

بررسی و تحلیل سیستم هیبریدی خورشیدی- بادی جهت حفظ منابع طبیعی با ذخیره‌سازی انرژی برای روستای کنجدکار (زیلایی) استان خوزستان

سعید هوشمندی^۱، سارا الله یاری بیک^{۲*}، علیرضا سرائی^۳

(۱) دانشجوی دکتری تخصصی گروه مهندسی انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۲) دانشیار گروه فیزیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. *رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: s.allahyaribeik@iau.ac.ir

(۳) استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

چکیده

این پژوهش به بررسی کاربرد سیستم هیبریدی انرژی تجدیدپذیر (خورشیدی- بادی) همراه با فناوری ذخیره‌سازی انرژی در روستای کنجدکار (زیلایی) استان خوزستان می‌پردازد. با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی و محدودیت دسترسی به شبکه برق سراسری در این منطقه، سیستم‌های هیبریدی می‌توانند راهکاری پایدار برای تامین انرژی و حفاظت از منابع طبیعی ارایه دهند. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های اقلیمی و الگوی مصرف انرژی روستا، یک سیستم هیبریدی بهینه طراحی و شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد سیستم بهینه‌سازی شده شامل ۸۷/۴۱ کیلووات ظرفیت خورشیدی، ۱۰۰ کیلووات ظرفیت بادی و ۲۰۰ کیلووات ساعت ذخیره‌سازی باتری می‌تواند ۴۴/۵۹ درصد از نیاز انرژی روستا را از منابع تجدیدپذیر تامین کند. این سیستم علاوه بر کاهش ۴۴/۵۹ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای، هزینه تراز شده انرژی ۰/۰۰۲۳ دلار بر کیلووات ساعت را ارایه می‌دهد که در مقایسه با ۰/۱۷۸۰ دلار بر کیلووات ساعت سیستم‌های دیزلی، به میزان قابل توجهی مقرون به صرفه‌تر است. با وجود سرمایه‌گذاری اولیه بالاتر سیستم هیبریدی، دوره بازگشت سرمایه ۱۳/۲۲ سال محاسبه شده که با توجه به عمر مفید ۲۵ ساله آن، از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است.

واژه‌های کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، بهینه‌سازی، توسعه پایدار، حفاظت از منابع طبیعی، ذخیره‌سازی انرژی، روستای کنجدکار، سیستم هیبریدی خورشیدی- بادی.

امروزه با افزایش نگرانی‌های جهانی در خصوص تغییرات اقلیمی و آلودگی‌های زیست‌محیطی، توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی بیش از پیش اهمیت یافته است. ایران با وجود برخورداری از منابع غنی انرژی‌های تجدیدپذیر، همچنان وابستگی شدیدی به سوخت‌های فسیلی دارد. بر اساس آمار وزارت نیرو تا پایان سال ۱۴۰۲، تنها حدود ۱/۵ درصد از کل ظرفیت تولید برق کشور از منابع تجدیدپذیر تامین می‌شود (وزارت نیرو، ۱۴۰۲). مناطق روستایی ایران به ویژه روستاهای دورافتاده با چالش‌های متعددی در زمینه تامین انرژی مواجه هستند. طبق گزارش سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، حدود ۲/۵ درصد از روستاهای کشور هنوز به شبکه برق سراسری متصل نیستند (ساتبا، ۱۴۰۲). در مناطقی که به شبکه متصل هستند نیز مشکلاتی نظیر قطعی‌های مکرر، افت ولتاژ و هزینه‌های بالای انتقال و توزیع وجود دارد. این در حالی است که بسیاری از این مناطق از پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر برخوردار هستند.

روستای کنجدکار (زیلایی) در استان خوزستان از جمله مناطقی است که با چالش‌های تامین انرژی مواجه است. این روستا به دلیل موقعیت جغرافیایی و فاصله از شبکه برق سراسری، عمدتاً از ژنراتورهای دیزلی برای تامین برق استفاده می‌کند که علاوه بر هزینه‌های بالای سوخت و نگهداری، آلودگی‌های زیست‌محیطی قابل توجهی نیز به همراه دارد. از سوی دیگر، این منطقه از پتانسیل خوبی برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی و بادی برخوردار است. سیستم‌های هیبریدی انرژی تجدیدپذیر، با ترکیب دو یا چند منبع انرژی تجدیدپذیر، می‌تواند راهکاری مناسب برای غلبه بر ماهیت متغیر منابع تجدیدپذیر باشند. به عنوان مثال، در سیستم‌های هیبریدی خورشیدی-بادی، معمولاً در روزهای آفتابی که سرعت باد کمتر است، انرژی خورشیدی بیشتری تولید می‌شود و برعکس، در شب‌ها یا روزهای ابری، انرژی باد می‌تواند جبران‌کننده کاهش تولید انرژی خورشیدی باشد (عظیمی و همکاران، ۱۳۹۹).

پژوهش‌های متعددی در زمینه کاربرد سیستم‌های هیبریدی انرژی تجدیدپذیر در مناطق روستایی انجام شده است. اسدی

و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی امکان‌سنجی فنی-اقتصادی سیستم هیبریدی خورشیدی-بادی برای تامین برق روستاهای استان سیستان و بلوچستان پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از سیستم هیبریدی می‌تواند هزینه برق را تا ۴۰ درصد کاهش دهد. رضایی و همکاران (۱۴۰۰) یک سیستم هیبریدی خورشیدی-بادی-دیزلی را برای یک روستا در استان کرمان طراحی و شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد این سیستم می‌تواند ۸۵ درصد نیاز انرژی روستا را تامین کند و انتشار CO₂ را تا ۶۵ درصد کاهش دهد. در سطح بین‌المللی نیز مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است. به عنوان نمونه Kaabeche و همکاران (۲۰۱۱) به بهینه‌سازی سیستم هیبریدی خورشیدی-بادی برای مناطق روستایی پرداختند و نشان دادند این سیستم‌ها می‌توانند راهکاری مقرون به صرفه برای تامین انرژی در مناطق دورافتاده باشند.

هدف اصلی پژوهش حاضر، طراحی و تحلیل یک سیستم هیبریدی خورشیدی-بادی با ذخیره‌سازی انرژی برای روستای کنجدکار (زیلایی) است. در این راستا، ابتدا پتانسیل‌های انرژی تجدیدپذیر منطقه مورد مطالعه بررسی شده، سپس با استفاده از داده‌های اقلیمی و الگوی مصرف انرژی، یک سیستم هیبریدی بهینه طراحی و شبیه‌سازی شده است. در نهایت، عملکرد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی: روستای کنجدکار (زیلایی) در شمال شرقی استان خوزستان و در ارتفاعات زاگرس واقع شده است. این روستا در مختصات جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۴۲ دقیقه طول شرقی قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۱۸۵۰ متر است. جمعیت روستا حدود ۴۵۰ نفر (۱۲۰ خانوار) بوده و اقتصاد آن عمدتاً بر پایه کشاورزی، دامداری و صنایع دستی استوار است.

این منطقه از پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی و بادی برخوردار است. میانگین تابش خورشیدی در این منطقه ۵/۲ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز و میانگین

توربین‌های بادی ۱،۲۰۰ دلار بر کیلووات، باتری‌ها ۴۰۰ دلار بر کیلووات ساعت و اینورترها ۲۰۰ دلار بر کیلووات در نظر گرفته شد.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی: برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم هیبریدی، یک مدل محاسباتی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون توسعه داده شد. این مدل قادر است با استفاده از داده‌های اقلیمی و مشخصات فنی تجهیزات، میزان تولید انرژی خورشیدی و بادی را در هر ساعت محاسبه کند. همچنین با توجه به الگوی مصرف انرژی، عملکرد سیستم ذخیره‌سازی و نیاز به انرژی پشتیبان را تعیین می‌کند. برای محاسبه تولید انرژی خورشیدی، از رابطه (۱) استفاده شده است:

$$P_{pv} = I * A * \eta_{pv} * [1 + \alpha_p * (T_c - T_{ref})] \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن P_{pv} توان تولیدی پنل فتوولتائیک (کیلووات)، III تابش خورشیدی (کیلووات بر مترمربع)، A مساحت پنل (مترمربع)، η_{pv} بازده پنل، α_p ضریب دمایی توان (درصد بر درجه سانتی‌گراد)، T_c دمای سلول (درجه سانتی‌گراد) و T_{ref} دمای مرجع (۲۵ درجه سانتی‌گراد) است.

برای محاسبه تولید انرژی بادی، از منحنی توان توربین بادی استفاده شد که رابطه بین سرعت باد و توان تولیدی را نشان می‌دهد (رابطه ۲):

$$P_{wind} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ P_{rated} * \left(\frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} \right) & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{rated} & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن P_{wind} توان تولیدی توربین بادی (کیلووات)، v سرعت باد (متر بر ثانیه)، v_{ci} سرعت شروع توربین (۳ متر بر ثانیه)، v_r سرعت نامی (۱۲ متر بر ثانیه)، v_{co} سرعت قطع (۲۵ متر بر ثانیه) و P_{rated} توان نامی توربین (کیلووات) است.

سرعت باد ۵/۸ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری است. جامعه مورد مطالعه دارای الگوی مصرف انرژی با دو پیک (صبح و شب) است که مشخصه بارز مصرف انرژی در مناطق روستایی است. متوسط مصرف روزانه انرژی الکتریکی برای این جامعه حدود ۴۴۲/۷ کیلووات ساعت است که معادل مصرف سالانه ۱۶۱۴۸۴/۸۱ کیلووات ساعت می‌باشد. در حال حاضر، برق این روستا از طریق ژنراتورهای دیزلی تأمین می‌شود که هزینه‌های بالای سوخت و تعمیر و نگهداری را به همراه دارد.

جمع‌آوری داده‌ها: جهت طراحی و شبیه‌سازی سیستم هیبریدی، داده‌های زیر جمع‌آوری شدند:

داده‌های اقلیمی: داده‌های ساعتی تابش خورشید، سرعت و جهت باد، دما و رطوبت برای یک سال کامل (۸،۷۶۰ ساعت) از ایستگاه هواشناسی نزدیک به روستا و همچنین پایگاه داده NASA استخراج شد. این داده‌ها شامل تغییرات فصلی و روزانه است که برای شبیه‌سازی دقیق سیستم ضروری است.

الگوی مصرف انرژی: الگوی مصرف ساعتی، روزانه و فصلی انرژی با استفاده از داده‌های آماری و پرسشنامه‌های توزیع شده در میان ساکنین روستا تخمین زده شد. این الگو شامل دو پیک مصرف در صبح (۶ تا ۹) و شب (۱۷ تا ۲۳) با مصرف کمتر در ساعات میانی روز و نیمه شب بود.

مشخصات فنی تجهیزات: مشخصات فنی پنل‌های فتوولتائیک (مدل JKM330PP-72، شرکت Jinko Solar، چین)، توربین‌های بادی (مدل FD2.5-100، شرکت Aeolos Wind Energy، انگلستان)، باتری‌ها (مدل LFP-200Ah، شرکت Lithium Energy Japan، ژاپن)، اینورترها (مدل SMA Solar Sunny Tripower CORE1، شرکت Technology AG، آلمان) و سایر تجهیزات مورد نیاز از کاتالوگ‌های سازندگان معتبر استخراج شد. این مشخصات شامل بازده، منحنی عملکرد، عمر مفید و محدودیت‌های فنی تجهیزات است.

داده‌های اقتصادی: هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، عمر مفید تجهیزات و نرخ تنزیل از منابع معتبر و استعلام از شرکت‌های فعال در این حوزه جمع‌آوری شد. هزینه پنل‌های فتوولتائیک ۸۰۰ دلار بر کیلووات،

برای بهینه‌سازی سیستم، از الگوریتم بهینه‌سازی L-BFGS-B استفاده شد که با هدف حداقل‌سازی هزینه تراز شده انرژی (LCOE)، ترکیب بهینه ظرفیت‌های خورشیدی، بادی و ذخیره‌سازی را تعیین می‌کند. تابع هدف به صورت رابطه (۳) تعریف شد:

(رابطه ۳)

$$LCOE = \frac{C_{inv} + \sum_{t=1}^n [(C_{O\&M,t} + C_{rep,t}) / (1+r)^t]}{\sum_{t=1}^n [E_t / (1+r)^t]}$$

که در آن C_{inv} هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، $C_{O\&M,t}$ هزینه‌های تعمیر و نگهداری در سال t ، $C_{rep,t}$ هزینه‌های جایگزینی در سال t ، E_t انرژی تولیدی در سال t ، r نرخ تنزیل (۸ درصد) و n عمر مفید سیستم (۲۵ سال) است.

در این بهینه‌سازی، محدودیت‌های فنی و اقتصادی مانند حداقل قابلیت اطمینان مورد نیاز (۹۵ درصد)، حداکثر سرمایه‌گذاری اولیه و محدودیت‌های فضای نصب در نظر گرفته شد. برای ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی سیستم، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای محاسبه شد و ضریب انتشار CO_2 برای ژنراتورهای دیزلی ۰/۸ کیلوگرم بر کیلووات ساعت در نظر گرفته شد.

نتایج

تحلیل عملکرد فنی سیستم هیبریدی پیشنهادی

نتایج شبیه‌سازی سیستم هیبریدی برای روستای کنجدکار نشان داد ترکیب بهینه منابع انرژی عبارت است از:

- ظرفیت پنل‌های فتوولتائیک: ۸۷/۴۱ کیلووات؛
- ظرفیت توربین‌های بادی: ۱۰۰ کیلووات؛
- ظرفیت ذخیره‌سازی باتری: ۲۰۰ کیلووات ساعت؛
- ظرفیت اینورتر: ۱۰۰ کیلووات؛

این سیستم قادر است ۴۴/۵۹ درصد از نیاز انرژی روستا را از طریق منابع تجدیدپذیر تامین کند. سهم انرژی خورشیدی در تولید انرژی تجدیدپذیر ۴۴/۴۱ درصد و سهم انرژی بادی ۵۵/۵۹ درصد است. ۵۵/۴۱ درصد باقی‌مانده نیاز انرژی از طریق ژنراتور دیزلی پشتیبان تامین می‌شود.

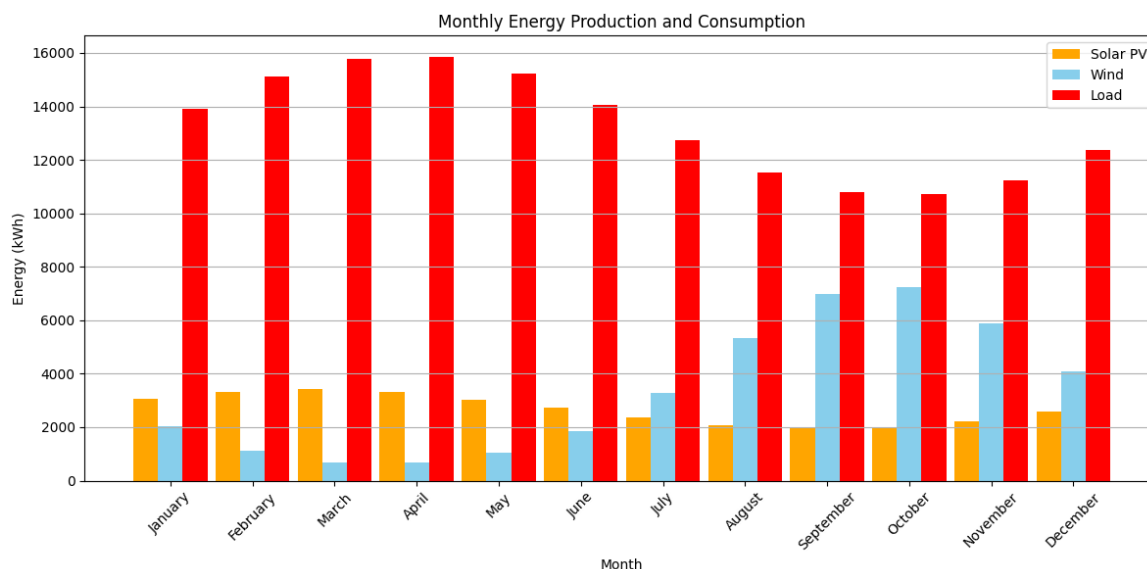
تولید انرژی سالانه سیستم هیبریدی ۷۳۱۸۷/۴۶ کیلووات ساعت است، درحالی‌که مصرف سالانه انرژی ۱۶۱۴۸۴/۸۱ کیلووات ساعت است. این اختلاف توسط ژنراتور دیزلی پشتیبان جبران می‌شود که سالانه ۸۹۴۷۳/۶۶ کیلووات ساعت انرژی تولید می‌کند. قابلیت اطمینان سیستم ۱۰۰ درصد است، به این معنی که تمام نیاز انرژی روستا در تمام ساعات سال تامین می‌شود.

جدول ۱. توزیع ماهانه تولید انرژی و سهم منابع تجدیدپذیر

ماه	تولید خورشیدی (kWh)	تولید بادی (kWh)	مصرف انرژی (kWh)	سهم تجدیدپذیر (%)
ژانویه	۳۰۴۹/۸۷	۲۰۲۱/۴۵	۱۳۹۱۷/۳۳	۳۶/۹۳
فوریه	۳۳۱۲/۴۴	۱۱۳۰/۷۰	۱۵۱۰۵/۳۷	۲۹/۴۱
مارس	۳۴۲۴/۵۵	۶۷۵/۸۷	۱۵۷۹۸/۸۱	۲۵/۹۷
آوریل	۳۳۲۰/۷۷	۶۷۲/۴۳	۱۵۸۵۳/۰۰	۲۵/۱۹
مه	۳۰۱۷/۹۷	۱۰۳۳/۱۰	۱۵۲۳۷/۹۹	۲۶/۵۸
ژوئن	۲۷۱۸/۹۳	۱۸۶۱/۲۱	۱۴۰۴۱/۹۷	۳۲/۶۰
ژوئیه	۲۳۶۹/۲۱	۳۲۹۸/۶۱	۱۲۷۵۰/۹۶	۴۴/۲۱
اوت	۲۰۸۲/۱۱	۵۳۳۸/۶۷	۱۱۵۰۹/۰۵	۶۳/۱۷
سپتامبر	۱۹۶۸/۳۵	۶۹۸۹/۰۰	۱۰۷۵۸/۳۳	۷۹/۸۴
اکتبر	۱۹۷۹/۲۷	۷۲۴۶/۱۲	۱۰۷۱۰/۹۸	۸۲/۴۱
نوامبر	۲۲۱۹/۲۷	۵۸۶۷/۲۳	۱۱۲۴۵/۲۶	۶۹/۸۹
دسامبر	۲۵۷۵/۴۴	۴۰۸۴/۰۷	۱۲۳۵۷/۸۸	۵۳/۲۱

درحالی که در ماه آوریل، این مقدار به ۲۵/۱۹ درصد کاهش می یابد. این تغییرات فصلی نشان دهنده اهمیت استفاده از سیستم هیبریدی است که می تواند تغییرات فصلی در دسترسی به منابع تجدیدپذیر را جبران کند.

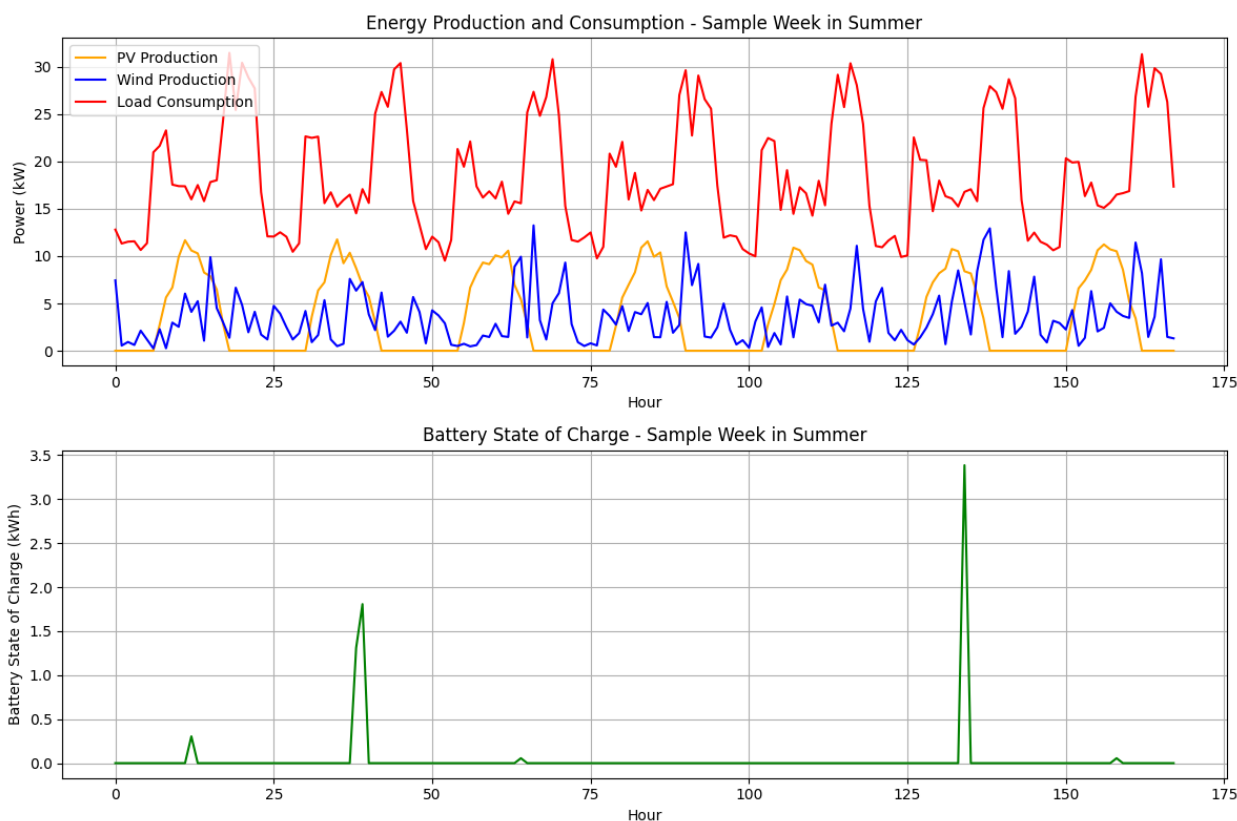
شکل (۱)، توزیع ماهانه تولید انرژی و سهم منابع تجدیدپذیر را نشان می دهد. همان طور که در این شکل و جدول (۱) مشاهده می شود، سهم انرژی تجدیدپذیر در ماه های مختلف سال متفاوت است. در ماه های گرم سال (تابستان)، سهم انرژی تجدیدپذیر بیشتر است. به عنوان مثال در ماه اکتبر، ۸۲/۴۱ درصد از انرژی مورد نیاز از منابع تجدیدپذیر تامین می شود،



شکل ۱. توزیع ماهانه تولید انرژی و سهم منابع تجدیدپذیر

و این مازاد در باتری ها ذخیره می شود. در ساعات دیگر، تولید انرژی تجدیدپذیر کمتر از مصرف است و این کمبود از طریق باتری ها یا ژنراتور دیزلی جبران می شود. همچنین می توان مشاهده کرد در شب ها، تولید انرژی خورشیدی صفر و تنها منبع انرژی تجدیدپذیر، انرژی بادی است.

شکل (۲) تولید انرژی و مصرف را در یک هفته نمونه در تابستان نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، تولید انرژی خورشیدی در طول روز و تولید انرژی بادی با الگوی متغیرتری صورت می گیرد. در برخی ساعات، مجموع تولید انرژی خورشیدی و بادی بیشتر از مصرف است



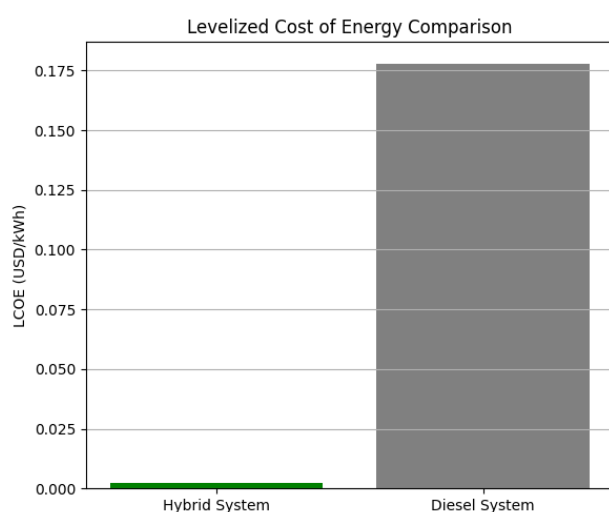
شکل ۲. تولید انرژی و مصرف در یک هفته نمونه در تابستان

- تحلیل اقتصادی و محاسبه هزینه تراز شده انرژی^۱
- هزینه اولیه سیستم هیبریدی پیشنهادی ۲۸۹۹۳۰/۸۸ دلار
 - هزینه پیل های فتوولتائیک: ۶۹۹۲۸,۸۰ دلار (۸۷/۴۱)
 - هزینه اینورتر و سایر تجهیزات: ۲۰۰۲,۰۸ دلار
 - هزینه توربین های بادی: ۱۲۰۰۰۰,۰۰ دلار (۱۰۰ کیلووات × ۱۲۰۰ دلار)
 - هزینه باتری ها: ۸۰۰۰۰,۰۰ دلار (۲۰۰ کیلووات ساعت × ۴۰۰ دلار)
 - هزینه اینورتر و سایر تجهیزات: ۲۰۰۲,۰۸ دلار (۸۰۰ × ۲,۰۰۲ دلار)

جدول ۲. خلاصه جریان نقدی سیستم هیبریدی و سیستم دیزلی (۵ سال اول و هر ۵ سال پس از آن)

سال	جریان نقدی سیستم هیبریدی (دلار)	جریان نقدی سیستم دیزلی (دلار)	پس انداز تجمعی (دلار)
۰	-۲۸۹۹۳۰/۸۸	-۱۵۰۰۰/۰۰	۲۷۴۹۳۰/۸۸
۱	-۵۸۷۴/۱۴	-۲۶۶۷۳/۶۸	۲۵۵۶۷۲/۰۵
۲	-۵۸۷۴/۱۴	-۲۶۶۷۳/۶۸	۲۳۷۸۳۹/۷۹
۳	-۵۸۷۴/۱۴	-۲۶۷۳/۶۸	۲۲۱۳۲۸/۴۵
۴	-۵۸۷۴/۱۴	-۲۶۶۷۳/۶۸	۲۰۶۰۴۰/۱۶
۵	-۵۸۷۴/۱۴	-۲۶۶۷۳/۶۸	۱۹۱۸۸۴/۳۴
۱۰	-۸۵۸۷۴/۱۴	-۳۶۶۷۳/۶۸	۱۶۷۷۸۷/۸۰
۱۵	-۵۸۷۴/۱۴	-۲۶۶۷۳/۶۸	۱۲۹۳۲۱/۱۹
۲۰	-۸۵۸۷۴/۱۴	-۳۶۶۷۳/۶۸	۱۱۸۱۵۹/۸۳
۲۵	-۵۸۷۴/۱۴	-۲۶۶۷۳/۶۸	۱۰۰۳۴۲/۳۴

شکل مشاهده می‌شود، سرمایه‌گذاری اولیه سیستم هیبریدی (۲۸۹۹۳۰,۸۸ دلار) بسیار بیشتر از سیستم دیزلی (۱۵۰۰,۰۰ دلار) است. این تفاوت قابل توجه در سرمایه‌گذاری اولیه یکی از چالش‌های اصلی در توسعه سیستم‌های هیبریدی در مناطق روستایی است. با این حال، با توجه به هزینه‌های عملیاتی پایین و عمر مفید طولانی‌تر سیستم هیبریدی، این سیستم در بلندمدت از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است.



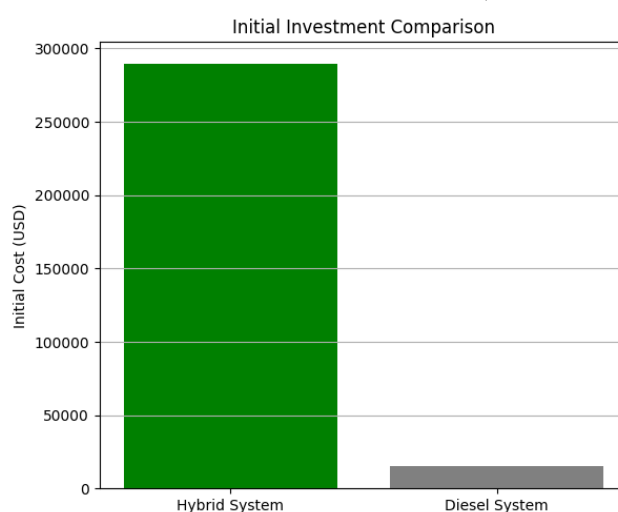
شکل ۳. مقایسه هزینه ترا شده انرژی بین سیستم هیبریدی و سیستم دیزلی

ارزیابی اثرات زیست‌محیطی

یکی از مزایای اصلی سیستم هیبریدی پیشنهادی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد استفاده از سیستم هیبریدی می‌تواند انتشار CO_2 را تا ۴۴/۵۹ درصد نسبت به سیستم متداول (ژنراتور دیزلی) کاهش دهد. میزان انتشار CO_2 برای سیستم هیبریدی پیشنهادی ۷۱۵۷۸/۹۳ کیلوگرم در سال است، درحالی‌که این مقدار برای سیستم دیزلی ۱۲۹۱۸۷/۸۵ کیلوگرم در سال است. این کاهش ۵۷۶۰۸/۹۲ کیلوگرم CO_2 در سال معادل حذف حدود ۱۲ خودروی سواری از جاده‌ها یا کاشت حدود ۲,۸۸۰ درخت است. علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، سیستم هیبریدی مزایای زیست‌محیطی دیگری نیز دارد، از جمله:

- کاهش آلودگی صوتی ناشی از ژنراتورهای دیزلی؛
- کاهش خطر نشت سوخت و آلودگی خاک و آب؛
- کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حفظ منابع طبیعی؛

شکل (۳) مقایسه هزینه ترا شده انرژی بین سیستم هیبریدی و سیستم دیزلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، هزینه ترا شده انرژی سیستم هیبریدی (۰/۰۰۲۳ دلار بر کیلووات ساعت) به میزان قابل توجهی کمتر از سیستم دیزلی (۰/۱۷۸۰ دلار بر کیلووات ساعت) است. این تفاوت چشمگیر نشان‌دهنده مزیت اقتصادی بلندمدت سیستم هیبریدی، علی‌رغم هزینه اولیه بالاتر آن است. همچنین قسمت سمت راست تصویر، مقایسه سرمایه‌گذاری اولیه بین سیستم هیبریدی و سیستم دیزلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این



هزینه سالانه تعمیر و نگهداری سیستم هیبریدی ۵۸۷۴/۱۴ دلار برآورد شده که شامل موارد زیر است:

- هزینه تعمیر و نگهداری پنل‌های فتوولتائیک: ۸۷۴,۱۰ دلار (۸۷/۴۱ کیلووات $\times$ ۱۰ دلار)
- هزینه تعمیر و نگهداری توربین‌های بادی: ۳۰۰۰,۰۰ دلار (۱۰۰ کیلووات $\times$ ۳۰ دلار)
- هزینه تعمیر و نگهداری باتری‌ها: ۲۰۰۰,۰۰ دلار (۲۰۰ کیلووات ساعت $\times$ ۱۰ دلار)

تحلیل جریان نقدی (جدول ۲) نشان می‌دهد سیستم هیبریدی پیشنهادی دارای دوره بازگشت سرمایه ۱۳/۲۲ سال است. با توجه به عمر مفید ۲۵ ساله سیستم، این دوره بازگشت سرمایه قابل قبول است و نشان می‌دهد سیستم هیبریدی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است.

- کاهش نیاز به حمل و نقل سوخت و آلودگی‌های ناشی از آن.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد سیستم هیبریدی خورشیدی-بادی با ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند راهکاری پایدار و مقرون به صرفه برای تامین انرژی در روستای کنجدکار (زیلایی) باشد. این سیستم نه تنها از نظر اقتصادی مزایای قابل توجهی نسبت به سیستم‌های متداول دارد، بلکه به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ منابع طبیعی نیز کمک می‌کند.

ترکیب بهینه منابع انرژی برای روستای کنجدکار، شامل ۸۷/۴۱ کیلووات پنل فتوولتائیک، ۱۰۰ کیلووات توربین بادی و ۲۰۰ کیلووات ساعت باتری است. این سیستم می‌تواند ۴۴/۵۹ درصد از نیاز انرژی روستا را از طریق منابع تجدیدپذیر تامین کند و هزینه تراز شده انرژی آن ۰/۰۰۲۳ دلار بر کیلووات ساعت است که ۹۸/۷۲ درصد کمتر از سیستم متداول دیزلی (۰/۱۷۸۰ دلار بر کیلووات ساعت) است.

همان‌طور که در شکل (۱) و جدول (۱) مشاهده شد، سهم انرژی تجدیدپذیر در ماه‌های مختلف سال متفاوت است. این تغییرات فصلی نشان‌دهنده اهمیت استفاده از سیستم هیبریدی است که می‌تواند تغییرات فصلی در دسترسی به منابع تجدیدپذیر را جبران کند. شکل (۲) نیز نشان داد در طول روز و شب، الگوی تولید انرژی خورشیدی و بادی متفاوت است و ترکیب این دو منبع می‌تواند پوشش بهتری برای تامین انرژی مورد نیاز فراهم کند.

شکل (۳) تفاوت قابل توجهی را بین هزینه تراز شده انرژی سیستم هیبریدی و سیستم دیزلی نشان داد. این تفاوت نشان‌دهنده مزیت اقتصادی بلندمدت سیستم هیبریدی است. با وجود اینکه سرمایه‌گذاری اولیه سیستم هیبریدی بسیار بیشتر از سیستم دیزلی است (شکل ۴)، اما هزینه‌های عملیاتی پایین و عمر مفید طولانی‌تر آن باعث می‌شود که در بلندمدت مقرون به صرفه‌تر باشد.

مزایای اصلی سیستم هیبریدی پیشنهادی عبارتند از: کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و افزایش امنیت انرژی؛ کاهش ۴۴/۵۹ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای نسبت به سیستم متداول؛ کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری در بلندمدت؛

افزایش پایداری و قابلیت اطمینان تامین انرژی با استفاده از منابع مکمل (قابلیت اطمینان ۱۰۰ درصد)؛ و ایجاد فرصت‌های شغلی جدید و توسعه اقتصادی محلی.

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات مشابه همخوانی دارد. به‌عنوان مثال، اسدی و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان دادند سیستم‌های هیبریدی می‌توانند هزینه برق را تا ۴۰ درصد کاهش دهند. همچنین، رضایی و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند این سیستم‌ها می‌توانند انتشار CO₂ را تا ۶۵ درصد کاهش دهند.

با این حال، چالش‌هایی نیز در مسیر توسعه سیستم‌های هیبریدی در مناطق روستایی وجود دارد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده شد، هزینه اولیه بالا یکی از مهم‌ترین چالش‌های این سیستم‌ها است. علاوه بر این، نیاز به دانش فنی برای نصب و نگهداری، و محدودیت‌های زیرساختی از جمله چالش‌های دیگر هستند که برای غلبه بر این چالش‌ها، سیاست‌های حمایتی زیر پیشنهاد می‌شود: ۱. حمایت‌های مالی و تسهیلات بانکی؛

ارایه وام‌های کم‌بهره و یارانه برای تامین هزینه اولیه سیستم‌های هیبریدی؛ ۲. مشوق‌های مالیاتی: معافیت‌های مالیاتی برای سرمایه‌گذاری در پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر در مناطق روستایی؛ ۳. تعرفه خرید تضمینی: خرید تضمینی برق مازاد تولیدی از سیستم‌های هیبریدی روستایی با قیمت مناسب؛ ۴. توسعه زیرساخت‌ها: سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های لازم برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در مناطق روستایی؛ ۵. آموزش و ظرفیت‌سازی: برگزاری دوره‌های آموزشی برای ساکنین روستاها جهت بهره‌برداری و نگهداری از سیستم‌های هیبریدی؛ ۶. استانداردسازی: تدوین استانداردها و دستورالعمل‌های فنی برای طراحی و اجرای سیستم‌های هیبریدی.

جهت تکمیل و توسعه این پژوهش، موارد زیر برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود:

۱. بررسی امکان استفاده از سایر منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند زیست‌توده و آبی کوچک) در سیستم‌های هیبریدی روستایی؛

۲. توسعه الگوریتم‌های هوشمند برای مدیریت بهینه انرژی در سیستم‌های هیبریدی؛

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری صمیمانه اهالی روستای کنجدکار (زیلایی) و همچنین کارشناسان اداره برق شهرستان مربوطه که در جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز این پژوهش همکاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

اسدی، م.، رضایی، ع. و محمدی، ح. (۱۳۹۹) امکان‌سنجی فنی- اقتصادی سیستم هیبریدی خورشیدی- بادی برای تامین برق روستاهای استان سیستان و بلوچستان. نشریه انرژی ایران، ۲۳(۲): ۷۸-۹۲.

رضایی، ع.، محمدی، ح. و اسدی، م. (۱۴۰۰) طراحی و شبیه‌سازی سیستم هیبریدی خورشیدی- بادی- دیزلی برای یک روستا در استان کرمان. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۸(۳): ۱۱۲-۱۲۴.

ساتبا (۱۴۰۲) آمار برق‌رسانی روستایی، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق، تهران، ۵۶ صفحه.

عظیمی، ا.، کریمی، م. و فرهادی، ر. (۱۳۹۹) بررسی کاربرد سیستم‌های هیبریدی انرژی تجدیدپذیر در مناطق روستایی ایران. نشریه حفاظت منابع طبیعی، ۱۲(۲): ۷۸-۹۵.

وزارت نیرو (۱۴۰۲) گزارش وضعیت انرژی‌های تجدیدپذیر ایران، وزارت نیرو، تهران، ۱۲۴ صفحه.

Kaabeche, A., Belhamel, M. and Ibtiouen, R. (2011) Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system. Energy, 36(2): 1214-1222.

۳. بررسی اثرات اجتماعی- اقتصادی استفاده از

سیستم‌های هیبریدی بر جوامع روستایی؛

۴. تحلیل چرخه عمر و اثرات زیست‌محیطی سیستم‌های هیبریدی با در نظر گرفتن تمام مراحل تولید، بهره‌برداری و بازیافت؛

۵. بررسی امکان ایجاد میکروگریدهای روستایی با قابلیت اتصال به شبکه سراسری؛ و

۶. توسعه مدل‌های پیش‌بینی تولید انرژی تجدیدپذیر با استفاده از هوش مصنوعی برای بهبود مدیریت سیستم‌های هیبریدی.

با توجه به پتانسیل بالای ایران در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و چالش‌های تامین انرژی در مناطق روستایی، سیستم‌های هیبریدی انرژی تجدیدپذیر می‌توانند راهکاری پایدار و مقرون به صرفه برای توسعه روستایی و حفاظت از منابع طبیعی ارائه دهند. نتایج این پژوهش نشان داد سیستم هیبریدی بهینه‌سازی شده می‌تواند با قابلیت اطمینان ۱۰۰ درصد، نیاز انرژی روستای کنجدکار را تامین کند و در عین حال، انتشار گازهای گلخانه‌ای را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

سیستم پیشنهادی با دوره بازگشت سرمایه ۱۳/۲۲ سال و کاهش ۴۴/۵۹ درصد در انتشار CO₂، نه تنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است، بلکه به حفظ محیط زیست و منابع طبیعی نیز کمک می‌کند. امید است با اجرای سیاست‌های حمایتی مناسب و انجام تحقیقات بیشتر، توسعه این سیستم‌ها در سراسر مناطق روستایی کشور مشهود شود.

Investigation and Analysis of a Solar-Wind Hybrid System for Natural Resource Conservation with Energy Storage for Konjedkar (Zilayi) Village, Khuzestan Province

Saeid Hoshmandi¹, Sara Allahyari-Beik^{2*}, and Alireza Saraee³

- 1) PhD Student, Department of Energy Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- 2) Associate Professor, Department of Physics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. *Corresponding Author Email Address: s.allahyaribeik@iau.ac.ir
- 3) Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Date of Submission: 2025/05/19

Date of Acceptance: 2025/08/03

Abstract

This study investigates the application of hybrid renewable energy systems (solar-wind) with energy storage technologies in Konjedkar (Zilaei) village in Khuzestan province, Iran. Considering the environmental challenges caused by fossil fuels and limited access to the national electricity grid in this area, hybrid systems can provide a sustainable solution for energy supply and natural resource conservation. In this research, using climate data and the village's energy consumption pattern, an optimal hybrid system was designed and simulated. The results showed that the optimized system including 87.41 kW of solar capacity, 100 kW of wind capacity, and 200 kWh of battery storage can provide 44.59% of the village's energy needs from renewable sources. This system, in addition to reducing greenhouse gas emissions by 44.59%, provides a levelized cost of energy (LCOE) of \$0.0023 per kWh, which is significantly lower than the \$0.1780 per kWh of conventional diesel systems. Despite the higher initial investment of the hybrid system (\$289,930.88 compared to \$15,000.00 for diesel), the payback period is calculated as 13.22 years, which is economically viable considering its 25-year lifetime. The technical analysis indicated 100% reliability in meeting the annual energy demand of 161484.81 kWh. The environmental assessment revealed a reduction of 57608.92 kg of CO₂ emissions per year compared to the diesel-only system. The study concludes that the proposed hybrid system offers a technically feasible, economically beneficial, and environmentally sound solution for electrifying rural areas like Konjedkar, promoting sustainable development and natural resource conservation.

Keywords: Energy storage, Konjedkar village, Natural resource conservation, Optimization, Renewable energy, Solar-wind hybrid system, Sustainable development.