و  $E_{Load}$  نیز تقاضای بار است. علاوه بر این،  $\sigma$ ،  $\eta_c$  و  $\eta_d$  به ترتیب برابر با شارژ بانک باتری، نرخ خود تخلیه، بازده تخلیه و راندمان مبدل هستند. باتری Hoppecke 24 OPzS 3000 با ظرفیت نامی ۷,۱۵ کیلووات ساعتی و طول عمر ۱۰ سال برای این سیستم انتخاب شده است. هزینه سرمایه گذاری ۷۲۲ دلار، هزینه جایگزینی آن ۶۶۵ دلار و هزینه نگهداری باتری‌ها هم تقریباً ۱۸۰ دلار در سال در نظر گرفته شده است [۲۴].

بر حسب دلار بر کیلووات ساعت است که فرمول آن بصورت زیر است [۳۱]:

$$COE_T = \frac{A_T}{E_T} \quad (11)$$

که در این فرمول  $E_T$  نیز برابر با کل بار الکتریکی با واحد کیلووات ساعت در سال است. عملکرد نرم افزار هومر نیز به این شکل است که ابتدا داده های مربوط به موقعیت جغرافیایی سیستم و قطعات و طول عمر مربوط به آنها در هومر درج می شود، سپس محدودیت ها در نرم افزار تعیین می شوند. مرحله بعدی مدل سازی، شبیه سازی و بهینه سازی سیستم پیشنهادی تحت تنظیمات معرفی شده قبلی است. این مرحله با تجزیه و تحلیل حساسیت نتیجه دنبال می شود. در صورتی که در این مرحله به نتیجه مطلوب نرسید، فرایند بهینه سازی ادامه خواهد یافت. شکل ۳ روش بهینه سازی گام به گام را در این نرم افزار نشان می دهد.

نرم افزار هومر به دلیل رابط کاربری ساده، پایگاه داده کامل تجهیزات و منابع، و توانایی مدل سازی جامع سناریوهای فنی-اقتصادی، یکی از پرکاربردترین ابزارها در حوزه طراحی و بهینه سازی سیستم های قدرت هیبریدی به شمار می رود. مهمترین مزیت هومر، قابلیت آن در مدل سازی همزمان ابعاد مختلف فنی، اقتصادی و زیست محیطی با کمترین پیچیدگی برای کاربر است، به ویژه برای مطالعات فنی-اقتصادی کاربردی در مقیاس واقعی. با این وجود، الگوریتم بهینه سازی استاندارد هومر عمدتاً مبتنی بر جستجوی ترکیبی می باشد و در مقایسه با روش های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک یا الگوریتم ازدحام ذرات، که قابلیت جستجوی گسترده و کارآمد در فضای مسئله های بزرگ تر و پیچیده تر را دارند، محدودیت هایی از نظر سرعت همگرایی، گریز از بهینه های محلی و توانایی لحاظ پیچیدگی های بیشتر در مدل (مانند انواع مدیریت مصرف بار یا سناریوهای متعدد عدم قطعیت) دارد. روش های فرا ابتکاری توانایی بیشتری در حل مسائل چندهدفه، برخورد با متغیرهای گسسته و پیوسته و مدل سازی سناریوهای پیشرفته را ارائه می دهند. بنابراین، انتخاب روش بهینه سازی به ماهیت مسئله، مطلوبیت پردازش سریع یا تحلیل عمیق و منابع اطلاعاتی و نرم افزاری پژوهشگران بستگی دارد.

### ارزیابی منطقه مورد مطالعه

مطالعه موردی در مورد روستای فریمانه از توابع شهرستان جغتای (۲۰°۳۶'۳۶" شمالی ۵۷°۶'۰۷" شرقی) واقع در استان خراسان رضوی ایران انجام شده است که در شکل ۴ موقعیت قرارگیری آن در جغرافیای ایران مشاهده می شود. این روستای ۷۶۰ خانواری دارای ۳۷۰۰ نفر جمعیت می باشد

جدول ۵ - اطلاعات فنی-اقتصادی مبدل [۲۸]

۲۹۶	هزینه سرمایه (دلار بر کیلووات)
۱۹۶	هزینه تعویض (دلار بر کیلووات)
۱۰	هزینه نگهداری (دلار بر سال)
۹۰	بازده (درصد)
۱۵	طول عمر (سال)

### مبدل

در سیستم هیبریدی پیشنهادی، برای تبدیل بار الکتریکی و حفظ جریان انرژی بین  $DC$  و  $AC$ ، مبدلی با عمر ۱۵ ساله با هزینه سرمایه گذاری ۲۹۶ دلار، هزینه جایگزینی ۱۹۶ دلار و هزینه نگهداری سالانه ۱۰ دلار انتخاب شده است (جدول ۵) [۲۸]. برای محاسبه توان ارسالی خروجی مبدل برای تأمین توان مورد نیاز می توان از معادله ۹ استفاده کرد [۲۹]:

$$P_{con} = \frac{P_{hD}}{\eta_{con}} \quad (9)$$

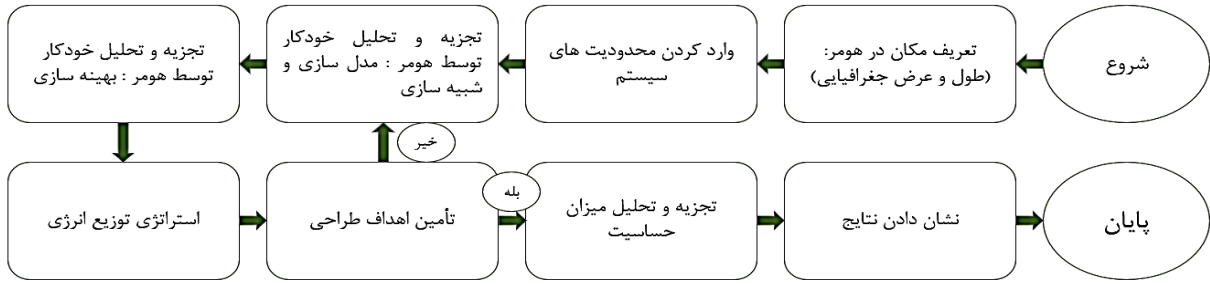
که در آن  $P_{hD}$  قدرت ورودی مبدل (کیلووات) را نشان می دهد.

### شبیه سازی

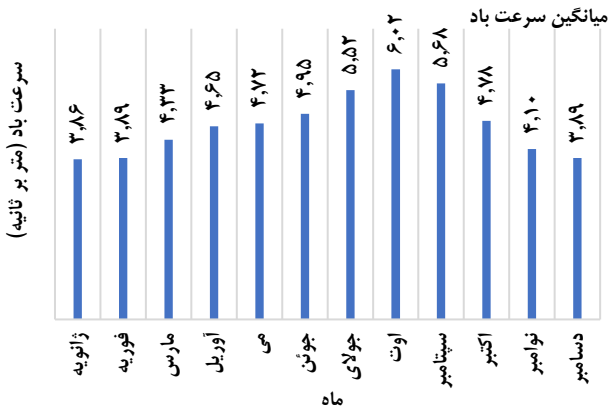
برای شبیه سازی سیستم های تولید انرژی می توان از نرم افزاری به نام هومر استفاده کرد. از مزایای استفاده از این نرم افزار می توان به امکان مدل سازی انواع سیستم های تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر، سیستم های مستقل از شبکه یا متصل به شبکه و انجام خودکار محاسبات اقتصادی و بهینه سازی سیستم مدنظر اشاره کرد. هومر عملیات سالانه یک سیستم را با ایجاد معادلات تعادل برای ۸۷۶۰ ساعت در سال شبیه سازی می کند. برای پیاده سازی صحیح نرم افزار هومر، کاربر باید داده های فنی، زیست محیطی و اقتصادی مربوط به سیستم انرژی خود را وارد کند تا بتواند طراحی و پیکربندی بهینه را بیابد و تحلیل حساسیت را انجام دهد. این نرم افزار همچنین منبع قابل اعتمادی برای اعتبارسنجی سایر روش های بهینه سازی است. هومر پیکربندی های سیستم بهینه شده را فقط بر اساس هزینه خالص فعلی رتبه بندی می کند. برای ارزیابی هزینه خالص فعلی سیستم، نرم افزار هومر از معادله ۱۰ استفاده می کند [۲۳، ۲۵، ۳۰]:

$$NPC_T = \frac{A_T}{ROR(i_r, N_{Proj})} \quad (10)$$

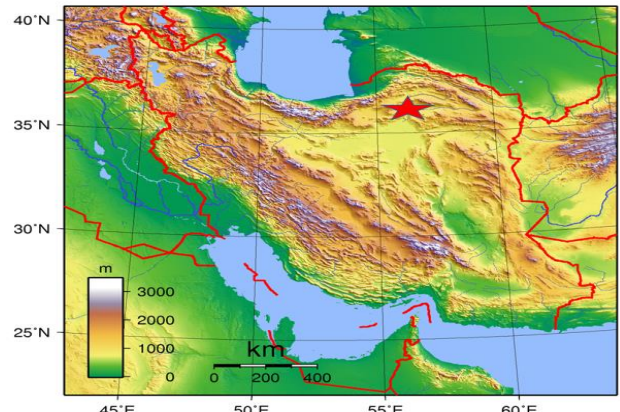
که در آن  $NPC_T$  ارزش هزینه فعلی کل را بر حسب دلار نشان می دهد،  $A_T$  نشان دهنده هزینه سالیانه کل با واحد دلار بر سال است،  $ROR$  برابر با نرخ بازگشت سرمایه،  $i_r$  نرخ تنزیل واقعی و  $N$  برابر با طول عمر پروژه بر حسب سال است. شاخص دیگری که از نرم افزار استخراج می شود هزینه انرژی



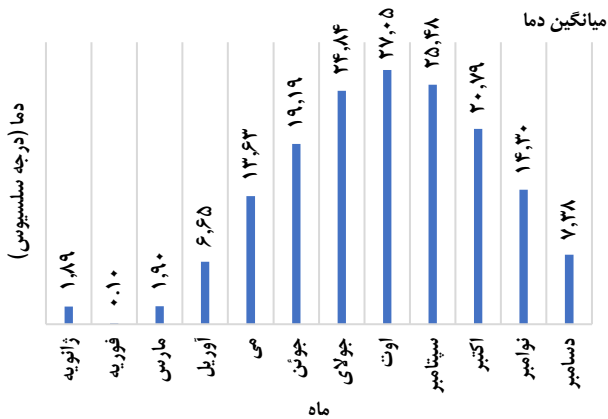
شکل ۳ - بلوک دیاگرام روش بهینه سازی سیستم هیبریدی



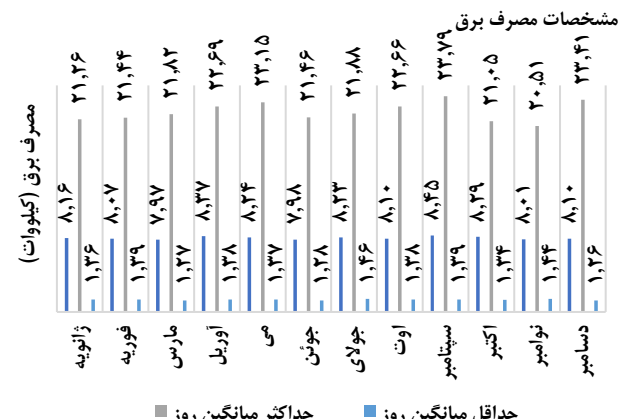
شکل ۷ - میانگین سرعت باد ماهیانه



شکل ۴ - موقعیت جغرافیایی منطقه روستای فریمانه در ایران



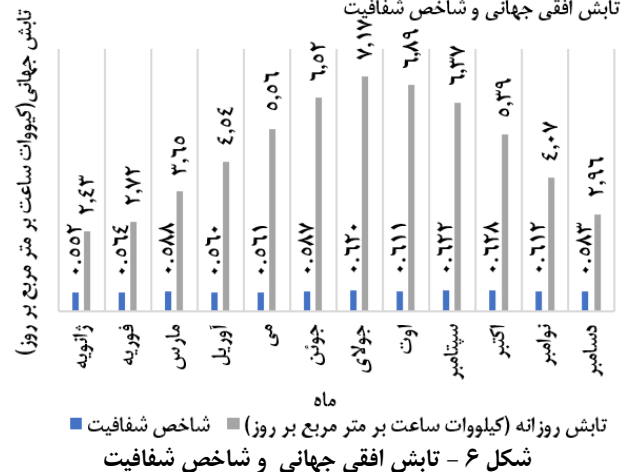
شکل ۸ - میانگین دمای ماهیانه



شکل ۵ - مشخصات مصرف برق ماهیانه

و در منطقه کوهستانی - دشتی قرار دارد. نیاز برق این روستا نیز ۴۲۰۰ کیلووات ساعت در روز تخمین زده شده است. مشخصات مصرف ماهانه برق در این روستا در شکل ۵ آمده است. باتوجه به در نظر گرفتن سیستم هیبریدی باد، فتوولتائیک و دیزل ژنراتور برای تأمین برق این منطقه، با کمک نرم افزار هومر می توان اطلاعاتی همچون تغییرات تابش جهانی (شکل ۶)، میانگین سرعت باد (شکل ۷) و میانگین دمای ماهیانه (شکل ۸) روستای اسبکشان را به دست آورد [۳۲].

باتوجه به داده های استخراج شده از وضعیت کلی روستای موردنظر، این روستا دارای میانگین تابش جهانی سالانه ۴,۸۵ کیلووات ساعت در متر مکعب است. بالاترین تابش ماهیانه



شکل ۶ - تابش افقی جهانی و شاخص شفافیت

در این تحقیق، به منظور انتخاب بهینه‌ترین پیکربندی سیستم هیبریدی، هر سه هدف اصلی شامل کمینه‌سازی هزینه، بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان و کمینه‌سازی انتشار کربن دی‌اکسید به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این راستا از روش تحلیل بر پایه تبادل بین اهداف استفاده شده است تا سناریوهایی که بتوانند هر سه معیار را به طور متعادل و همزمان تأمین نمایند، احصا شوند. به صورت مشخص، ابتدا معیار اقتصادی به عنوان اصلی‌ترین فیلتر شناسایی سناریوهای قابل قبول لحاظ شده است و سپس بین سناریوهای اقتصادی‌تر، وضعیت انتشار آلاینده‌ها و سطح قابلیت اطمینان ارزیابی و مقایسه شده است. در نهایت، سناریویی که ضمن داشتن هزینه معقول، قابلیت اطمینان بالا و کمترین مقدار انتشار آلاینده‌ها را دارا باشد، به عنوان گزینه مطلوب انتخاب شده است. به عبارت دیگر وزن‌دهی اهداف به صورت تلویحی و از طریق روش تحلیل چندمعیاره بدون تبدیل آن‌ها به یک تابع هدف واحد و با اولویت‌دهی کیفی به اهداف زیست‌محیطی در کنار محدودیت اقتصادی، انجام پذیرفته است.

### محدودیت‌ها

بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی همچون ظرفیت دیزل ژنراتور ( $C_{DG}$ )، ظرفیت پنل‌های خورشیدی ( $C_{PV}$ )، تعداد توربین‌های باد ( $N_{WT}$ ) و تعداد باتری‌ها ( $N_{Battery}$ )، ظرفیت باتری‌ها ( $C_{Battery,t}$ ) و وضعیت شارژ باتری‌ها ( $SOC_{Battery,t}$ ) انجام گرفت. با اعمال این محدودیت‌ها، پارامترهای گفته شده فقط در یک مقدار و محدوده مشخصی می‌توانند زیاد و یا کم شوند و این مسئله می‌تواند بر اهداف معین شده نیز اثرگذار باشد.

$$\begin{aligned} 0 &\leq C_{DG} \leq C_{DG,max} \\ 0 &\leq C_{PV} \leq C_{PV,max} \\ 0 &\leq N_{WT} \leq N_{WT,max} \\ 0 &\leq N_{Battery} \leq N_{Battery,max} \\ C_{Battery,min} &\leq C_{Battery,t} \leq C_{Battery,max} \\ SOC_{Battery,min} &\leq SOC_{Battery,t} \leq SOC_{Battery,max} \end{aligned} \quad (15)$$

محدودیت‌های فوق به منظور تضمین عملکرد صحیح و ایمن سیستم هیبریدی در نظر گرفته شده‌اند. محدودیت‌های ظرفیت دیزل ژنراتور، پنل خورشیدی و توربین بادی، بیانگر این هستند که هر یک از این منابع تنها می‌توانند در بازه مشخصی از ظرفیت نامی خود فعالیت کنند و از مقادیر مجاز تجاوز نکنند. همچنین، تعداد باتری‌ها نیز محدود به حداکثر تعداد قابل نصب در سیستم است. علاوه بر این، برای جلوگیری از آسیب به باتری‌ها و افزایش طول عمر آن‌ها، ظرفیت و سطح شارژ باتری‌ها باید همواره در بازه مجاز قرار داشته باشند. رعایت این محدودیت‌ها موجب می‌شود تا سیستم از نظر فنی و اقتصادی بهینه عمل کند و از بروز مشکلات احتمالی

ثابت شده نیز مقدار ۶,۰۲ کیلووات‌ساعت در متر مکعب را نشان می‌دهد. این منطقه با میانگین سرعت باد سالیانه ۴,۷ متر بر ثانیه از پتانسیل بسیار خوبی برای استفاده از انرژی بادی برخوردار است. میانگین دمای سالیانه روستای فریمانه نیز عدد ۱۳,۶ سلسیوس نشان می‌دهد. بالاترین و پایین‌ترین میانگین دمای ماهیانه این روستا نیز به ترتیب با ۲۷,۰۵ و ۰,۱ سلسیوس متعلق به ماه‌های اوت و فوریه است. در این تحقیق، داده‌های ورودی اصلی شامل تابش خورشیدی، سرعت باد و پروفیل بار مصرفی برق روستا به شرح زیر تأمین شده‌اند: داده‌های تابش خورشیدی و سرعت باد از پایگاه داده‌های جهانی NASA SSE و Global Wind Atlas و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی کشور، برای بازه زمانی یک ساله جمع‌آوری شدند و پس از تبدیل به پروفیل ساعتی با استفاده از امکانات نرم‌افزار هومر پرو در مدل به کار رفتند. داده بار مصرفی نیز با همکاری شرکت توزیع برق استان، از داده‌های کنتورهای برق مشترکان روستا استخراج و سپس به صورت بار ساعتی مدل‌سازی شد.

### توابع هدف

در طراحی این سیستم انرژی ترکیبی تجدیدپذیر، هدف ابتدایی و اصلی تحلیل اقتصادی سیستم است. با در نظر گرفتن دو عامل هزینه انرژی و هزینه خالص فعلی سیستم‌های بهینه به دست آمده تحلیل می‌شوند. در این تحقیق طرح‌های مختلف بر اساس این دو پارامتر اقتصادی رتبه‌بندی شده‌اند.

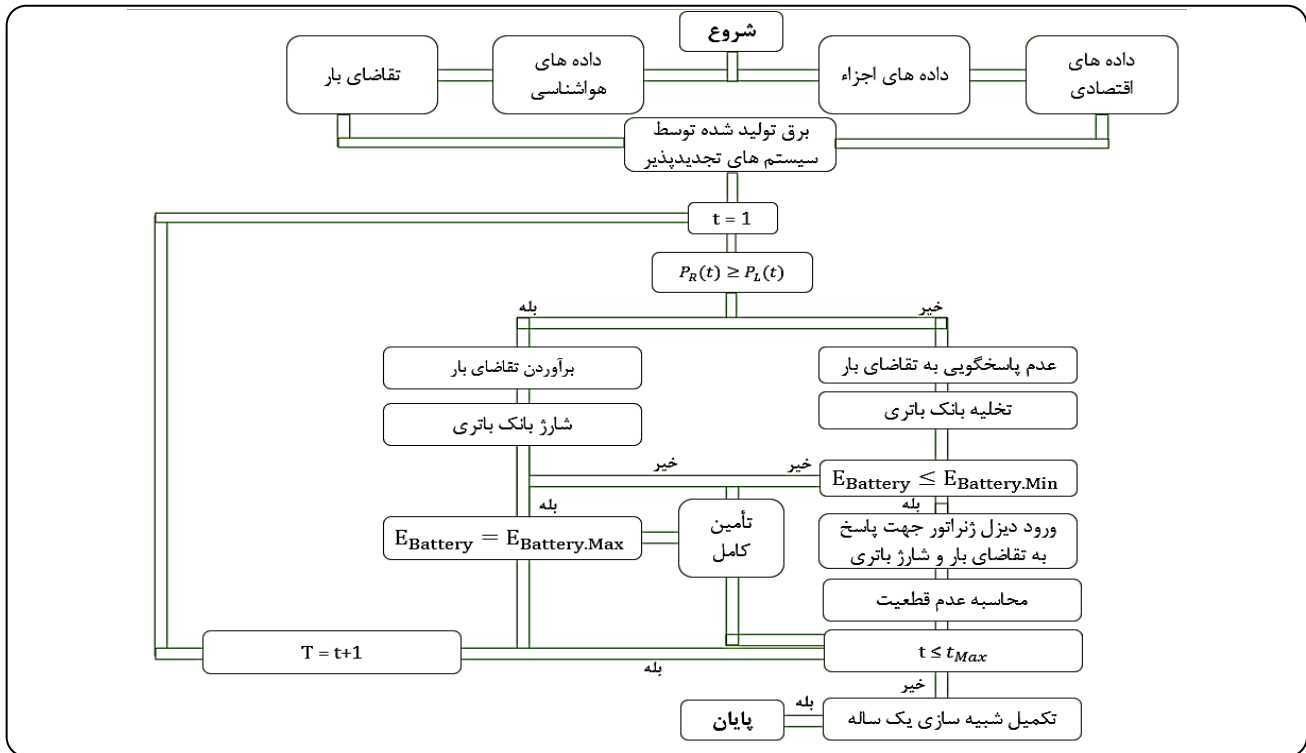
$$\text{Objective}_1 = \min(\text{NPC}, \text{COE}) \quad (12)$$

هدفی مهم و پای ثابت در طراحی هر سیستم تولید انرژی، افزایش قابلیت اطمینان است. بدین معناست که با توجه به نیاز منطقه در ساعات مختلف به برق، سیستم بهینه باید طوری تعبیه شود تا در ساعات مختلف منطقه مورد نظر دچار قطعی برق نشود. در این تحقیق، هدف تأمین بیشترین قابلیت اطمینان در تولید برق منطقه و بدون کوچک‌ترین کمبود و قطعی است. بیشترین قابلیت اطمینان، نیازمند کنترل عوامل کاهش عدم قطعیت (LPSP) است. پس می‌توان تابع هدف شماره ۲ را، به شکل رابطه زیر، رسیدن به کمترین مقدار عدم قطعیت تعریف کرد.

$$\text{Objective}_2 = \min(\text{LPSP}) \quad (13)$$

هدف دیگر و تقریباً همیشگی در طراحی و مدل‌سازی سیستم‌های ترکیبی تجدیدپذیر، کنترل و کاهش انتشار گاز کربن دی‌اکسید است. با مقایسه طرح‌های پیشنهادی با سیستم مبتنی بر تنها دیزل ژنراتور، تأثیرات مثبت طرح هیبریدی تجدیدپذیر بر کاهش انتشار کربن دی‌اکسید، به صورت واضح‌تر قابل مشاهده است.

$$\text{Objective}_3 = \min(\text{CO}_2) \quad (14)$$



شکل ۹ - استراتژی مدیریت انرژی شماره ۱

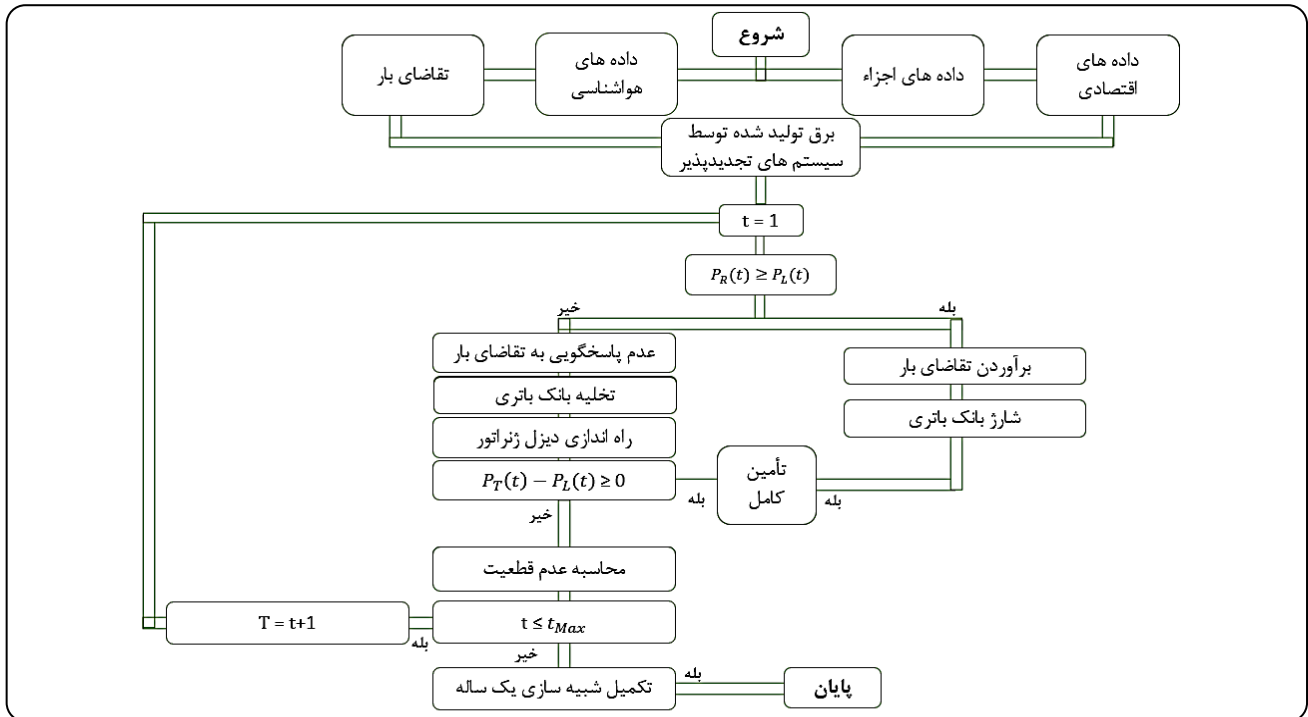
اطلاعات اجزای مختلف، داده‌های مربوط به تقاضای بار منطقه و داده‌های اقتصادی، تولید برق در سیستم‌های تجدیدپذیر محاسبه می‌شود. سپس مدیریت انرژی برای اندازه‌گیری سیستم هیبریدی نیز بررسی می‌شود. در این سناریو، باتری به‌عنوان سیستم ذخیره‌سازی انرژی معرفی می‌شود. اگر توان تولید شده ( $P_R$ ) سیستم تجدیدپذیر بیشتر از تقاضای بار باشد ( $P_L$ )، باتری شارژ می‌شود و قابلیت اطمینان مد نظر برای سیستم تأمین می‌شود. اگر توان تولیدی سیستم تجدیدپذیر پاسخگوی تقاضای بار نباشد، باتری نیز برای تأمین تقاضای بار تخلیه می‌شود. در بحث تخلیه باتری، اگر انرژی ذخیره شده به مقدار بسیار پایین تعیین شده برسد ( $E_{Battery} \leq E_{Battery.Min}$ )، ژنراتور دیزل برای تأمین کسری بار و شارژ باتری به کمک سیستم می‌آید.

شکل ۱۰ نمودار جریان مدیریت استراتژی انرژی شماره ۲، استراتژی Load Following را نشان می‌دهد. در استراتژی شماره ۲، از دیزل ژنراتور به‌عنوان سیستم پشتیبان برای تأمین کمبودهای تولید برق استفاده می‌شود. در این استراتژی، در صورت تأمین نشدن تقاضای بار توسط اجزای تجدیدپذیر، ابتدا باتری به کمک سیستم برای رفع کمبودها سیستم می‌آید، سپس اگر تقاضای بار توسط سیستم تجدیدپذیر و باتری نیز به صورت کامل پاسخ داده نشود، دیزل ژنراتور وارد میدان می‌شود. در این استراتژی بر خلاف استراتژی اول، اصراری به شارژ همیشگی باتری‌ها نیست و اولویت اصلی تنها تأمین بار مورد نیاز است. در شکل ۱۰،  $P_T$  برابر با توان کل تولید شده است.

ناشی از بهره‌برداری نامناسب جلوگیری شود. شایان ذکر است که مدل ارائه‌شده در این پژوهش نیز با وجود بهره‌گیری از داده‌های واقعی و نرم‌افزار هومر پرو، دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به استفاده از داده‌های میانگین اقلیمی و اقتصادی اشاره کرد که ممکن است تمامی نوسانات و عدم قطعیت‌های محیطی و اقتصادی آینده را منعکس نکند. علاوه بر این، روش بهینه‌سازی هومر عمدتاً مبتنی بر جست‌وجوی ترکیبی است که در سناریوهای ابعاد بالا و یا با تعداد متغیرهای زیاد، می‌تواند موجب افزایش هزینه محاسباتی یا پوشش ناقص برخی حالات مدیریتی پیشرفته سیستم گردد. برخی مفروضات اقتصادی مانند نرخ تورم و نرخ تنزیل طی کل دوره عمر سیستم به صورت ثابت در نظر گرفته شده است.

## استراتژی مدیریت انرژی

توزیع مناسب انرژی، یکی از عوامل مدیریت و کنترل هزینه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم است. برای سیستم‌های پیشنهادی در این تحقیق، ۲ استراتژی متفاوت مدیریت انرژی استفاده شده است. اندازه سیستم‌های ترکیبی بهینه نیز بر اساس این دو استراتژی انجام شده و نتایج بهتر در سناریوهای مختلف بر اساس این دو استراتژی به کار گرفته شده است. شکل ۹ نمودار جریان مدیریت استراتژی بر اساس استراتژی Cycle Charging را به‌عنوان استراتژی شماره ۱ نشان می‌دهد. طبق نمودار، ابتدا استفاده از داده‌های هواشناسی،



شکل ۱۰ - استراتژی مدیریت انرژی شماره ۲

### سناریو

برای ارائه یک تحلیل دقیق برای سیستم هیبریدی پیشنهادی، نرخ تورم ۳۰٪ و نرخ تنزیل ۳۵٪ برای این مطالعه پیشنهاد شد. نتایج آنالیز حساسیت با ۳ ترکیب مختلف در سه بخش به طور مجزا ارائه شده است.

### سناریو اول (توربین های باد / پنل های فتوولتائیک / دیزل ژنراتور / باتری)

این تجزیه و تحلیل، تأثیر استفاده همزمان از توربین های باد ۱۰ کیلوواتی مدل عمومی و پنل های خورشیدی صفحه تخت تک کریستالی در کنار یک دیزل ژنراتور با ماکزیمم ظرفیت ۸۶۰ کیلووات و یا استفاده از یکی از این دو منبع تجدیدپذیر در کنار دیزل ژنراتور را بر روی شاخص های اقتصادی همچون هزینه انرژی در نظر گرفت. جدول شماره ۶ نتایج تجزیه و تحلیل را بر اساس مقادیر هزینه انرژی از الف تا ج نشان می دهد. طبق نتایج، مقادیر بهینه هزینه در محدوده ۰،۱۹۱ تا ۲۲۰ دلار بر کیلووات ساعت و محدوده هزینه خالص فعلی نیز از ۴،۶۵ میلیون دلار تا ۵،۳۵ میلیون دلار را نشان می دهد. در هر ۳ سیستم بهینه به دست آمده می توان برتری استراتژی مدیریتی شماره ۱ بر ۲ را مشاهده کرد. همچنین بهترین سیستم به دست آمده شامل ۴۶۷ کیلووات انرژی گرفته شده از پنل های فتوولتائیک، استفاده از ۴۵ عدد توربین باد ۱۰ کیلوواتی در کنار استفاده از دیزل ژنراتور را نشان می دهد. همچنین این سیستم برای تبدیل و ذخیره برق به ترتیب از ۳۷۷ کیلووات مبدل (که این میزان مستقیماً با میزان تولید پنل ها و تعداد باتری ها مرتبط است) و تعداد ۳۲۹ باتری استفاده می کند.

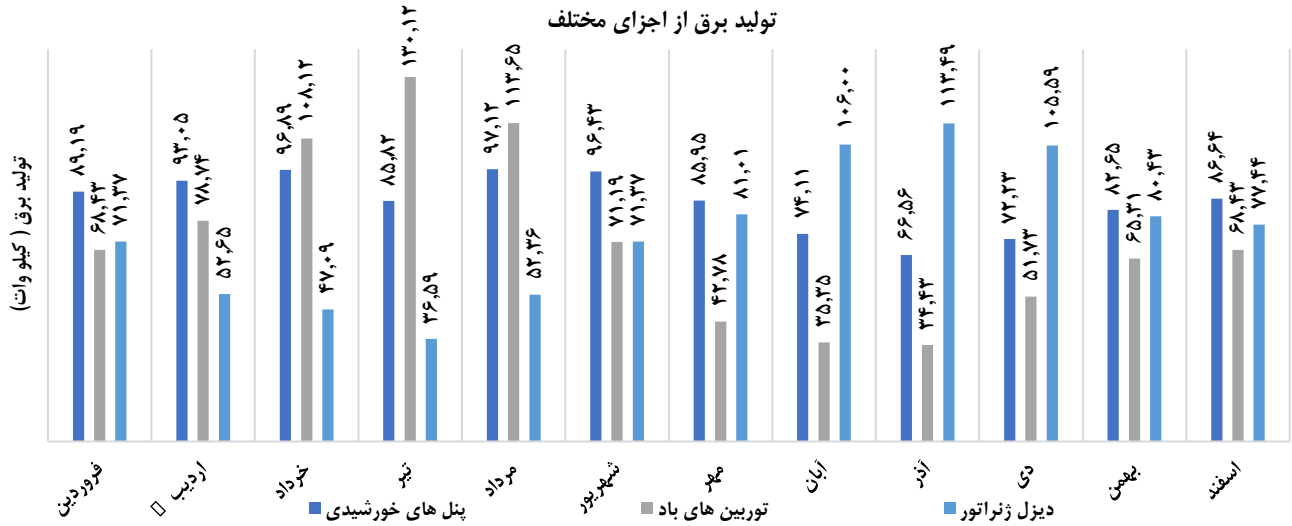
در این پژوهش، مدل سازی و شبیه سازی سیستم هیبریدی بر اساس داده های سری زمانی ساعتی سالیانه انجام شده است، که البته بیانگر واقعیت کلی منطقه مورد مطالعه می باشد. اگرچه این داده ها نمایانگر شرایط معمول منطقه مورد مطالعه هستند، اما باید اذعان داشت که مهم ترین چالش مدل سازی سیستم های انرژی، وجود عدم قطعیت های متعدد در پارامترهای ورودی است. متغیرهایی چون تابش خورشیدی، سرعت باد، نرخ سوخت ورودی، پروفیل و میزان تقاضای بار، نرخ رشد جمعیت و حتی قیمت سوخت و تجهیزات در طی زمان، دستخوش تغییرات تصادفی و غیرقابل پیش بینی اند. عدم لحاظ صریح این عدم قطعیت ها در مدل می تواند بر کارایی و پایداری راه حل های پیشنهادی اثرگذار باشد. در قسمت تجزیه و تحلیل حساسیت سعی شده است که برخی از این پارامترهای مهم و اثرگذار پوشش داده شود.

### نتایج و بحث

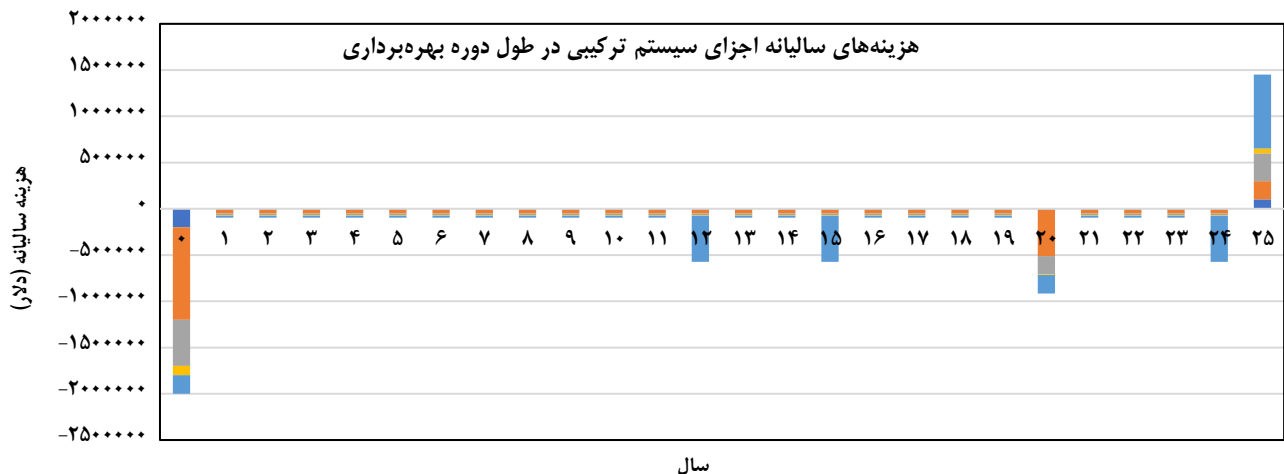
در این بخش، تحلیل فنی - اقتصادی - محیطی سیستم های هیبریدی بادی / خورشیدی / دیزل ژنراتور بهینه سازی شده برای برق رسانی روستای ۷۶۰ خانواری فریمان مورد بحث قرار گرفته است. تحلیل نتایج با در نظر پارامترهای کلیدی و مقادیر واقعی آن همچون نرخ تورم کشور، قیمت حامل سوخت، مشخصات فنی اقتصادی اجزای پیشنهادی و به کارگیری دو استراتژی کارآمد انرژی انجام پذیرفت. در نهایت، نتایج سیستم های بهینه مستخرج، برای تجزیه و تحلیل اقتصادی و محیط زیستی بهتر با یک سیستم کاملاً مبتنی بر دیزل ژنراتور مقایسه شد.

جدول ۶ - نتایج بهینه در سیستم ترکیبی بادی / خورشیدی / دیزل ژنراتور / باتری

سناریو	استراتژی	توربین باد (عدد)	پنل خورشیدی (کیلووات)	دیزل ژنراتور (کیلووات)	باتری (تعداد)	مبدل (کیلووات)	هزینه انرژی (دلار / کیلووات ساعت)	هزینه خالص فعلی (میلیون دلار)
الف	۱	۴۵	۴۶۷	۰-۸۶۰	۳۲۹	۳۷۷	۰,۱۹۱	۴,۶۶۵
ب	۱	---	۷۷۳	۰-۸۶۰	۴۵۱	۳۵۷	۰,۱۹۸	۴,۸۱۱
ج	۱	۷۷	---	۰-۸۶۰	۲۷۳	۳۶۵	۰,۲۲۰	۵,۳۲۵



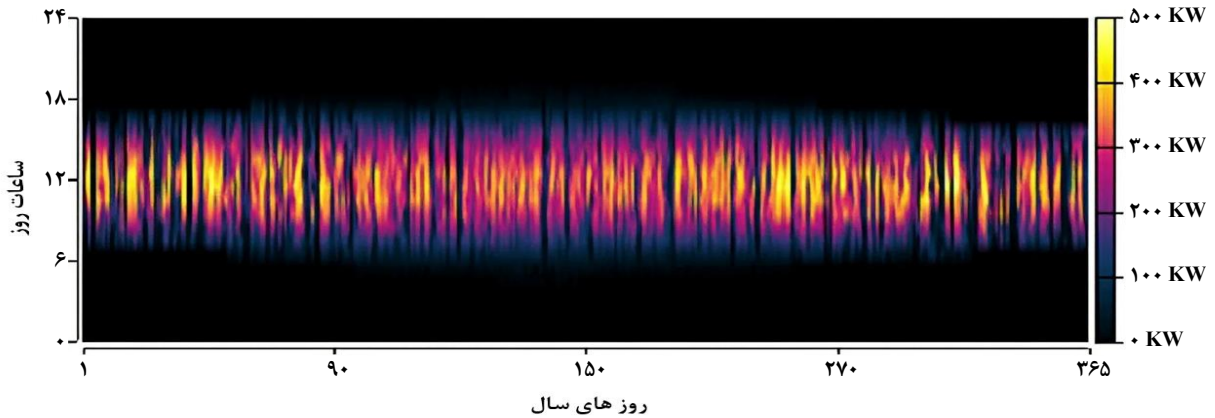
شکل ۱۱ - تولید برق بر اساس اجزاء برای هر ماه در بهترین سیستم ترکیبی بهینه



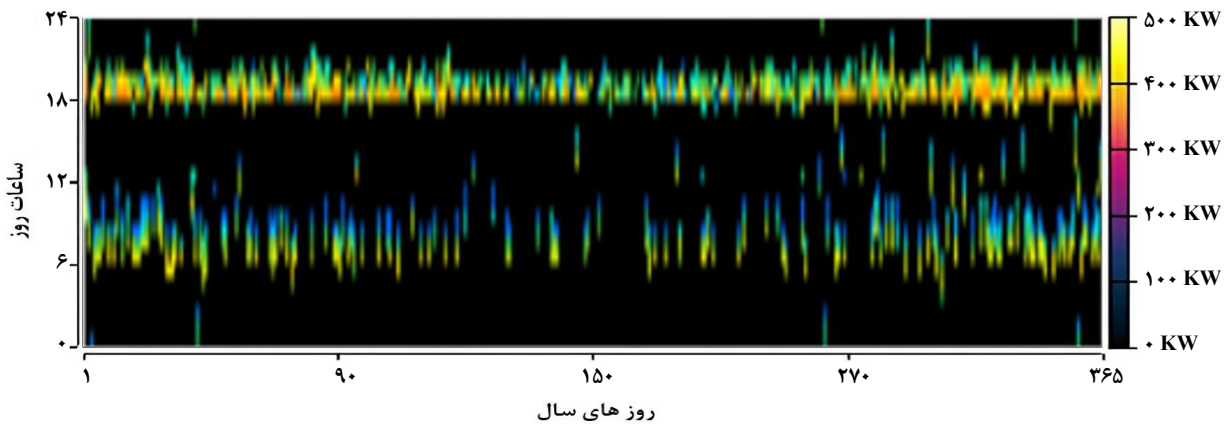
شکل ۱۲ - جریان نقدی سیستم ترکیبی بهینه بر اساس اجزا

رشد زیادی داشته و استفاده از دیزل ژنراتور بسیار کمتر می شود. شکل ۱۲ جریان نقدی اجزای سیستم در طول عمر تعریف شده پروژه (۲۵ سال)، برای سناریوی الف را نشان می دهد. طبق شکل مشاهده می شود که بیشترین هزینه سرمایه گذاری به دیزل ژنراتور اختصاص دارد. علاوه بر آن، دیزل ژنراتورها برای ارائه حداکثر کارایی خود حدود هر ۱۲ سال یکبار به هزینه سنگینی برای تعویض نیاز دارند. توربین های، باتری ها و مبدل نیز به ترتیب در سال های ۲۰، ۱۰ و ۱۵ نیاز به تعویض دارند.

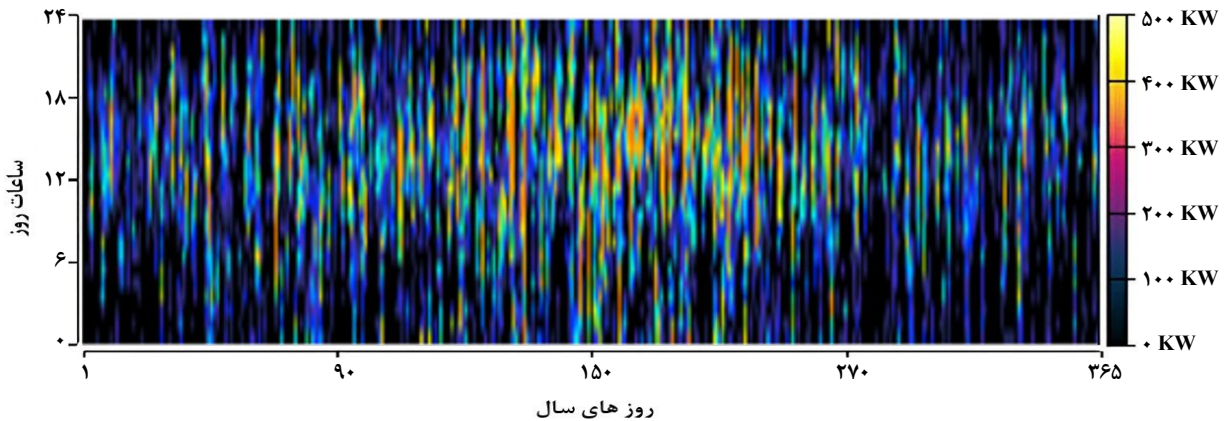
با در نظر گرفتن سناریوی الف به عنوان بهترین حالت در مفروضات مذکور، داده ها و ارقام بیشتری استخراج شد. شکل شماره ۱۱ میانگین تولید برق ماهانه توسط اجزای سیستم را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشاهده می شود، در ماه های مختلف میزان تولیدات از منابع موجود متفاوت است. بالفرض مثال، در ماه های سرد سال دیزل ژنراتور نقش پررنگ تری از قبل دارد، اما در تابستان با توجه به شدت تابش و میزان وزش باد منطقه تولید از این دو منبع تجدیدپذیر



شکل ۱۳ - برق سالانه تولید شده توسط پنل‌های فتوولتائیک



شکل ۱۴ - الکتریسیته تولید شده توسط دیزل ژنراتور



شکل ۱۵ - الکتریسیته تولید شده سالانه توسط توربین‌های باد

برای تولید انرژی، نقش دیزل ژنراتور ها پررنگ‌تر از قبل می‌شود. شکل شماره ۱۵ توان خروجی توربین‌های باد را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، تولید انرژی از توربین‌ها مانند دیزل ژنراتور به صورت اختیاری و همیشگی نیست و مستقیماً وابسته به سرعت باد است. از این رو، به علت تولید متناوب انرژی از توربین‌ها همانند پنل‌ها، سیستم به باتری برای ذخیره‌سازی انرژی مازاد نیازمند است. همچنین می‌توان دریافت که نمی‌توان با سیستم تنها متکی بر پنل‌های خورشیدی یا توربین‌های باد، به یکی از اهداف مقاله که تأمین و تضمین همه ساعته انرژی است، رسید.

توان خروجی پنل‌های فتوولتائیک در بازه زمانی یک‌ساله در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که این پنل‌ها قادر به تولید توان الکتریکی بین ۶ تا ۸ ساعت در روز هستند و برای ذخیره انرژی اضافی تولید شده در طول روز و جبران ناتوانی پنل‌ها، به کارگیری اجزایی مانند باتری برای ذخیره‌سازی و دیزل ژنراتور برای تولید انرژی ضروری است. در شکل ۱۴ تولید انرژی توسط دیزل ژنراتور به نمایش در آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ساعات ابتدایی شب به دلیل اوج مصرف برق در روستا و از کار افتادن پنل‌های خورشیدی

جدول ۷ - نتایج بهینه در سیستم ترکیبی بادی / خورشیدی / باتری

سناریو	استراتژی	توربین باد (عدد)	پنل خورشیدی (کیلووات)	باتری (تعداد)	مبدل (کیلووات)	هزینه انرژی (دلار / کیلووات ساعت)	هزینه خالص فعلی (میلیون دلار)
د	۱	۵۰	۳۳۶۱	۹۹۴	۸۱۴	۰,۳۵۷	۸,۶۸
ه	۱	---	۳۹۷۲	۱۳۳۴	۸۶۸	۰,۴۱۳	۱۰
و	۱	۸۲۲	---	۱۸۷۷	۱۷۵۶	۰,۸۱۷	۱۹,۹

جدول ۸ - نتایج بهینه در سیستم دیزل ژنراتور

سناریو	استراتژی	دیزل ژنراتور (کیلووات)	هزینه انرژی (دلار / کیلووات ساعت)	هزینه خالص فعلی (میلیون دلار)
ز	۲	۳۳۶۱	۰,۴۱۶	۱۰,۱



شکل ۱۶ - مقایسه سناریوهای بهینه در تحلیل اول و دوم (بر اساس هزینه خالص فعلی)

برای تأمین برق این منطقه باعث هزینه ۱۰,۱ میلیون دلاری و هزینه انرژی ۰,۴۱۶ دلار بر کیلووات ساعت می‌شود. برای مقایسه و درک بهتر نتایج به دست آمده در این ۳ تحلیل، شکل شماره ۱۷ به نمایش در آمده است. در این شکل، ۳ سناریو مختلف الف (توربین‌های باد، پنل‌های فتوولتائیک و دیزل ژنراتور)، د (توربین‌های باد و پنل‌های فتوولتائیک) و ز (دیزل ژنراتور) بر اساس هزینه انرژی به دست آمده مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از منابع تجدیدپذیر خورشیدی و بادی در کنار دیزل ژنراتور به عنوان سیستم پشتیبان، در مقایسه با سیستم متکی به منابع تجدیدپذیر تا ۸۷ درصد باعث افزایش هزینه انرژی می‌شود و در مقایسه با سیستم وابسته به دیزل ژنراتور تا ۱۱۷ درصد هزینه انرژی را افزایش می‌دهد.

### ارزیابی زیست محیطی

یکی از اهداف اساسی و همیشگی استفاده از سیستم‌های هیبریدی دارای عضوهای تجدیدپذیر، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مضر به‌ویژه کربن دی‌اکسید است. عامل تولید کربن دی‌اکسید و آلانده‌های دیگر در سیستم‌های هیبریدی شامل توربین‌های باد، پنل‌های خورشیدی

### سناریو دوم (توربین‌های باد / پنل‌های فتوولتائیک / باتری)

در سناریو دوم از سیستم ترکیبی پیشنهادی، دیزل ژنراتور از مدل‌سازی حذف شده و سپس سیستم‌های ترکیبی بهینه از بقیه اجزای موجود به دست می‌آید. طبیعتاً با حذف دیزل ژنراتور، نقش باتری‌ها نیز به عنوان تنها منبع ذخیره‌سازی سیستم پررنگ‌تر از قبل می‌شود. جدول شماره ۳ نتایج تجزیه و تحلیل را بر اساس مقادیر هزینه انرژی از د تا و نشان می‌دهد. نتایج بهینه در ۳ بخش مجزا اندازه‌گیری شد. ابتدا بهترین سیستم امکان پذیر با استفاده از هر دو منبع تجدیدپذیر (باد و خورشید) در کنار باتری محاسبه شد، سپس سیستم بر اساس تنها یک منبع تجدیدپذیر در کنار باتری نیز اندازه‌گیری شده و نتایج آن در جدول آمده است. طبق نتایج، مقادیر بهینه هزینه در محدوده فعلی نیز از ۰,۳۵۷ تا ۰,۸۱۷ دلار بر کیلووات ساعت و محدوده هزینه خالص فعلی نیز از ۸,۶۸ میلیون دلار تا ۱۹,۹ میلیون دلار را نشان می‌دهد. همچنین بهترین سیستم به دست آمده شامل هر دو منبع تجدیدپذیر، یعنی ۳۳۶۱ کیلووات انرژی گرفته شده از پنل‌های فتوولتائیک و استفاده از ۵۰ عدد توربین باد ۱۰ کیلوواتی را نشان می‌دهد. همچنین این سیستم برای تبدیل و ذخیره برق به ترتیب از ۸۱۴ کیلووات مبدل و تعداد ۹۹۴ باتری استفاده می‌کند. طبق سناریوهای جدول شماره ۷ می‌توان نتیجه گرفت که حذف هر کدام از عناصر تجدیدپذیر باعث افزایش هزینه خالص فعلی می‌شود، همچنین نتایج حاکی آن است که حذف دیزل ژنراتور از تحلیل نیز می‌تواند اثر منفی بر نتایج اقتصادی بگذارد.

شکل شماره ۱۶ سناریوهای الف (شامل توربین‌های باد، پنل‌های فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و باتری) و د (شامل توربین‌های باد، پنل‌های فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و باتری) را بر اساس شاخص اقتصادی هزینه خالص فعلی مقایسه نموده است. طبق نتایج می‌توان مشاهده کرد که با حذف دیزل ژنراتور و تنها اتکا به منابع خورشیدی باد می‌تواند باعث افزایش ۸۷ درصدی هزینه خالص فعلی شود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در این تحقیق، استفاده از دیزل ژنراتور در کنار سیستم‌های تجدیدپذیر می‌تواند باعث مقرون به صرفه‌تر شدن پروژه نهایی شود.

### سناریو سوم (دیزل ژنراتور)

در این تجزیه و تحلیل، تأثیر استفاده از یک دیزل ژنراتور تنها بر روی شاخص‌های اقتصادی در نظر گرفته شد. جدول شماره ۸ نتیجه تجزیه و تحلیل را نشان می‌دهد. طبق نتیجه، استفاده از دیزل ژنراتور

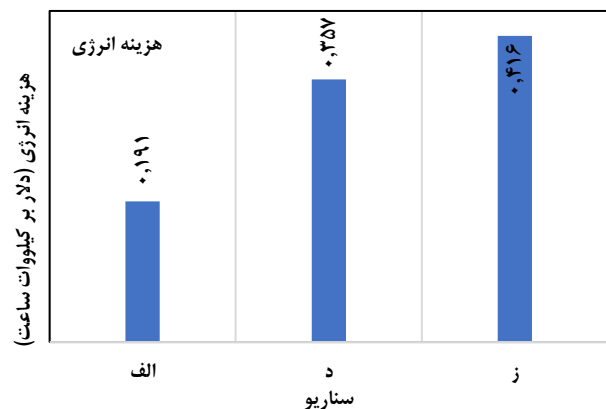
جدول ۹ - مقایسه اقتصادی و زیست‌محیطی سناریوهای بهینه (بر حسب کیلوگرم/سال)

سناریو	کربن دی‌اکسید	مونو اکسید کربن	هیدروکربن نسوخته	ذرات معلق	دی‌اکسید گوگرد	اکسید نیتروژن
الف	۴۵۱۳۸۸	۲۸۴۵	۱۲۴	۱۷,۲	۱۱۰۵	۲۶۷۳
د	---	---	---	---	---	---
ز	۱۶۲۹۸۶۳	۱۰۲۷۴	۴۴۸	۶۲,۳	۳۹۹۱	۹۶۵۱

جدول ۱۰ - آنالیز حساسیت بر قیمت سوخت

مورد	قیمت سوخت (دلار/لیتر)	توربین باد (عدد)	پنل خورشیدی (کیلووات)	دیزل ژنراتور (کیلووات)	باتری (تعداد)	مبدل (کیلووات)	هزینه انرژی (دلار/کیلووات ساعت)	هزینه خالص فعلی (میلیون دلار)
۱ (پایه)	۰,۰۱۰	۴۵	۴۶۷	۸۶۰-۰	۳۳۹	۳۷۷	۰,۱۹۱	۴,۶۵
۲	۰,۰۱۵	۲۳	۷۲۸	۸۶۰-۰	۸۶۰	۴۱۷	۰,۱۹۳	۴,۷۰
۳	۰,۰۲۰	۱۶	۶۵۸	۸۶۰-۰	۸۶۰	۴۱۳	۰,۱۹۴	۴,۷۲

و تابش خورشید بر روی نتایج نهایی سیستم بهینه پرداخته می‌شود. در بخش دوم، تجزیه و تحلیل حساسیت، نتایج بهینه سیستم ترکیبی مستقل فعلی با سیستم شبکه سراسری مقایسه می‌شود تا تأثیر سیستم ترکیبی مستقل و شبکه سراسری برق بر شاخص‌های عملکرد و هزینه به صورت دقیق‌تر مشخص گردد. همچنین در بخش پایانی، نتایج سیستم ترکیبی بهینه در مواردی که فاقد ترکیب کامل هستند و کمتر مورد بحث قرار گرفتند به نمایش در می‌آید تا بتوان دید کامل‌تری بر این تحلیل‌ها داشت و با اطلاعات جامع‌تری به سراغ نتیجه‌گیری نهایی رفت.



شکل ۱۷ - مقایسه سناریوهای بهینه در تحلیل‌های اول تا سوم (بر اساس هزینه انرژی)

### بخش اول

جدول ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش تدریجی قیمت سوخت دیزل در موارد ۱ تا ۳ (از ۰.۰۱ تا ۰.۰۲ دلار بر لیتر)، پیکربندی سیستم هیبریدی بهینه جهت تأمین برق روستا به شکل محسوسی تغییر می‌کند؛ به طوری که با افزایش قیمت سوخت، تمایل سیستم به سمت کاهش ظرفیت یا حذف دیزل ژنراتور و افزایش استفاده از پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، تعداد باتری و ظرفیت مبدل بیشتر شده و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها افزایش می‌یابد. این روند موجب می‌شود هرچند هزینه خالص فعلی کل سیستم و هزینه انرژی در مقیاس میلیون دلار و دلار بر کیلووات ساعت با افزایش قیمت سوخت کمی افزایش یابد (مثلاً هزینه انرژی از ۰,۱۹۱ به ۰,۱۹۴ دلار/کیلووات ساعت و هزینه خالص فعلی سیستم از ۴,۶۵ به ۴,۷۲ میلیون دلار)، اما سیستم پایدارتری رقم خورده و وابستگی به سوخت‌های فسیلی و در نتیجه انتشار آلاینده‌ها کمتر می‌شود. بدین ترتیب، نتایج این جدول از منظر سیاست‌گذاری انرژی نشان می‌دهد که هرچه قیمت سوخت فسیلی بالاتر باشد، انتخاب گزینه‌های بهینه به نفع منابع پاک و تجدیدپذیر اما گران‌تر رقم می‌خورد و سیستم هیبریدی از انعطاف مطلوبی در واکنش به تغییرات قیمت سوخت برخوردار است. با مشاهده این نتایج اثرگذاری قیمت سوخت ورودی، بسته به هدف و اولویت‌ها، این جدول می‌تواند کمک‌کننده تصمیم‌گیران و کارگزاران انرژی کشور در انتخاب و طراحی سیستم‌های ترکیبی مناطق فاقد شبکه برق سراسری باشد.

و دیزل ژنراتور نیز طبیعتاً دیزل ژنراتورها هستند. این بخش، به مقایسه انتشار آلودگی سیستم‌های بهینه به دست آمده در ۳ تحلیل انجام شده می‌پردازد. طبق جدول ۹ مشاهده می‌شود که در سناریو د که شامل توربین‌های باد و پنل‌های فتوولتائیک و فاقد دیزل ژنراتور است، انتشار آلودگی به مقدار صفر می‌رسد. در هنگام استفاده از سیستم هیبریدی شامل اجزای تجدیدپذیر و دیزل ژنراتور (سناریو الف) در مقایسه با کاهش ۷۳ درصدی انتشار کربن دی‌اکسید مشاهده شده است. با استفاده از دیزل ژنراتور برای تأمین برق روستا، مقدار کربن دی‌اکسید منتشر شده در سال به مقدار ۱۶۲۹۸۶۳ کیلوگرم در سال می‌رسد که عدد قابل توجهی در مقایسه با کربن دی‌اکسید منتشر شده در سیستم‌های بهینه هیبریدی است. همچنین در جدول فوق نمی‌توان از مقدار منتشره مونو اکسید کربن غافل شد. طبق نتایج، استفاده از دیزل ژنراتور تنها برای تأمین برق، در مقایسه با سیستم هیبریدی در سناریو الف، باعث افزایش انتشار مونو اکسید کربن تا حدود ۴ برابر می‌شود.

### تجزیه و تحلیل حساسیت

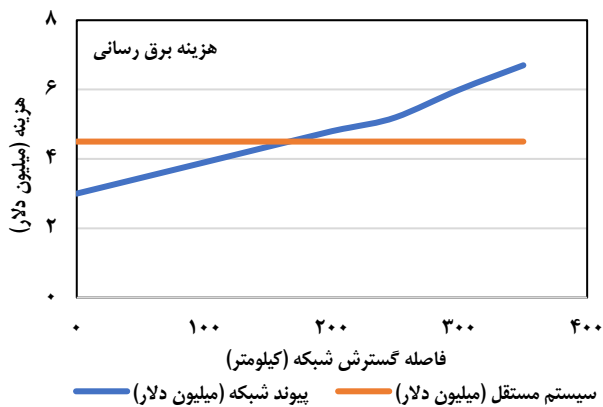
در این قسمت، در بخش اول به بررسی اثر گذاری پارامترهایی همچون نرخ سوخت مورد استفاده در دیزل ژنراتور، سرعت باد

جدول ۱۱- تحلیل حساسیت تغییرات تابش خورشید

مورد	تابش خورشیدی (کیلووات ساعت/ متر مربع/ روز)	توربین باد (عدد)	پنل خورشیدی (کیلووات)	دیزل ژنراتور (کیلووات)	باتری (تعداد)	مبدل (کیلووات)	هزینه انرژی (دلار/ کیلووات ساعت)	هزینه خالص فعلی (میلیون دلار)
۱	۳,۸۵	۴۱	۶۳۸	۸۶۰-۰	۳۳۱	۴۰۱	۰,۲۰۱	۴,۹۰
۲ (پایه)	۴,۸۵	۴۵	۴۶۷	۸۶۰-۰	۳۲۹	۳۷۷	۰,۱۹۱	۴,۶۵
۳	۵,۸۵	۴۶	۶۰۲	۸۶۰-۰	۴۰۰	۳۵۱	۰,۱۸۶	۴,۵۴

جدول ۱۲- تحلیل حساسیت تغییرات سرعت باد

مورد	سرعت باد (متر/ثانیه)	توربین باد (عدد)	پنل خورشیدی (کیلووات)	دیزل ژنراتور (کیلووات)	باتری (تعداد)	مبدل (کیلووات)	هزینه انرژی (دلار/ کیلووات ساعت)	هزینه خالص فعلی (میلیون دلار)
۱	۳,۷۰	-	۷۴۳	۸۶۰-۰	۴۵۴	۳۶۵	۰,۱۹۸	۴,۸۳
۲ (پایه)	۴,۷۰	۴۵	۴۶۷	۸۶۰-۰	۳۲۹	۳۷۷	۰,۱۹۱	۴,۶۵
۳	۵,۷۰	۵۰	۳۸۴	۸۶۰-۰	۳۰۴	۳۶۶	۰,۱۷۷	۴,۳۲



شکل ۱۸: مقایسه هزینه کل فعلی سیستم برق‌رسانی به روستا به دو روش توسعه شبکه سراسری و سیستم مستقل

همچنین، افزایش سرعت باد باعث کاهش هزینه کل فعلی پروژه از ۴,۶۵ میلیون دلار به ۴,۳۲ میلیون دلار و نیز کاهش مقدار هزینه خالص فعلی انرژی از ۰,۱۹۱ به ۰,۱۷۷ دلار بر کیلووات ساعت می‌شود. این نتایج بیانگر آن است که بهبود شرایط باد منجر به افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر، بهره‌وری اقتصادی بالاتر و کاهش هزینه‌های عملیاتی و سوخت سیستم ترکیبی برق‌رسانی روستایی می‌شود.

### بخش دوم

با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل ۱۸، مقایسه هزینه کل فعلی سیستم برق‌رسانی به روستا به دو روش توسعه شبکه سراسری و سیستم مستقل، مشخص است که هزینه سیستم مستقل تقریباً ثابت و برابر با حدود ۴,۸ میلیون دلار است، در حالی که هزینه توسعه شبکه با افزایش فاصله به صورت خطی رشد می‌یابد و در فاصله بالای ۱۸۵ کیلومتر، این دو هزینه با یکدیگر برابر می‌شوند (نقطه سر به سر). بنابراین در فواصل کمتر از این مقدار، توسعه شبکه سراسری گزینه اقتصادی‌تری محسوب می‌شود، اما با عبور از این آستانه، سیستم مستقل از نظر

تحلیل حساسیت بعدی بر روی تغییرات پارامتر تابش خورشید انجام می‌شود. بر اساس نتایج جدول ۱۱، سه مقدار میانگین تابش خورشیدی روزانه شامل مقدار پایه منطقه (۴,۸۵ کیلووات ساعت بر مترمربع بر روز) و دو مقدار پایین‌تر و بالاتر (۳,۸۵ و ۵,۸۵) مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد با افزایش تابش خورشیدی از ۳,۸۵ به ۵,۸۵ کیلووات ساعت بر متر مربع بر روز، سیستم ترکیبی صرفاً به میزان ظرفیت و تولید پنل‌ها متمرکز نمی‌شود و کلیت سیستم را مورد تاثیر قرار می‌دهد. با توجه به رابطه معکوس میزان تابش با هزینه انرژی، می‌توان دریافت که اگرچه با افزایش تابش خورشیدی از ۳,۸۵ به ۴,۸۵، مقدار ظرفیت در نظر گرفته شده برای پنل‌های خورشیدی مقدار کاهشی را نشان می‌دهد، اما راندمان به مراتب بهتری را از خود بروز می‌دهد. همین امر باعث کاهش هزینه انرژی در مقدار ۴,۸۵ (مقدار پایه) به نسبت مقدار ۳,۸۵ می‌باشد. البته دلایلی دیگر همچون روش بهینه سازی نرم افزار هومر پرو نیز می‌تواند عامل آن باشد. در هر صورت، طبق جدول ۱۱، با افزایش میزان تابش خورشید، هزینه انرژی و هزینه خالص فعلی مقادیر کمتری را نشان می‌دهند و پنل‌های خورشیدی نقش قوی‌تری را بازی می‌کنند.

بر اساس نتایج تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات سرعت باد که در جدول ۱۲ نشان داده شده است، سه مقدار برای میانگین سرعت باد روزانه شامل مقدار پایه منطقه (۴,۷۰ متر بر ثانیه) و دو مقدار پایین‌تر (۳,۷۰ متر بر ثانیه) و بالاتر (۵,۷۰ متر بر ثانیه) بررسی شده است. ابتدا مشاهده می‌شود با کاهش سرعت باد، استفاده از توربین‌ها در سیستم بهینه به صفر می‌رسد. این امر ناشی از مشخصات فنی توربین باد انتخاب شده می‌باشد، که با کاهش سرعت باد به ۳,۷۰ متر بر ثانیه، حداقل سرعت باد تعریف شده برای استارت توربین انتخابی محقق نمی‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت باد، تعداد توربین‌های بادی مورد نیاز نیز از ۴۵ عدد در سرعت پایین به ۵۰ عدد در سرعت بالا افزایش می‌یابد.

جدول ۱۳: شش آرایش مختلف باقیمانده از سیستم‌های ترکیبی برق‌رسانی روستایی بر اساس پارامترهای فنی و اقتصادی

مورد	توربین باد (عدد)	پنل خورشیدی (کیلووات)	دیزل ژنراتور (کیلووات)	باتری (تعداد)	مبدل (کیلووات)	هزینه انرژی (دلار / کیلووات ساعت)	هزینه خالص فعلی (میلیون دلار)
۱	-	۷۴۳	۸۶۰۰۰	۴۵۴	۳۶۵	۰,۱۹۸	۴,۸۳
۲	۵۵	-	۸۶۰۰۰	۲۵۹	۳۲۹	۰,۲۲۱	۵,۳۷
۳	۹۶	-	۸۶۰۰۰	-	-	۰,۴۰۶	۹,۸۹
۴	-	۲۱,۹	۸۶۰۰۰	-	۶	۰,۴۱۷	۱۰,۲
۵	-	۳۲۵۳	-	۱۶۲۶	۱۷۸۳	۰,۴۵۹	۱۱,۲
۶	۵۶۱	-	-	۲۹۷۰	۱۱۰۵	۰,۸۴۸	۲۰,۶

دیزل ژنراتور و تعداد توربین‌های بادی تأثیر مستقیمی بر هزینه کل و قیمت نهایی هر کیلووات ساعت برق دارد، به گونه‌ای که کاهش نامتناسب اجزاء پشتیبان یا افزایش بیش از حد اجزاء تجدیدپذیر، می‌تواند هزینه پروژه را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. این داده‌ها بر اهمیت انجام تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی ظرفیت اجزاء سیستم بر اساس منابع محلی، بار مصرفی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری تأکید دارد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی ظرفیت اجزای سیستم هیبرید برای دستیابی به کمترین قیمت تمام‌شده برق و هزینه کل پروژه، نیازمند ملاحظات دقیق فنی و اقتصادی بوده و صرف افزایش ظرفیت منابع تجدیدپذیر همواره گزینه مناسبی نیست. بهترین ترکیب، ترکیبی است که علاوه بر داشتن سهم مناسب انرژی پاک، هزینه را به حداقل برساند و قابلیت اطمینان تأمین انرژی را حفظ کند. این تحلیل‌ها می‌تواند در سیاست‌گذاری و اجرای پروژه‌های برق‌رسانی روستایی با رویکرد توسعه پایدار بسیار موثر و کاربردی باشد. در آخر نیز، علاوه بر نتایج نشان داده شده از سیستم‌های مختلف در جدول ۱۳، جهت بررسی عمیق‌تر تأثیر محدودیت‌های ظرفیتی و تعدادی هر یک از اجزا بر عملکرد و نتایج بهینه‌سازی سیستم، تحلیل‌های حساسیت جداگانه‌ای برای ظرفیت‌های دیزل ژنراتور، پنل‌های فتوولتائیک و تعداد توربین بادی انجام شد. در این تحلیل‌ها، مقادیر حد پایین و بالای ظرفیت و تعداد برای هر جزء در بازه مشخصی تغییر داده شد و اثر آن بر پارامترهای کلیدی نظیر هزینه انرژی، هزینه خالص فعلی، انتشار کربن دی‌اکسید و میزان تأمین بار بررسی گردید. تحلیل و یافته‌های بدست آمده از نتایج به معرض تحریر درآمد.

#### یافته‌های کلیدی عبارتند از:

- افزایش ظرفیت دیزل ژنراتور منجر به ارتقاء قابلیت اطمینان (کاهش احتمال قطع برق) می‌شود اما به علت افزایش مصرف سوخت، هزینه عملیاتی و انتشار آلاینده‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر می‌گردد. به‌ویژه، وقتی ظرفیت دیزل بیشتر از مقدار بهینه تعیین شده شود، تأثیری منفی بر هدف زیست‌محیطی دارد.
- افزایش تعداد پنل‌های خورشیدی تا حد مشخصی باعث کاهش وابستگی به دیزل و کاهش هزینه سوخت می‌شود؛ با این حال،

اقتصادی برتری دارد. این نتیجه نشان‌دهنده اهمیت نقش فاصله در انتخاب نوع سیستم برق‌رسانی بوده و تأکید می‌کند که در مناطق دورافتاده و پراکنده، استفاده از سیستم‌های مستقل، راهکار بهینه و مقرون‌به‌صرفه است، چراکه هزینه‌های خط انتقال و نگهداری شبکه سراسری با افزایش فاصله به‌شدت رشد می‌کند، در حالی که هزینه سیستم مستقل عمده‌تاً ثابت باقی می‌ماند.

#### بخش سوم

در جدول ۱۳، شش آرایش مختلف از سیستم‌های ترکیبی برق‌رسانی روستایی بر اساس پارامترهای فنی و اقتصادی مانند ظرفیت نیروگاه خورشیدی، ظرفیت دیزل ژنراتور، تعداد توربین بادی، تعداد باتری، ظرفیت مبدل، هزینه کل فعلی پروژه و هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق ارائه شده است. این آرایش‌ها با هدف مقایسه عملکرد فنی-اقتصادی گزینه‌های فرعی و کمتر بررسی شده در قسمت نتایج و بحث در شرایط واقعی مدل‌سازی شده‌اند. این جدول صرفاً جهت بهبود تحلیل و تکمیل بررسی تمام نتایج بدست آمده بر اساس اجزای موجود، به نمایش در آمده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی بدون در نظر گرفتن تناسب فنی با بار موردنیاز و هزینه‌های سرمایه‌گذاری، لزوماً منجر به بهینه‌ترین سیستم نمی‌شود. به‌عنوان مثال، کمترین مقدار هزینه خالص فعلی (۴,۸۳ میلیون دلار) و هزینه انرژی (۰,۱۹۸ دلار/کیلووات ساعت) متعلق به ترکیبی است که نسبت مناسبی بین ظرفیت پنل‌های خورشیدی و توان ژنراتور دیزلی دارد و از ظرفیت مبدل کافی برخوردار است. این ترکیب، توازن بین هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های جاری را نسبت به سیستم‌های دیگر موجود در این جدول، به خوبی برقرار کرده است. در مقابل، در ردیف‌هایی که ظرفیت یا تعداد کلی اجزاء مخصوصاً پنل‌های فتوولتائیک، بسیار بالا انتخاب شده (مثلاً ظرفیت ۳۲۵۳ کیلووات برای پنل‌ها یا ۵۶۱ عدد توربین باد)، هزینه کل فعلی و هزینه انرژی به‌شدت افزایش یافته است (تا ۲۰,۶ میلیون دلار و ۰,۸۴۸ دلار بر کیلووات ساعت)، که نشان‌دهنده غیربهینه بودن این آرایش‌ها از نظر اقتصادی است. همچنین مشاهده می‌شود که تغییر در ظرفیت

جدول ۱۴ - مقایسه نتایج بهینه با سایر بهینه‌سازی‌های هیبریدی مشابه

مرجع	روش استفاده شده	پیکربندی	هزینه انرژی (دلار/ کیلووات ساعت)
مطالعه فعلی	نرم‌افزار هومر	بادی / خورشیدی / دیزل ژنراتور / باتری	۰,۱۹۱
[۳]	نرم‌افزار هومر	بادی / خورشیدی / دیزل ژنراتور / باتری	۰,۲۰۱
[۳۳]	نرم‌افزار هومر	بادی / خورشیدی / دیزل ژنراتور / باتری	۰,۲۴۶
[۳۴]	الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات و تکامل دیفرانسیلی	بادی / خورشیدی / دیزل ژنراتور / باتری	۰,۱۶۰
[۳۵]	الگوریتم گرگ خاکستری	بادی / خورشیدی / دیزل ژنراتور / باتری	۰,۳۱۳
[۳۶]	الگوریتم ازدحام ذرات	بادی / خورشیدی / دیزل ژنراتور / باتری	۰,۲۰۰

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک سیستم انرژی تجدیدپذیر مستقل ترکیبی شامل پنل‌های فتوولتائیک و توربین‌های باد به‌عنوان منابع تولید برق اولیه و دیزل ژنراتور و بانک‌های باتری به‌عنوان سیستم پشتیبان برای برقرسانی روستای ۷۶۰ خانواری واقع در شمال شرق ایران مورد استفاده قرار گرفت. هدف نهایی این مطالعه دستیابی به پیکربندی بهینه با حداقل هزینه و انتشار کربن‌دی‌اکسید و حداکثر تأمین برق مورد نیاز بود. برای دستیابی به سیستم هیبریدی بهینه، یک مدل جامع مبتنی بر دو استراتژی مدیریت انرژی، پیشنهاد شد. تجزیه و تحلیل حساسیت در ۳ بخش بر روی سیستم‌های هیبریدی با پیکربندی‌های متفاوت انجام شد. در آخر نیز ارزیابی زیست‌محیطی بر اساس انتشار آلاینده‌ها از طریق سیستم‌های هیبریدی بهینه صورت گرفت. نکات مهم این تحقیق به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- طبق نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت، سیستم هیبریدی بهینه شامل ۴۶۷ کیلووات انرژی گرفته شده از پنل‌های فتوولتائیک، ۴۵ عدد توربین باد ۱۰ کیلوواتی در کنار استفاده از یک واحد دیزل ژنراتور با ظرفیت متغیر ۰ تا ۸۶۰ کیلووات و استفاده از ۹۹۴ عدد باتری، با هزینه انرژی ۰,۱۹۱ دلار بر کیلووات ساعت و هزینه خالص فعلی ۴۶۵ میلیون دلار و انتشار آلاینده معقول و پایین، بهترین سیستم ممکن برای تأمین برق منطقه است.
- طبق نتایج مختلف به‌دست‌آمده، استراتژی شارژ چرخه (استراتژی شماره ۱) برای سیستم‌های پیشنهادی این تحقیق کارآمدی بالاتری را داراست.
- سیستم هیبریدی شامل پنل‌های فتوولتائیک و توربین‌های باد در کنار باتری اگرچه از نظر زیست‌محیطی بسیار معقول و قابل قبول است، اما از نظر اقتصادی باعث افزایش ۸۷ درصدی هزینه‌ها می‌شود که این امر بر حسب اهداف مد نظر قابل قبول نیست.
- ارزیابی اقتصادی سیستم کاملاً متکی به دیزل ژنراتورها نشان داد که علاوه بر بحث آلودگی زیست‌محیطی این سیستم‌ها، از نظر اقتصادی نیز در مقایسه با سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر بسیار هزینه بر تر و غیرمنطقی است.

رشد بیش از یک نقطه به دلیل افزایش هزینه سرمایه‌ای، منجر به بالا رفتن هزینه کل پروژه می‌شود. همچنین، سهم انرژی تجدیدپذیر بیشتر به کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید کمک می‌کند.

- افزایش تعداد توربین‌های بادی در مناطق با پتانسیل مناسب باد، باعث بهبود پارامترهای اقتصادی و زیست‌محیطی در قیاس با افزایش ظرفیت دیزل می‌شود. ولی اگر ظرفیت نامعقول و بیش از نیاز سیستم انتخاب شود، سرمایه‌گذاری اولیه توجیه پذیری اقتصادی خود را از دست می‌دهد.

در مجموع، محدودیت‌های ظرفیت اجزای اصلی نقشی حیاتی در دستیابی به نقطه بهینه هزینه آلاینده‌گی قابلیت اطمینان دارند و انتخاب آن‌ها باید همسو با ویژگی‌های تقاضا و پتانسیل منطقه‌ای صورت گیرد. نتایج تحلیل‌های حساسیت نشان داد که مقدار بهینه برای هر عنصر، نقطه‌ای است که در آن هر سه هدف اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی در تعادل مطلوبی قرار می‌گیرند.

### مقایسه نتایج و اعتبارسنجی

هدف از این بخش، اعتبارسنجی این تحقیق با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از آن با نتایج مستخرج شده از سایر مقالات معتبر است. جدول شماره ۱۴، نتیجه بهترین و کاملترین سناریو به‌دست‌آمده (سناریو الف) را با نتایج مقالاتی بسیار نزدیک به تحقیق فعلی از جهت پیکربندی سیستم هیبریدی بهینه و اهداف آن، بر اساس شاخص اقتصادی هزینه انرژی مقایسه کرده است. مقالات بررسی شده از روش‌هایی همچون نرم‌افزار هومر (مانند تحقیق فعلی) و یا الگوریتم‌های مطرحی همچون الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، گرگ خاکستری (GWO)، ژنتیک (GA) و تکامل تفاضلی (DE) به مدل‌سازی و بهینه‌سازی سیستم مدنظرشان پرداخته و نتایج اقتصادی آن را استخراج کردند. با بررسی این جدول می‌توان دریافت که هزینه انرژی در چارچوب‌های انرژی نسبتاً مشابه، نزدیک به نتیجه فعلی در این تحقیق است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی‌ها و بهینه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق معتبر و پایا هستند.

### پیشنهادات

با توجه به نتایج این مطالعه، سیستم هیبریدی ترکیبی از پنل‌های فتوولتائیک، توربین‌های باد، دیزل ژنراتور و باتری می‌تواند راهکاری بهینه و عملی برای تأمین برق پایدار در مناطق روستایی فاقد شبکه سراسری باشد. برای اجرای موفق این سیستم در سایر مناطق، توجه به نکات زیر ضروری است:

۱- **بررسی دقیق منابع انرژی محلی:** پیش از طراحی و پیاده‌سازی، لازم است پتانسیل خورشیدی و بادی هر منطقه با داده‌های اقلیمی و محاسبات فنی-اقتصادی به طور دقیق ارزیابی گردد تا ظرفیت اجرا بهینه انتخاب شود.

۲- **بومی‌سازی پیکربندی سیستم:** بسته به شرایط مصرف، الگوی بار و زیرساخت‌های موجود (مانند امکان حمل سوخت یا تعمیرات)، پیکربندی بهینه سیستم می‌تواند تغییر کند؛ لذا توصیه می‌شود مدل مشابه این پژوهش بر مبنای شرایط منطقه‌ای تنظیم گردد.

۳- **تحلیل اقتصادی مبتنی بر قیمت سوخت و سیاست‌های حمایتی:** اثربخشی اقتصادی سیستم تابع قیمت سوخت دیزل، تعرفه برق یارانه‌ای و امکان بهره‌برداری از تسهیلات دولتی برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر است. تنظیم راهکارهای مالی و مشارکت بخش خصوصی نیز اهمیت دارد.

۴- **آموزش و ظرفیت‌سازی محلی:** برای اطمینان از پایداری و دوام سیستم، آموزش بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات اجزای سیستم به کاربران و اپراتورهای محلی لازم است.

در نهایت، پیاده‌سازی سیستم‌های هیبریدی مشابه در سایر مناطق نیازمند مطالعه دقیق پتانسیل محلی، تطبیق مدل با شرایط منطقه‌ای و ایجاد زیرساخت‌های پشتیبان است تا مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی به بهترین وجه محقق گردد.

• در ارزیابی زیست‌محیطی، نتایج نشان داد که استفاده از سیستم هیبریدی شامل اجزای تجدیدپذیر در کنار دیزل ژنراتور در مقایسه با سیستم کاملاً متکی به دیزل ژنراتور باعث کاهش ۷۳ درصدی انتشار کربن دی‌اکسید می‌شود.

• در این پژوهش، سه تحلیل حساسیت کلیدی نیز انجام شد: تأثیر تغییرات قیمت سوخت، شدت تابش خورشیدی و سرعت باد بر عملکرد و هزینه‌های سیستم هیبریدی. نتایج نشان داد که افزایش قیمت سوخت، سهم منابع تجدیدپذیر را در ترکیب بهینه سیستم افزایش داده و هزینه نهایی سیستم را نیز بالا می‌برد. همچنین، افزایش تابش خورشیدی یا سرعت باد منجر به کاهش وابستگی به دیزل ژنراتور و کاهش هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی می‌شود. این تحلیل‌ها نشان دادند که سیستم پیشنهادی از انعطاف‌پذیری و پایداری مناسبی در برابر تغییرات پارامترهای کلیدی برخوردار است و می‌تواند در شرایط مختلف اقلیمی و اقتصادی عملکرد مطلوبی داشته باشد.

• مقایسه هزینه کل سیستم مستقل هیبریدی با هزینه توسعه شبکه سراسری برق نیز نشان داد که در فواصل زیاد از شبکه، استفاده از سیستم‌های هیبریدی مستقل اقتصادی‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر است و می‌تواند راهکاری مناسب برای برق‌رسانی به مناطق دورافتاده و صعب‌العبور باشد.

باتوجه به پتانسیل بالای انرژی‌های تجدیدپذیر در مناطق مختلف ایران، در کنار مواردی چون دورافتاده و صعب‌العبور بودن مسیر برخی از روستاها و مناطق ایران، می‌تواند انگیزه استفاده گسترده از سیستم‌های هیبریدی مستقل از شبکه تجدیدپذیر را در سکان‌داران این کشور ایجاد کند. این کار علاوه بر کاهش قابل توجه هزینه به دلیل عدم نیاز به شبکه کشی، باعث می‌شود سرعت افزایش تولید آلاینده‌ها به طرز قابل توجهی در کشور کاهش یابد. اعمال جریمه‌های سنگین تولید آلاینده‌هایی همچون کربن دی‌اکسید می‌تواند یکی از عوامل بازدارنده مؤثر باشد.

### فهرست علائم و اختصارات

$F_1$	شیب منحنی سوخت	COE	هزینه انرژی (کیلووات ساعت بر دلار)
$\eta_{batt}$	بازده باتری	NPC	هزینه فعلی خالص (دلار)
$V_{batt}$	ولتاژ باتری (ولت)	Load Following	استراتژی بارگذاری دنبال کردن
$E_s$	ولتاژ بدون بار (ولت)	Cycle Charging	استراتژی شارژ چرخه
$R_{int}$	مقاومت داخلی (اهم)	PSO	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات
$I_{batt}$	جریان باتری (آمپر)	GWO	الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری
$V_{nom}$	ولتاژ نامی (ولت)	GA	الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک
$I_{nom}$	جریان نامی (آمپر)	DE	الگوریتم تکامل تفاضلی
$E_{BAT}(t)$	مقدار شارژ باتری در زمان $t$	$P_{wind}$	توان خروجی توربین باد (کیلووات)

$E_{Tot}(t)$	کل انرژی تولید شده	$V_{in}$	سرعت برش
$E_{Load}$	تقاضای بار	$V_{cout}$	سرعت قطع
$\sigma$	نرخ خود تخلیه	$V_r$	سرعت باد
$\eta_c$	بازده شارژ باتری	$P_{pv}$	توان خروجی پنل فتوولتائیک (کیلووات)
$\eta_d$	بازده دشارژ باتری	$\eta_{pv}$	بازده پنل فتوولتائیک
$\eta_{con}$	راندمان مبدل	$G_t$	تابش خورشیدی (کیلووات بر مترمربع)
$P_{con}$	توان خروجی مبدل (کیلووات)	$A_{pv}$	مساحت سطح پنل (مترمربع)
$P_{hd}$	توان ورودی مبدل (کیلووات)	$\eta_r$	بازده پنل مرجع
$\eta_{con}$	راندمان مبدل	$\eta_{pc}$	بازده تهویه توان
HOMER	بهینه‌سازی ترکیبی منابع انرژی چندگانه	$C_{tem}$	دمای سلول در شرایط مرجع (درجه سلسیوس)
ROR	نرخ بازگشت سرمایه	$A_{tem}$	دمای محیط (درجه سلسیوس)
LPSP	شاخص عدم تامین بار	A,B,C	ضرایب معادله توان توربین بادی
$A_T$	هزینه سالیانه کل (دلار)	NOCT	دمای اسمی سلول (درجه سلسیوس)
$i_r$	نرخ تنزیل واقعی (درصد)	$\omega_{tem}$	ضریب دمایی پنل
N	طول عمر پروژه (سال)	$F_{DG}$	مصرف سوخت دیزل ژنراتورها (لیتر بر ساعت)
$E_T$	بار الکتریکی کل (کیلووات ساعت در روز)	$P_R$	توان خروجی دیزل ژنراتور (کیلووات)
GHI	تابش افقی جهانی (کیلووات ساعت بر مترمربع در روز)	$P_G$	توان نامی دیزل ژنراتور (کیلووات)
$P_T$	توان کل تولید شده (کیلووات)	$F_0$	ضریب سوخت
$P_L$	تقاضای بار (کیلووات)	$P_{DG}$	توان تولیدی سیستم تجدیدپذیر (کیلووات)
$C_{PV}$	ظرفیت پنل خورشیدی (کیلووات)	$C_{DG}$	ظرفیت دیزل ژنراتور (کیلووات)
$N_{WT}$	تعداد توربین باد	$N_{Battery}$	تعداد باتری
$SOC_{Battery}$	وضعیت شارژ باتری	$C_{Battery}$	ظرفیت باتری (کیلووات ساعت)

## مراجع

- [1] Twidell J., *Renewable Energy Resources*. Routledge, (2021).
- [2] Nalley J.O., *Optimizing the Productivity and Sustainability of Algal Biofuel Systems: Investigating the Benefits of Algal Diversity and Utilizing Brewery Wastewater for Cultivation*. Michigan State University, (2016).
- [3] Sadeghi A., Maleki A., Haghighat S., "Techno-Economic Analysis and Optimization of a Hybrid Solar-Wind-Biomass-Battery Framework for the Electrification of a Remote Area: A Case Study," *Energy Conversion and Management: X*, **24**: 100732 (2024).
- [4] Okonkwo P.C., Mansir I.B., Ogunleye G.J., "Technoeconomic Analysis of Hybrid Energy System for Health Clinic in Salalah Oman," *Energy Reports*, **9**: 444-447 (2023).
- [5] Araoye T.O., Ashigwuike E.C., Mbunwe M.J., Bakinson O.I., Ozue T.I., "Techno-Economic Modeling and Optimal Sizing of Autonomous Hybrid Microgrid Renewable Energy System for Rural Electrification Sustainability Using HOMER and Grasshopper Optimization Algorithm," *Renewable Energy*, **229**: 120712 (2024).

- [6] Samatar A.M., Mekhilef S., Mokhlis H., Kermadi M., Alshammari O., "Performance Analysis of Hybrid Off-Grid Renewable Energy Systems for Sustainable Rural Electrification," *Energy Conversion and Management: X*, **24**: 100780 (2024).
- [7] Ennemiri N., Berrada A., Emrani A., Abdelmajid J., El Mrabet R., "Optimization of an Off-Grid PV/Biogas/Battery Hybrid Energy System for Electrification: A Case Study in a Commercial Platform in Morocco," *Energy Conversion and Management: X*, **21**: 100508 (2024).
- [8] Khan I., Guanghua L., Sahito A.A., Memon A.A., Hao C., Soomro A.H., Hussain Shah S.H., "Analysis of Jamrao Canal for Potential of Hybrid Photovoltaic/Hydrokinetic Turbine System," *Energy Reports*, **10**: 419-430 (2023).
- [9] Zhu C., Zhang Y., Wang M., Deng J., Cai Y., Wei W., Guo M., "Optimization, Validation and Analyses of a Hybrid PV-Battery-Diesel Power System Using Enhanced Electromagnetic Field Optimization Algorithm and  $\epsilon$ -Constraint," *Energy Reports*, **11**: 5335-5349 (2024).
- [10] Serat Z., Danishmal M., Mohammadi F.M., "Optimizing Hybrid PV/Wind and Grid Systems for Sustainable Energy Solutions at the University Campus: Economic, Environmental, and Sensitivity Analysis," *Energy Conversion and Management: X*, **24**: 100691 (2024).
- [11] Anugrah P., Sholekan M., "Study on Hybrid Renewable Energy Optimization in Mentawai Island using HOMER Pro," in *International Conference On Mechanical Engineering For Emerging Technologies (Icomeet 2021)*, AIP Publishing LLC, **2592(1)**: 060003 (2023).
- [12] Gul E., Baldinelli G., Bartocci P., Shamim T., Domenighini P., Cotana F., Wang J., Fantozzi F., Bianchi F., "Transition Toward Net Zero Emissions-Integration and Optimization of Renewable Energy Sources: Solar, Hydro, and Biomass with the Local Grid Station in Central Italy," *Renewable Energy*, **207**: 672-686 (2023).
- [13] Li J., Liu P., Li Z., "Optimal Design and Techno-Economic Analysis of a Solar-Wind-Biomass Off-Grid Hybrid Power System for Remote Rural Electrification: A Case Study of West China," *Energy*, **208**: 118387 (2020).
- [14] Ray A., Jana K., Assadi M., De S., "Distributed Polygeneration Using Local Resources for an Indian Village: Multiobjective Optimization Using Metaheuristic Algorithm," *Clean Technologies and Environmental Policy*, **20(6)**: 1323-1341 (2018).
- [15] Krishan O., Suhag S., "Techno-Economic Analysis of a Hybrid Renewable Energy System for an Energy Poor Rural Community," *Journal of Energy Storage*, **23**: 305-319 (2019).
- [16] Maleki A., "Design and Optimization of Autonomous Solar-Wind-Reverse Osmosis Desalination Systems Coupling Battery and Hydrogen Energy Storage by an Improved Bee Algorithm," *Desalination*, **435**: 221-234 (2018).
- [۱۷] فرید آل عزیز، نسیم طاهونی، محمدحسن پنجه شاهی، "تامین هیدروژن و الکتریسیته موردنیاز یک واحد تولید الفین با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۴۳(۲): ۹۳ تا ۱۱۱ (۱۴۰۳).
- [18] Liu H., Wu B., Maleki A., "Effects of Dispatch Strategies on Optimum Sizing of Solar-Diesel-Battery Energy Storage-RO Desalination Hybrid Scheme by Efficient Heuristic Algorithm," *Journal of Energy Storage*, **54**: 104862 (2022).

- [19] Jahangir M.H., Mousavi S.A., Rad M.A.V., "A Techno-Economic Comparison of a Photovoltaic/Thermal Organic Rankine Cycle With Several Renewable Hybrid Systems for a Residential Area in Rayen, Iran," *Energy Conversion and Management*, **195**: 244-261 (2019).
- [20] Fazelpour F., Soltani N., Rosen M.A., "Economic Analysis of Standalone Hybrid Energy Systems for Application in Tehran, Iran," *International journal of hydrogen energy*, **41(19)**: 7732-7743 (2016).
- [21] Almutairi K., Hosseini Dehshiri S.S., Hosseini Dehshiri S.J., Mostafaeipour A., Issakhov A., Techato K., "Use of a hybrid wind-solar-diesel-battery energy system to power buildings in remote areas: a case study," *Sustainability*, **13(16)**: 8764 (2021).
- [22] Kasaeian A., Rahdan P., Rad M.A.V., Yan W.-M., "Optimal design and technical analysis of a grid-connected hybrid photovoltaic/diesel/biogas under different economic conditions: A case study," *Energy Conversion and Management*, **198**: 111810 (2019).
- [23] Gökçek M., "Integration of hybrid power (wind-photovoltaic-diesel-battery) and seawater reverse osmosis systems for small-scale desalination applications," *Desalination*, **435**: 210-220 (2018).
- [24] Li C., Zhou D., Wang H., Lu Y., Li D., "Techno-economic performance study of stand-alone wind/diesel/battery hybrid system with different battery technologies in the cold region of China," *Energy*, **192**: 116702 (2020).
- [25] Singh A., Baredar P., Gupta B., "Techno-economic feasibility analysis of hydrogen fuel cell and solar photovoltaic hybrid renewable energy system for academic research building," *Energy Conversion and Management*, **145**: 398-414 (2017).
- [26] Mahmoudi S.M., Maleki A., Ochbelagh D.R., "Optimization of a hybrid energy system with/without considering back-up system by a new technique based on fuzzy logic controller," *Energy Conversion and Management*, **229**: 113723 (2021).
- [27] Mahmoudi S.M., Maleki A., Ochbelagh D.R., "A novel method based on fuzzy logic to evaluate the storage and backup systems in determining the optimal size of a hybrid renewable energy system," *Journal of Energy Storage*, **49**: 104015 (2022).
- [28] Maleki A., Eskandar Filabi Z., Nazari M.A., "Techno-economic analysis and optimization of an off-grid hybrid photovoltaic-diesel-battery system: Effect of solar tracker," *Sustainability*, **14(12)**: 7296 (2022).
- [29] Ashraf M.A., Liu Z., Alizadeh A.A., Nojavan S., Jermisittiparsert K., Zhang D., "Designing an optimized configuration for a hybrid PV/Diesel/Battery Energy System based on metaheuristics: A case study on Gobi Desert," *Journal of Cleaner Production*, **270**: 122467 (2020).
- [30] علی بداخانیان، اکبر ملکی "بهینه‌سازی یک سیستم تجدیدپذیر ترکیبی برای تولید توان و هیدروژن،" نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۴۲(۳)**: ۳۱۹ تا ۳۳۹ (۱۴۰۲).
- [31] Boussetta M., El Bachtiri R., Khanfara M., El Hammoumi K., "Assessing the potential of hybrid PV-Wind systems to cover public facilities loads under different Moroccan climate conditions," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **22**: 74-82 (2017).
- [32] HOMER Energy. *HOMER Pro user manual* (2017).

- [33] B. K. Das and F. Zaman, "Performance Analysis of a PV/Diesel Hybrid System for a Remote Area in Bangladesh: Effects of Dispatch Strategies, Batteries, and Generator Selection," *Energy*, **169**: 263-276 (2019).
- [34] Kamal M.M., Ashraf I., Fernandez E., "Planning and Optimization of Microgrid for Rural Electrification With Integration of Renewable Energy Resources," *Journal of Energy Storage*, **52**: 104782 (2022).
- [35] Kamal M.M., Ashraf I., Fernandez E., "Sustainable Electrification Planning of Rural Microgrid Using Renewable Resources and Its Environmental Impact Assessment," *Environmental Science and Pollution Research*, **29(57)**: 86376-86399 (2022).
- [36] Kamal M.M., Mohammad A., Ashraf I., Fernandez E., "Rural Electrification Using Renewable Energy Resources and Its Environmental Impact Assessment," *Environmental Science and Pollution Research*, **29(57)**: 86562-86579 (2022).