

مدلسازی و بهینه‌سازی سامانه مستقل هیبریدی خورشیدی-بادی با پشتیبان دیزل با استفاده از نرم‌افزار هومر در استان خراسان جنوبی

اسماعیل خادمی^۱، نیما غیائی طبری^{۲*}

۱- محصل دکتری تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان، بوشهر،

۲- استادیار مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دشتستان، بوشهر، Nima_ghiasi_te@yahoo.co.uk

چکیده

در این پژوهش، مدلسازی و بهینه‌سازی سامانه مستقل هیبریدی خورشیدی-بادی با پشتیبان دیزل در استان خراسان جنوبی به منظور تأمین برق پایدار و اقتصادی در مناطق دور از شبکه انجام گرفته است. برای این منظور، داده‌های اقلیمی شامل تابش خورشیدی، سرعت باد و پروفایل بار مصرفی (با متوسط روزانه ۲۱۳٫۶ کیلووات‌ساعت و پیک ۲۵٫۴۵ کیلووات) به‌عنوان ورودی در نرم‌افزار HOMER Pro مورد استفاده قرار گرفت. هدف اصلی تحقیق، حداقل‌سازی هزینه انرژی (COE) و هزینه خالص فعلی (NPC) در کنار کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها بود. ساختار سامانه شامل پنل‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، ژنراتور دیزلی، باتری و اینورتر بوده و شبیه‌سازی‌ها بر اساس تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی انجام شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد پیکربندی شامل ۹۰۲۹ کیلووات پنل خورشیدی، ۴ کیلووات توربین بادی، ژنراتور دیزلی ۲۹ کیلوواتی، ۱۸ باتری و اینورتر ۱۰۰۴ کیلوواتی دارای عملکرد اقتصادی مطلوب با COE برابر ۰٫۰۷۸۴€/kWh و NPC برابر ۷۹۰۰۶€ است. همچنین تحلیل حساسیت نشان داد افزایش سرعت باد و ارتفاع برج توربین موجب کاهش ۱۰ تا ۱۱ درصدی هزینه انرژی و کاهش قابل توجه مصرف سوخت دیزل می‌شود، در حالی که افزایش قیمت سوخت، سامانه را به سمت اتکای بیشتر به منابع تجدیدپذیر سوق می‌دهد.

کلمات کلیدی: انرژی خورشیدی، سیستم هیبریدی، نیروگاه تجدیدپذیر، دیزل ژنراتور

۱. مقدمه

افزایش روزافزون مصرف انرژی در جهان و اتکای مفرط به منابع فسیلی موجب بروز بحران‌هایی چون گرمایش جهانی، آلودگی هوا و کاهش منابع تجدیدناپذیر شده است. این پدیده نه‌تنها تهدیدی جدی برای محیط زیست جهانی به شمار می‌رود، بلکه چالشی اساسی برای امنیت انرژی، توسعه پایدار و عدالت انرژی در مناطق محروم و دور از شبکه محسوب می‌شود. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر همچون خورشید و باد به‌عنوان منابع پاک و در دسترس، به یکی از محورهای اصلی سیاست‌های انرژی در قرن بیست‌ویکم تبدیل شده است. با وجود مزایای گسترده این منابع، نوسانات ذاتی تولید انرژی تجدیدپذیر از نظر زمانی و مکانی، مانعی در مسیر اطمینان و پایداری تأمین برق تلقی می‌شود. برای غلبه بر این محدودیت، ترکیب منابع مختلف انرژی در قالب سامانه‌های هیبریدی راهکاری مؤثر و منعطف به‌شمار می‌آید. در این سامانه‌ها، چند منبع تولید انرژی نظیر پنل‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، ژنراتورهای دیزلی و سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری به صورت مکمل در یک بستر یکپارچه طراحی می‌شوند تا انرژی مورد نیاز بار الکتریکی را با هزینه و آلاینده‌گی حداقل



تأمین کنند. در سال‌های اخیر، توسعه سامانه‌های هیبریدی مستقل از شبکه به‌ویژه برای مناطق روستایی و صعب‌العبور در کشورهای در حال توسعه اهمیت فراوانی یافته است. بسیاری از مناطق در ایران نیز به دلیل وسعت جغرافیایی، پراکندگی سکونت‌گاه‌ها و هزینه بالای توسعه خطوط انتقال برق، فاقد دسترسی پایدار به شبکه سراسری هستند. در استان خراسان جنوبی، به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی، شدت تابش بالای خورشید، وجود بادهای نسبتاً پایدار در بخش‌های شمالی و شرقی و منابع محدود سوخت فسیلی، پتانسیل بسیار مناسبی برای ایجاد سامانه‌های ترکیبی خورشیدی-بادی وجود دارد. نکته کلیدی در طراحی چنین سامانه‌هایی، تعیین پیکربندی بهینه اجزا است؛ به گونه‌ای که تعادل مناسبی میان هزینه کل سامانه، قابلیت اطمینان، میزان انرژی تأمین‌شده و اثرات زیست‌محیطی برقرار گردد. بدین منظور، لازم است مدل‌سازی دقیق رفتار دینامیکی منابع انرژی و بار مصرفی انجام شود و سپس از ابزارهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای تعیین اندازه اجزای بهینه شامل توان پنل‌های خورشیدی، ظرفیت توربین بادی، اندازه بانک باتری و توان ژنراتور پشتیبان استفاده گردد. یکی از کارآمدترین ابزارهای تحلیلی در این زمینه، نرم‌افزار هومر است که توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر (NREL) توسعه یافته و به عنوان یک مرجع معتبر در مطالعات فنی-اقتصادی سامانه‌های انرژی شناخته می‌شود. این نرم‌افزار با ترکیب الگوریتم‌های جست‌وجوی سراسری و مدل‌سازی اقتصادی، قابلیت تحلیل انواع سناریوهای تولید، ذخیره‌سازی و مصرف انرژی را در شرایط اقلیمی متفاوت فراهم می‌سازد. از طریق این نرم‌افزار می‌توان اثر تغییر پارامترهای فنی (همچون ارتفاع نصب توربین یا طول عمر پنل‌ها)، اقتصادی (قیمت سوخت و هزینه سرمایه‌گذاری)، و محیطی (میزان تابش و الگوی باد) را بر عملکرد بهینه سامانه مورد ارزیابی قرار داد.

در سال ۲۰۱۹، علایی و همکاران [۱۴] به بررسی عوامل مؤثر بر طراحی سامانه‌های ترکیبی تجدیدپذیر در شمال غرب ایران پرداختند. در این مطالعه، پارامترهای مرتبط با مصرف انرژی و سرعت باد مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد بیشترین میزان تابش خورشیدی در منطقه‌ای با شدت ۲۷۰۹۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع و بیشترین سرعت باد ۱۱۰۰۲ متر بر ثانیه ثبت شده است؛ که نشان‌دهنده پتانسیل بالای ترکیب دو منبع خورشیدی و بادی برای تأمین انرژی در این ناحیه است. در همان سال، عریف و همکاران [۱۵] در مالزی چهار منبع انرژی تجدیدپذیر — باد، خورشید، زیست‌توده و آبی — را در سه منطقه روستایی بررسی کردند تا مقرون‌به‌صرفه‌ترین سیستم را برای تأمین برق به دست آورند. یافته‌های آنان نشان داد استفاده از ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر نه تنها اقتصادی‌تر از ژنراتور دیزلی مستقل است، بلکه انتشار دی‌اکسیدکربن را نیز به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. سامانه بهینه ارائه‌شده شامل پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی همراه با باتری ذخیره‌ساز بود که پایداری و مقرون‌به‌صرفگی را افزایش می‌دهد. در هند، وندوتی و همکاران [۱۶] در همان سال مدلی ترکیبی برای یک روستای بدون شبکه ارائه کردند که هدف آن یافتن ارزان‌ترین و کارآمدترین روش تأمین برق بود. نتایج آنان نشان داد سامانه‌ای متشکل از پنل‌های خورشیدی، توربین بادی، زیست‌توده، باتری و اینورتر، مناسب‌ترین گزینه است؛ هزینه تولید انرژی آن حدود ۰۰۲۱۴ دلار به‌ازای هر کیلووات‌ساعت برآورد شد. همچنین در پژوهش تکمیلی آنان درباره سیستم‌های ترکیبی متصل به شبکه در قطر، میزان تولید روزانه ۱۴ کیلووات‌ساعت برق و ۸۵ کیلوگرم هیدروژن گزارش شد. در سناریوی PV-Wind-Grid، کمترین هزینه تولید هیدروژن و برق به ترتیب ۲۰۰۹۲ دلار به‌ازای هر کیلووات و ۱۱۰۴۹۵ دلار به‌ازای هر کیلووات‌ساعت به‌دست آمد، هرچند این سناریو بیشترین انتشار سالانه CO₂ — حدود ۱۴۳۴ کیلوگرم — را نیز داشت. در سال ۲۰۲۰، توسیف و همکاران [۱۷] در جنوب بنگلادش با ارائه روشی مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره، بهترین فناوری انرژی تجدیدپذیر را انتخاب کردند. آنان پنج فناوری شامل سیستم ترکیبی خورشیدی-بادی-باتری، سیستم‌های مستقل خورشیدی، بادی، زیست‌توده و بیوگاز را مقایسه نمودند و نتیجه گرفتند که سیستم ترکیبی خورشیدی-بادی-باتری از نظر شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی بهترین گزینه برای مناطق جنوبی بنگلادش است. در مطالعه‌ای مشابه، مرادی و



همکاران [۱۸] مکان‌یابی مزارع بادی را در ایران با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بررسی کردند. شاخص‌هایی نظیر شیب زمین، سرعت باد، فاصله از پست‌های برق، شهرها، بزرگراه‌ها و جاده‌ها در مدل لحاظ شد. نتایج نشان داد حدود ۲۰ درصد از مناطق بررسی‌شده شرایط مناسب برای احداث مزرعه بادی دارند و جایگزینی نیروگاه‌های فسیلی با این مزارع می‌تواند گامی مؤثر در جهت کاهش آلودگی و استقلال انرژی کشور باشد. در ترکیه، اکرن و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۲۱ ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر طراحی و بهینه‌سازی کردند. ترکیب بهینه شامل ۴۴٫۴ درصد انرژی باد و ۵۵٫۶ درصد انرژی خورشید بوده و مقدار کل برق تولیدی سالانه ۸۴۳۰۱۵۰ کیلووات‌ساعت با هزینه ۰۰۰۶۴ دلار بر کیلووات‌ساعت برآورد شد که از نظر فنی و اقتصادی موفق‌ترین طرح تلقی گردید. همچنین، شارما و همکاران [۲۰] در همان سال برنامه‌ای را برای بهره‌گیری حداکثری از منابع تجدیدپذیر به‌منظور تأمین برق مناطق نزدیک پنجاب در هند ارائه دادند. در طرح آنان، زیست‌توده و سلول‌های خورشیدی منابع اصلی تولید برق شناخته شدند. برای مجتمع‌های صنعتی، پمپ‌های آب کشاورزی و روشنایی معابر، هزینه انرژی و هزینه خالص کل به‌ترتیب ۰۰۰۳۲ دلار بر کیلووات‌ساعت و ۷۶۰۸۳۷ دلار محاسبه شد. در جزیره پاپوا، اووینزا و همکاران [۲۱] با استفاده از روش تحلیلی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو به ارزیابی اقتصادی سامانه‌های ترکیبی پرداختند. نتایج آنان نشان داد استفاده از انرژی تجدیدپذیر قادر است هزینه تولید برق را کاهش دهد و مبنای تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاران و نهادهای مالی جهت توسعه زیرساخت‌های پاک فراهم آورد. مطالعه دیگر توسط سوریادی و همکاران [۲۲] ظرفیت سامانه‌های ترکیبی بر پایه سلول‌های هیبریدی و توربین‌های بادی را بررسی کرد. ایشان نتیجه گرفتند با توجه به محدودیت منابع فسیلی، بهره‌گیری از انرژی تجدیدپذیر می‌تواند جایگزین قابل اعتماد و کم‌هزینه‌ای برای تولید برق در سطح ملی باشد. در سال ۲۰۲۲، ورما و وادهارا [۲۳] رویکردی برای کاهش هزینه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر ارائه دادند. آنان یک شبکه هوشمند متشکل از سلول‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، زیست‌توده و باتری را با استفاده از نرم‌افزار HOMER شبیه‌سازی کردند. هدف اصلی مطالعه، کمینه‌سازی هزینه و کاهش انتشار CO_2 بود و سامانه حاصل به‌عنوان کارآمدترین ساختار از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی معرفی شد. در همان سال، رشید و همکاران [۲۴] سامانه‌ای ترکیبی برای مناطق دورافتاده ایالت بلوچستان پاکستان شامل روستاهای گوجر، پلانتاک و شهرک طراحی کردند. سیستم مورد نظر در نرم‌افزار HOMER Pro و با اجزایی چون پیل سوختی، ژنراتور، باتری، مخزن هیدروژن، واحد الکترولیز و مبدل‌های خورشیدی-بادی مدل‌سازی شد. پس از بهینه‌سازی، کم‌هزینه‌ترین و عملی‌ترین ترکیب از لحاظ هزینه کل (NPC)، هزینه انرژی (COE) و هزینه اولیه و عملیاتی ارائه گردید. به‌منظور انتخاب مسیر توسعه پایدار در مالزی، لی و همکاران [۲۵] روشی فازی مبتنی بر نظریه چشم‌انداز تجمعی (CPT) را برای ارزیابی مسیرهای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر به کار گرفتند. نتایج آنان نشان داد انرژی خورشیدی مطلوب‌ترین گزینه برای رشد پایدار است و پس از آن زیست‌توده، باد و انرژی آبی در رتبه‌های بعدی قرار دارند. شاخص‌هایی چون بازده، دوره بازگشت سرمایه، میزان اشتغال‌زایی و انتشار CO_2 به‌عنوان عوامل کلیدی در تصمیم‌گیری شناسایی شدند. در هند، امیر و همکاران [۲۶] با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط‌های نامطمئن، بهترین محل برای پروژه‌های انرژی سبز را تعیین کردند. از میان یازده منطقه بررسی‌شده، ناحیه کونتا (NP Kunta) در ایالت آندراپرادش به‌عنوان مناسب‌ترین مکان انتخاب شد و بیشترین تطابق را با اهداف سیاستی و برنامه‌ریزی انرژی پایدار داشت. در نهایت، اشرف محمد حسین و همکاران [۲۷] در همان کشور یک چارچوب جامع برای انتخاب بهترین منبع انرژی تجدیدپذیر ارائه نمودند. آن‌ها با ترکیب روش آنتروپی و وزن‌دهی میان‌معیاری (ICW) و سپس به‌کارگیری هشت روش MCDM مختلف، به مقایسه منابع تجدیدپذیر پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که انرژی خورشیدی کارآمدترین گزینه برای تولید برق در هند است، در حالی که باد و زیست‌توده در جایگاه‌های دوم و سوم قرار گرفته و انرژی آبی نامناسب‌ترین گزینه تشخیص داده شد.



پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه نشان می‌دهد که استفاده از سامانه‌های هیبریدی نه تنها به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند، بلکه تأثیر چشمگیری در کاهش هزینه انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. به‌عنوان نمونه، ترکیب منابع خورشیدی و بادی با یک مکانیزم ذخیره‌سازی مناسب می‌تواند نوسانات شبکه را به حداقل رسانده و ضریب اطمینان تأمین انرژی را افزایش دهد. افزون بر این، طراحی بهینه اجزا و انتخاب استراتژی کنترلی مناسب، تأثیر مستقیمی بر طول عمر تجهیزات و بازگشت سرمایه پروژه دارد. در همین راستا، این پژوهش با هدف مدلسازی و بهینه‌سازی سامانه مستقل هیبریدی خورشیدی-بادی با پشتیبان دیزل در استان خراسان جنوبی انجام گرفته است. در ابتدا، داده‌های اقلیمی شامل تابش خورشیدی، سرعت باد، الگوی بار مصرفی و قیمت سوخت برای مکان منتخب (بهینه‌ترین سایت از مطالعه قبلی مکان‌یابی) جمع‌آوری شده است. سپس سامانه شامل پنل‌های خورشیدی، توربین بادی، ژنراتور دیزلی، باتری ذخیره‌ساز و مبدل DC/AC در نرم‌افزار هومر مدل‌سازی شده و با هدف حداقل‌سازی هزینه انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است.

۲. روش پژوهش

در این پژوهش، برای طراحی و بهینه‌سازی سامانه مستقل هیبریدی خورشیدی-بادی با پشتیبان دیزل در استان خراسان جنوبی، رویکردی تحلیلی و چندمرحله‌ای اتخاذ شده است. هدف نهایی، دستیابی به پیکربندی بهینه اجزای سامانه از نظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی بوده است. روش‌شناسی تحقیق شامل مراحل جمع‌آوری داده‌ها، مدل‌سازی اجزا، شبیه‌سازی در نرم‌افزار هومر، تحلیل اقتصادی و تحلیل حساسیت است. این مراحل به ترتیب زیر توضیح داده می‌شوند:

۱. مرحله نخست: آماده‌سازی داده‌ها و تعیین ورودی‌ها

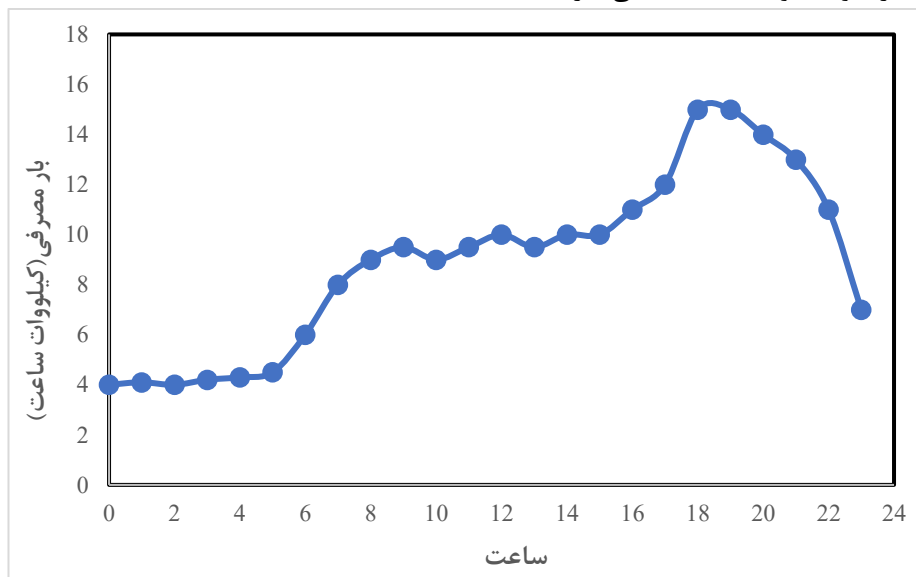
در گام اولیه، داده‌های اقلیمی و فنی مرتبط با سایت منتخب (که در پژوهش مکان‌یابی پیشین با روش تاپسیس به‌عنوان نقطه بهینه شناسایی شده بود) گردآوری شد. اطلاعات مورد نیاز شامل موارد زیر می‌باشد:

- داده تابش خورشیدی و دمای روزانه: به صورت میانگین ساعتی از پایگاه‌های معتبر هواشناسی ملی و NASA POWER.
- میانگین سرعت باد در ارتفاع مرجع ۱۰ متر: با استفاده از داده‌های سالانه و سپس برون‌یابی به ارتفاع مؤثر توربین با مدل توان باد.
- پروفایل مصرف انرژی: شامل بار روزانه $213/6 \text{ kWh}$ و پیک مصرف $25/45 \text{ kW}$ برای یک واحد روستایی نمونه.
- پارامترهای اقتصادی: نرخ تنزیل 8% ، طول عمر طرح ۲۵ سال، هزینه سوخت دیزل $0/8 \text{ L/€}$ و نرخ بهره 3% در سال.
- این داده‌ها به‌عنوان ورودی پایه جهت طراحی در نرم‌افزار هومر مورد استفاده قرار گرفتند.

۲. مرحله دوم: تعریف ساختار سامانه هیبریدی

ساختار کلی سامانه شامل پنج جزء اصلی است: پنل‌های فتوولتائیک: به منظور تأمین انرژی در ساعات تابش مستقیم خورشید. توربین‌های بادی: جهت تأمین توان در شب و فصول سرد با سرعت باد بیشتر.

ژنراتور دیزلی: به عنوان منبع پشتیبان برای تأمین انرژی در شرایط بحرانی یا کمبود انرژی تجدیدپذیر.
باتری ذخیره‌ساز: برای ذخیره انرژی اضافی و افزایش پایداری سیستم.
مبدل توان: جهت تبدیل جریان مستقیم به متناوب و هماهنگی بین اجزا.
در نرم‌افزار، تمامی اجزا با مشخصات فنی دقیق شامل راندمان، ظرفیت نامی، طول عمر، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تعمیر و نگهداری و محدودیت‌های عملیاتی تعریف شدند.



شکل ۱: میزان بار مصرفی در ساعات مختلف

۳. مرحله سوم: شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در نرم‌افزار هومر

طراحی و بهینه‌سازی سامانه با استفاده از نرم‌افزار هومر انجام شد. این نرم‌افزار با در نظر گرفتن متغیرهای اقلیمی، اقتصادی و فنی، ترکیب‌های مختلف اجزای سیستم را تحلیل کرده و بر اساس حداقل هزینه کل انرژی (COE)، کمترین هزینه خالص فعلی (NPC) و حداکثر اطمینان تأمین بار پیکربندی بهینه را تعیین می‌کند.

مراحل تحلیل در نرم‌افزار هومر شامل:

تعریف اجزای سیستم و ورودی‌های اقلیمی؛

شبیه‌سازی ساعتی عملکرد اجزای سیستم برای کل سال؛

محاسبه شاخص‌های اقتصادی مانند LCOE و NPC؛

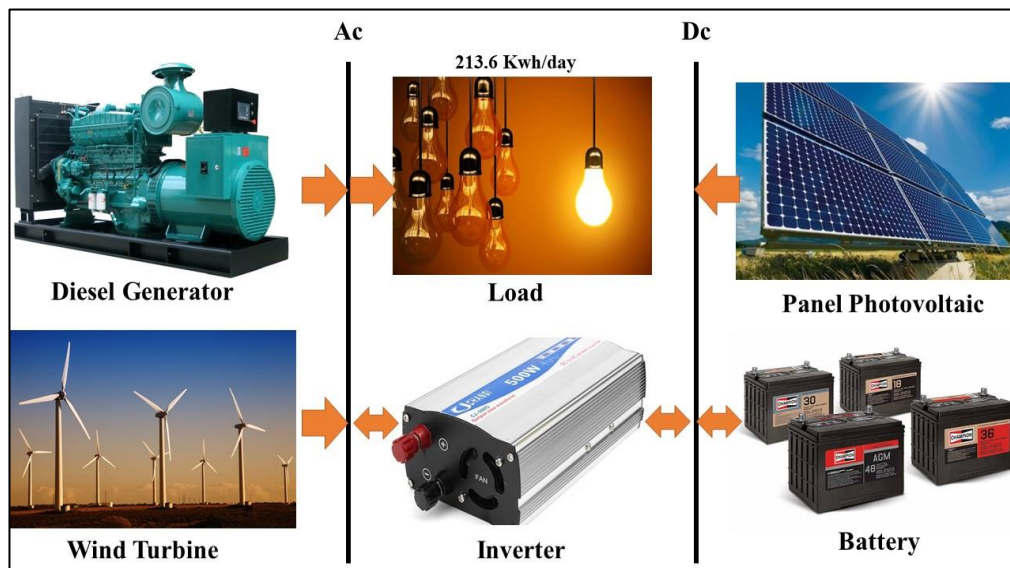
محاسبه آلاینده‌های خروجی؛

ارزیابی قابلیت اطمینان؛

انتخاب پیکربندی بهینه با حداقل هزینه و بیشترین بازده.

در شکل ۲ شماتیک پژوهش نشان داده شده است. شکل ارائه‌شده، ساختار کلی سامانه هیبریدی مستقل از شبکه را نشان می‌دهد که برای تأمین انرژی روزانه ۲۱۳/۶ کیلووات‌ساعت طراحی شده است. در سمت راست مدار، اجزای جریان مستقیم (DC) شامل پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی و باتری‌های ذخیره‌ساز قرار دارند که انرژی تولیدشده از خورشید را ذخیره یا به اینورتر تحویل می‌دهند. بخش میانی، اینورتر وظیفه تبدیل جریان مستقیم به متناوب (AC) را بر عهده دارد تا

توان تولیدی قابل استفاده در تجهیزات مصرفی یا اجزای AC گردد. در سمت چپ، اجزای جریان متناوب (AC) شامل توربین‌های بادی و ژنراتور دیزلی مشاهده می‌شوند که به‌صورت مکمل عمل کرده و در مواقع کاهش تابش یا باد، انرژی مورد نیاز بار مصرفی را تأمین می‌کنند. در مجموع، این شکل تعامل بین منابع خورشیدی، بادی، دیزل، باتری و اینورتر را برای تأمین پایدار برق در یک سامانه هیبریدی به‌گونه‌ای گویا و شماتیک نمایش می‌دهد.



شکل ۲: شماتیک پژوهش

۴. مرحله چهارم: تحلیل اقتصادی و ارزیابی محیط‌زیستی

در این بخش، عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی سامانه بهینه مورد تحلیل قرار گرفت. شاخص‌های اصلی محاسبه‌شده عبارت‌اند از:

- هزینه کل سرمایه‌گذاری اولیه (Capital Cost): مجموع هزینه خرید، نصب و راه‌اندازی تجهیزات.
- هزینه سطحی انرژی (LCOE یا COE): به‌ازای هر کیلووات‌ساعت انرژی تولیدی در طول عمر طرح.
- هزینه بهره‌برداری و نگهداری سالیانه (M&O): بر مبنای درصدی از سرمایه اولیه.
- میزان صرفه‌جویی در سوخت فسیلی و کاهش انتشار CO_2 .

۵. مرحله پنجم: تحلیل حساسیت

به منظور بررسی پایداری نتایج و رفتار سامانه در شرایط متغیر، تحلیل حساسیت بر پارامترهای کلیدی زیر انجام گرفت: ارتفاع نصب توربین: افزایش این پارامتر باعث بهبود سرعت باد مؤثر و کاهش هزینه کل تا حدود ۱۰-۱۱٪ شد. قیمت سوخت دیزل: تغییر یک‌دلاری در هر لیتر سوخت تأثیر قابل توجهی بر هزینه کل انرژی دارد. طول عمر پنل‌های خورشیدی و باتری‌ها: افزایش طول عمر تجهیزات باعث کاهش هزینه کل پروژه به‌صورت تجمعی می‌شود.

نمودار بار مصرفی: تغییرات فصلی بار بر میزان کارکرد اجزای پشتیبان اثر مستقیم دارد.

۳. نتایج

جدول ۱ نتایج بهینه سازی پیکربندی های مختلف سامانه هیبریدی مستقل از شبکه را بر اساس شبیه سازی نرم افزار هومر ارائه می دهد. میان گزینه های بررسی شده، سامانه شماره ۱ مقرون به صرفه ترین طراحی را دارد و شامل آرایه خورشیدی ۹/۲۹ کیلوواتی، دو توربین بادی (جمعاً ۴ کیلووات)، ژنراتور دیزلی ۲۹ کیلوواتی، ۱۸ باتری و اینورتر ۱۰/۴ کیلوواتی است. این ترکیب کمترین هزینه تولید برق (COE: €0.0784/kWh) و هزینه کل فعلی (NPC: €79,006) را به همراه داشته و سالانه حدود ۴,۶۵۴ لیتر سوخت دیزل مصرف می کند. در همه سناریوها ظرفیت ژنراتور ثابت بوده اما حضور یا حذف اجزای خورشیدی، بادی و ذخیره ساز برای ارزیابی تأثیر اقتصادی و عملکردی بررسی شده است. حذف پنل های خورشیدی و کاهش شدید ظرفیت باتری (سامانه ۲) سبب افزایش هزینه برق به kWh/۰.۰۹۲۴€ و دو برابر شدن مصرف سوخت شد، در حالی که استفاده صرف از دیزل (سامانه ۳) هزینه را به kWh/۰.۱۵۹€ و مصرف سوخت را به ۳۲,۱۷۰ لیتر در سال رساند. در مقابل، سامانه هایی با سهم بیشتر انرژی تجدیدپذیر، سرمایه اولیه بالاتری دارند ولی مصرف سوخت و زمان کار ژنراتور را به طور محسوسی کاهش می دهند.

جدول ۱: نتایج بهینه سازی

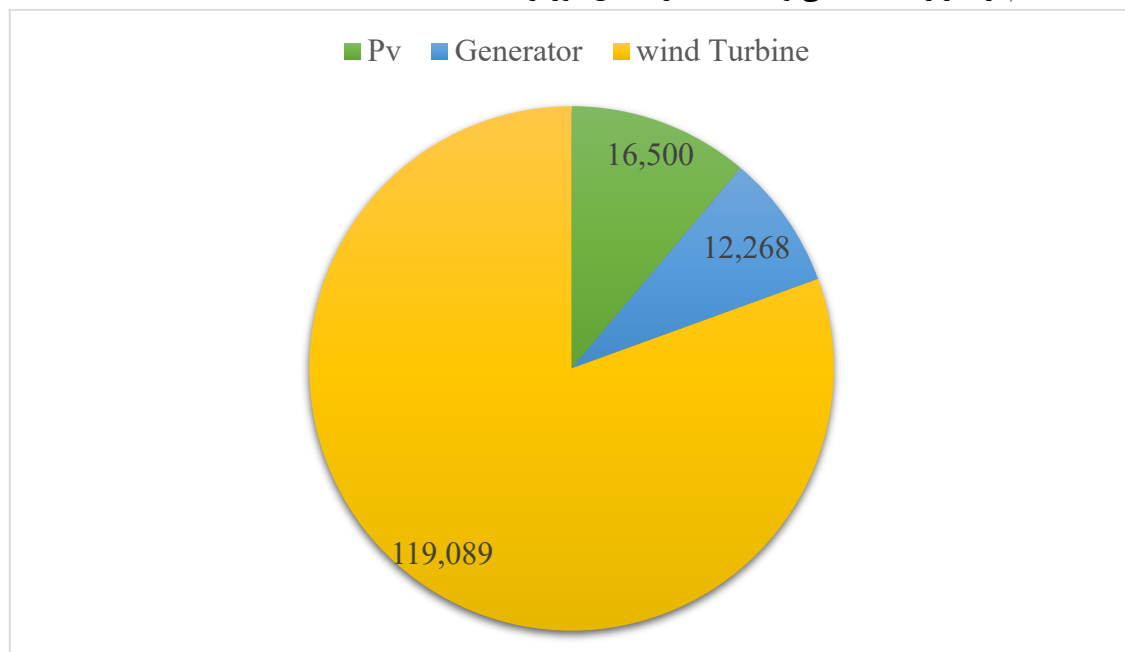
Number System	PV (kW)	Wind Turbine	Diesel Generator (kW)	Battery	Inverter (kW)	COE (€)	NPC (€)	Operating Cost (€/year)	Initial Capital (€)	Fuel Consumption (L/year)
1*	9.29	2	29	18	10.4	0.0784	79006	3689	31314	4654
2	0	4	29	4	2.06	0.0924	93081	5482	22213	9469
3	0	4	29	0	0	0.0950	95760	5876	19800	10797
4	21.4	3	29	0	13	0.122	123131	6738	36020	12394
5	33.1	0	29	20	14.5	0.131	132013	6719	45157	13300
6	0	0	29	0	0	0.159	160400	11959	5800	32170

جدول ۲ جزئیات هزینه های سیستم هیبریدی بهینه را نشان می دهد. بیشترین سهم سرمایه گذاری اولیه مربوط به باتری ها است که حدود ۹,۰۰۰ یورو هزینه دارند. پس از آن، پنل های خورشیدی با ۷,۴۳۴ یورو و توربین های بادی با ۷,۰۰۰ یورو قرار دارند و در مجموع، سرمایه گذاری اولیه کل سامانه به ۳۱,۳۱۴ یورو می رسد. در بخش هزینه های بلندمدت، ژنراتور دیزلی بیشترین سهم را در جایگزینی (۴,۵۶۸/۵۸ یورو) و نگهداری و عملیات (۱۴,۶۸۸/۵۰ یورو) دارد؛ به طوری که با احتساب سوخت، هزینه کل آن به ۲۶,۰۱۸/۸۰ یورو می رسد و بزرگ ترین بخش از کل هزینه چرخه عمر را تشکیل می دهد. هزینه فعلی خالص (NPC) کل سیستم برابر ۷۹,۰۰۵/۷۳ یورو است که حدود ۳۳٪ آن به ژنراتور، ۲۸/۵٪ به باتری، ۲۱/۵٪ به توربین بادی، ۱۰/۶٪ به پنل خورشیدی و ۶/۴٪ به اینورتر اختصاص دارد. این توزیع نشان می دهد که با وجود تمرکز بهینه سازی بر افزایش سهم انرژی های تجدیدپذیر، ژنراتور دیزلی همچنان نقشی اصلی در هزینه های عملیاتی و جایگزینی ایفا می کند و عامل تعیین کننده در ساختار اقتصادی سامانه است.

جدول ۲: هزینه های بهینه سیستم

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Total (€)
Diesel Generator	\$5,800.00	\$4,568.58	\$14,688.50	\$2,105.69	\$26,018.80
Battery	\$9,000.00	\$3,204.30	\$11,634.76	\$0.00	\$22,510.24
Inverter	\$2,080.03	\$663.13	\$2,688.96	\$0.00	\$5,058.41
Pv	\$7,434.01	\$0.00	\$961.03	\$0.00	\$8,395.04
Wind Turbine	\$7,000.00	\$2,231.65	\$9,049.26	\$0.00	\$17,023.23
System	\$31,314.04	\$10,667.65	\$39,022.53	\$2,105.69	\$79,005.73

شکل ۳ سهم سالانه تولید برق هر یک از اجزای سامانه هیبریدی بهینه را نشان می دهد. منبع اصلی تولید برق، توربین های بادی هستند که حدود ۱۱۹/۱ مگاوات ساعت در سال (معادل ۸۰٪ کل تولید) را تأمین می کنند. پنل های خورشیدی حدود ۱۶/۵ مگاوات ساعت (۱۱/۵٪) و ژنراتور دیزلی حدود ۱۲/۳ مگاوات ساعت (۸/۵٪) تولید دارند. در مجموع، کل توان سالانه سامانه ۱۴۷/۸۵ مگاوات ساعت است که به طور قابل توجهی بیشتر از نیاز مصرفی سالانه جامعه (۷۸ مگاوات ساعت) می باشد. این مازاد تولید، حدود ۶۸ مگاوات ساعت در سال، می تواند برای فروش به شبکه اصلی یا مصارفی مانند پمپاژ آب و کسب و کارهای محلی مورد استفاده قرار گیرد و از نظر اقتصادی سودآوری سیستم را افزایش دهد. نتایج نشان می دهد که انرژی بادی نقش غالبی در تأمین بار مصرفی دارد و باعث کاهش وابستگی به دیزل و مصرف سوخت می شود. همچنین، بیش از ۹۱٪ تولید برق از منابع تجدیدپذیر (باد و خورشید) حاصل شده است که نشان دهنده پایداری بالای سیستم از نظر زیست محیطی و اقتصادی در مناطق دور از شبکه است.



شکل ۳: انرژی الکتریکی تولید شده توسط اجزا مختلف سیستم

جدول ۳ میزان سالانه آلاینده های تولید شده توسط ژنراتور دیزلی در سامانه هیبریدی را نشان می دهد. این ژنراتور سالانه حدود ۱۲,۱۸۲ کیلوگرم دی اکسید کربن (CO_2) منتشر می کند که بیشترین سهم را در میان آلاینده ها دارد. همچنین، انتشار سالانه شامل ۷۶/۸ کیلوگرم مونوکسید کربن (CO)، ۳/۳۵ کیلوگرم هیدروکربن نسوخته، ۰/۴۶۵ کیلوگرم ذرات معلق، ۲۹/۸ کیلوگرم دی اکسید گوگرد (SO_2) و ۷۲/۱ کیلوگرم اکسیدهای نیتروژن (NO_x) است. لازم به ذکر است که تمام این مقادیر صرفاً از عملکرد ژنراتور دیزلی ناشی می شوند؛ زیرا اجزای تجدیدپذیر سیستم مانند توربین های بادی و پنل های خورشیدی در هنگام بهره برداری فاقد انتشار آلاینده هستند. بنابراین، نتایج به روشنی نشان می دهد که افزایش سهم انرژی های تجدیدپذیر در سامانه موجب کاهش وابستگی به دیزل و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و آلاینده های هوا می شود، و از این رو از دیدگاه زیست محیطی، به کارگیری منابع پاک نقشی اساسی در پایداری سامانه ایفا می کند.

جدول ۳: میزان آلاینده‌گی تولید شده توسط سیستم

Quantity	Value	Unit
Carbon Dioxide	12,182	Kg/year
Carbon Monoxide	76.8	Kg/year
Unburned Hydrocarbons	3.35	Kg/year
Particulate Matter	0.465	Kg/year
Sulfur Dioxide	29.8	Kg/year
Nitrogen Oxides	72.1	Kg/year

۴. آنالیز حساسیت

۱. قیمت سوخت دیزل

با افزایش قیمت سوخت از 0.02€ تا 0.08€ ، ظرفیت پنل‌های خورشیدی از 7.67 kW به 10.8 kW و تعداد باتری‌ها از ۱۸ به ۲۰ افزایش می‌یابد. این تغییر سبب کاهش مصرف سوخت سالانه دیزل از $4,986\text{ L}$ به $3,901\text{ L}$ می‌شود، ولی هزینه کل سیستم (NPC) و هزینه برق (COE) کمی افزایش می‌یابد (از 0.0775€ kWh تا 0.0811€ kWh). نتیجه: افزایش قیمت سوخت باعث حرکت به سمت وابستگی بیشتر به منابع تجدیدپذیر و کاهش آلاینده‌گی می‌شود.

۲. میانگین سرعت باد

افزایش سرعت باد از 5 m/s به 9 m/s باعث کاهش محسوس ظرفیت مورد نیاز پنل‌ها و باتری‌ها می‌شود (پنل از 15.4 kW به 4.02 kW و باتری از ۱۹ به ۱۷ عدد). مصرف سوخت دیزل از $6,687\text{ L}$ به $3,333\text{ L}$ کاهش یافته و هزینه برق از 0.0959€ kWh به 0.0627€ kWh کاهش می‌یابد. نتیجه: هرچه منبع بادی قوی‌تر باشد، پایداری و صرفه اقتصادی بیشتری حاصل می‌شود.

۳. عمر مفید پنل‌های خورشیدی

افزایش عمر پنل از ۱۵ به ۳۰ سال سبب رشد ظرفیت نصب از 4.4 kW به 8.48 kW و کاهش هزینه برق از 0.0796€ kWh به 0.0772€ kWh می‌شود، درحالی‌که مصرف سوخت دیزل نیز تا 4804 L/year کاهش می‌یابد. نتیجه: پنل‌های بادوام‌تر هزینه نگهداری و جایگزینی را کاهش داده و استفاده از انرژی خورشیدی را افزایش می‌دهند.

۴. ارتفاع محور توربین بادی

افزایش ارتفاع محور توربین از ۲۰ به ۶۰ متر موجب کاهش ظرفیت مورد نیاز PV و باتری‌ها شده و هزینه برق را حدود ۱۱٪ کاهش می‌دهد (از 0.0808€ kWh به 0.0725€ kWh). مصرف سوخت از $4,980\text{ L}$ به $4,351\text{ L/year}$ کاهش یافته و کارایی تولید انرژی بادی بهبود می‌یابد. نتیجه: ارتفاع بیشتر توربین مستقیماً موجب افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه و آلاینده‌گی می‌شود.

۴. نتیجه گیری کلی و پیشنهادات

در این پژوهش، بهینه‌سازی سامانه مستقل هیبریدی خورشیدی-بادی با پشتیبان دیزل در استان خراسان جنوبی با استفاده از نرم‌افزار HOMER Pro به‌منظور تأمین برق قابل اطمینان و اقتصادی برای مناطق دور از شبکه بررسی شد. نتایج تحلیل‌ها نشان دادند که ترکیب مناسب و متعادل میان منابع تجدیدپذیر و مولد فسیلی می‌تواند ضمن کاهش هزینه انرژی و وابستگی به سوخت‌های دیزلی، انتشار آلاینده‌های محیطی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. سامانه بهینه شامل ۹۲۹ کیلووات پنل خورشیدی، ۴ کیلووات توربین بادی، ۲۹ کیلووات ژنراتور دیزلی، ۱۸ باتری و اینورتر ۱۰۴ کیلوواتی بود که با COE برابر ۰/۰۷۸۴۴ €/kWh و NPC برابر ۷۹,۰۰۶ € اقتصادی‌ترین ساختار را ارائه داد. در بررسی آلاینده‌ها، ژنراتور دیزلی با انتشار سالانه حدود ۱۲,۱۸۲ کیلوگرم CO₂ و سایر گازهای سمی، عامل اصلی آلودگی شناخته شد و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر موجب کاهش معنی‌دار این مقادیر گردید. همچنین تحلیل حساسیت نشان داد که افزایش سرعت باد، طول عمر پنل‌ها و ارتفاع محور توربین باعث کاهش هزینه و مصرف سوخت تا حدود ۱۰-۱۱٪ می‌شود، در حالی که رشد قیمت سوخت دیزل تمایل سیستم را به سمت استفاده بیشتر از منابع تجدیدپذیر هدایت می‌کند.

۵. پیشنهادات

- استفاده از تحلیل حساسیت پیشرفته برای ارزیابی تأثیر تغییر وزن شاخص‌ها و اطمینان از پایداری نتایج نهایی.
- ترکیب مدل HOMER با GIS جهت نمایش دقیق نقشه‌های اولویت مکانی و تسهیل در اتخاذ تصمیم‌های اجرایی.
- توسعه سیستم به‌صورت چندهدفه زیست‌محیطی با لحاظ انتشار آلاینده‌ها، بهره‌وری آب و تأثیرات اجتماعی توسعه نیروگاه‌ها.
- در تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک، PSO یا NSGA-II برای بهینه‌سازی وزن‌ها و پارامترهای طراحی استفاده شود تا کارایی مدل افزایش یافته و مقایسه نتایج با روش‌های کلاسیک امکان‌پذیر گردد.

۶. مراجع

1. Alayi, R., et al., *Optimization and evaluation of a wind, solar and fuel cell hybrid system in supplying electricity to a remote district in national grid*. International Journal of Energy Sector Management, 2019.
2. Arief, Y.Z., N.A.A.A. Halim, and M.H.I. Saad. *Optimization of hybrid renewable energy in Sarawak remote rural area using HOMER software*. in 2019 International UNIMAS STEM 12th Engineering Conference (EnCon). 2019. IEEE.
3. Vendoti, S., M. Muralidhar, and R. Kiranmayi, *Techno-economic analysis of off-grid solar/wind/biogas/biomass/fuel cell/battery system for electrification in a cluster of villages by HOMER software*. Environment, Development and Sustainability, 2020: p. 1-22.
4. Ali, T., H. Ma, and A.J. Nahian, *An analysis of the renewable energy technology selection in the southern region of Bangladesh using a hybrid multi-criteria decision making (MCDM)*

method. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 2019. **9**(4): p. 1838-1848.

5. Moradi, S., et al., *Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran*. Energy Strategy Reviews, 2020. **29**: p. 100478.

6. Ekren, O., C.H. Canbaz, and Ç.B. Güvel, *Sizing of a solar-wind hybrid electric vehicle charging station by using HOMER software*. Journal of Cleaner Production, 2021. **279**: p. 123615.

7. Sharma, K.K., et al., *Economic evaluation of a hybrid renewable energy system (HRES) using hybrid optimization model for electric renewable (HOMER) software—a case study of rural India*. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2021.

8. Uwineza, L., H.-G. Kim, and C.K. Kim, *Feasibility study of integrating the renewable energy system in Popova Island using the Monte Carlo model and HOMER*. Energy Strategy Reviews, 2021. **33**: p. 100607.

9. Suriadi, S., et al. *The optimization of hybrid power generator system (PV-Wind turbine) using Homer software*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. IOP Publishing.

10. Verma, N. and S. Vadhera, *Optimization of Cost of Smart Grid: A Case Study of Kutch, Gujarat Using HOMER Software*, in *Soft Computing for Security Applications*. 2022, Springer. p. 529-537.

11. Ur Rashid, M., et al., *Techno-Economic Analysis of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System for Remote Areas Electrification Using Homer Pro*. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022: p. 1-17.

12. Li, T., H. Wang, and Y. Lin, *Selection of renewable energy development path for sustainable development using a fuzzy MCDM based on cumulative prospect theory: the case of Malaysia*. Scientific Reports, 2024. **14**(1): p. 15082.

13. Karbassi Yazdi, A., et al., *Sustainable solutions: using MCDM to choose the best location for green energy projects*. International Journal of Energy Sector Management, 2025. **19**(1): p. 146-180.

14. Husain, A.M., et al., *A robust decision-making approach for the selection of an optimal renewable energy source in India*. Energy Conversion and Management, 2024. **301**: p. 117989.