



ارزیابی پتانسیل فنی - اقتصادی سیستم‌های برق خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی در استان گیلان

میرحامد حاکم زاده^۱، شهرام شریفی^۲، محمدرضا گلریز^۳، مریم حقیقی^۴، مرتضی کریمی^۵، سید جواد موسوی^۶ ✉

- ۱- پژوهشگر گروه مهندسی محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران
- ۲- استادیار، گروه مطالعات ناحیه‌ای، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران
- ۳- پژوهشگر گروه مهندسی محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران
- ۴- استادیار، گروه پایش منابع آب، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، گیلان، ایران
- ۵- پژوهشگر گروه پایش منابع آب، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، گیلان، ایران
- ۶- استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، گیلان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	با افزایش تقاضای انرژی، نیاز به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حرکت جهانی به سوی انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی را به گزینه‌ای مناسب برای تولید برق در استان گیلان تبدیل کرده است. با این حال، به دلیل شرایط اقلیمی خاص و محدودیت تابش خورشیدی در بخش قابل توجهی از سال، تاکنون مطالعه‌ای جامع با رویکرد فنی- اقتصادی برای ارزیابی کاربرد این سیستم‌ها در تأمین برق ساختمان‌های مسکونی منطقه انجام نشده است. این پژوهش با هدف ارزیابی امکان‌سنجی فنی و اقتصادی سیستم‌های خورشیدی در استان گیلان انجام شده است، تا پتانسیل آن‌ها را در تأمین انرژی پایدار، کاهش اثرات محیط‌زیستی و ارزیابی مقرون‌به‌صرفه بودن در بخش مسکونی بررسی کند. در این مطالعه از داده‌های اقلیمی ناسا و نرم‌افزار PVsyst برای شبیه‌سازی عملکرد سیستم‌ها در سه سناریو استفاده شده است: (۱) سیستم‌های منفصل از شبکه، (۲) سیستم‌های متصل به شبکه با باتری، و (۳) سیستم‌های متصل به شبکه بدون باتری. یافته‌ها نشان داد که سیستم‌های منفصل و متصل با باتری به دلیل هزینه بالای ذخیره‌سازی و تعرفه پایین خرید برق از شبکه، توجیه اقتصادی ندارند. در مقابل، سیستم‌های متصل به شبکه بدون باتری، با توجه به طول عمر بالا و هزینه‌های عملیاتی پایین‌تر، مقرون‌به‌صرفه هستند. در بین شهرستان‌های بررسی شده، شهرستان رودبار با تابش خورشیدی بهینه 2166 kWh/m^2 کیلووات ساعت بر مترمربع، بالاترین پتانسیل فنی و اقتصادی برای نصب سیستم‌های خورشیدی مسکونی را دارد. این یافته‌ها می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در گیلان و ارتقاء پایداری منطقه‌ای باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰	
کلید واژه‌ها: انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، سیستم‌های فتوولتائیک، ارزیابی فنی- اقتصادی، انتشار گازهای گلخانه‌ای.	



Assessment of the Techno-Economic Potential of Solar Power Systems in Residential Buildings in Gilan Province

Mir Hamed Hakem Zadeh¹, Shahram Sharifi², Mohammadreza Golriz³, Maryam Haghighi⁴, Morteza Karimi⁵, Seyed Javad Mousavi⁶✉

- 1- Researcher, Department of Environmental Engineering, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran.
- 2- Assistant Prof, Department of Regional Studies, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran.
- 3- Researcher, Department of Environmental Engineering, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran.
- 4- Assisntand Professor, Department of Water Monitoring, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran.
- 5- Researcher, Department of Water Monitoring, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran.
- 6- Assisntand Professor, Department of Environmental Engineering, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received:
2025/06/01

Accepted:
2025/07/20

Available online:
2025/10/12

Keywords:
Renewable energy,
Solar energy,
Photovoltaic
power plants,
Techno-economic
evaluation,
Greenhouse gas
emissions

Abstract

The growing energy demand, the need to reduce fossil fuel dependency, and the global transition to renewable energy have made solar photovoltaic (PV) systems a viable option for electricity generation in Gilan Province, Iran. However, due to the region's climatic conditions and limited solar radiation for much of the year, no comprehensive techno-economic study has assessed the feasibility of PV systems for residential electricity supply. This study evaluates the technical and economic viability of solar PV systems in Gilan, aiming to provide sustainable energy, reduce environmental impacts, and assess cost-effectiveness for residential applications. NASA climatic data and PVsyst software were used to simulate system performance under three scenarios: (1) off-grid systems, (2) grid-connected systems with battery storage, and (3) grid-connected systems without batteries. The findings indicate that off-grid systems and grid-connected systems with batteries are not economically feasible due to high storage costs and low electricity tariffs. In contrast, grid-connected systems without battery storage are economically viable, considering system longevity and lower operating expenses. Among the counties studied, Rudbar exhibits the highest technical and economic potential, with optimal solar radiation of 2166 kWh/m², making it the most suitable location for PV system deployment in residential buildings. These results provide valuable insights for policymakers and investors to promote renewable energy development in Gilan Province, contributing to regional sustainability and long-term energy independence.

✉ Corresponding author E-mail address: j.mosavi@acecr.ac.ir

مقدمه

در دنیای امروز، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و رشد جمعیت سبب شده است که تقاضا برای انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح جهانی به‌طور قابل‌توجهی بالا رود. بسیاری از کشورها، با توجه به شرایط اقلیمی و منابع طبیعی خود، به جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به‌جای سوخت‌های فسیلی روی آورده‌اند. در این میان، انرژی خورشیدی به‌دلیل دسترسی گسترده، ظرفیت بالا و اثرات محیط زیستی اندک، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. به همین سبب، کشورهای مختلف در حال توسعه زیرساخت‌های لازم برای بهره‌برداری بهینه از این منبع انرژی پایدار می‌باشند (حاکم‌زاده و همکاران، ۲۰۲۴). بخش ساختمان، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی، نقش مهمی در مصرف جهانی انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. این بخش، حدود ۳۰٪ از مصرف نهایی انرژی جهان و ۲۶٪ از انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۰، ۶۷٪ از تقاضای کلی انرژی مربوط به بخش مسکونی باشد، در حالی که سهم بخش غیرمسکونی تنها کمی بیش از ۳۳ درصد خواهد بود (فروسو و همکاران، ۲۰۲۴؛ ابوگادوره).^۴ با توجه به پژوهش‌های اخیر در ایران، حدود ۴۰٪ از انرژی کشور صرف گرمایش، سرمایش و روشنایی ساختمان‌ها می‌شود که بخش ساختمان را به یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی تبدیل کرده است. علی‌رغم تلاش‌های بسیار، کاهش مصرف انرژی در این بخش موفقیت چندانی نداشته و روند افزایشی آن همچنان نگران‌کننده است. تداوم این وضعیت، تبعات اقتصادی و محیط زیستی سنگینی به دنبال خواهد داشت (شعبانیان و همکاران، ۱۴۰۰). بهبود بهره‌وری انرژی و افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر از جمله اقداماتی هستند که می‌توانند در گذار به سوی ساختمان‌های پایدار و کاهش اثرات محیط زیستی نقش کلیدی ایفا کنند.

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، نقش مهمی در مدیریت تأمین انرژی دارد که در گذار به منابع انرژی تجدیدپذیر، به برجسته‌ترین منبع انرژی پایدار تبدیل و به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های کلیدی و دوستدار محیط زیست برای پاسخگویی به تقاضای روبه‌رشد انرژی مخصوصاً تأمین انرژی ساختمان‌ها ظاهر شده است (علی و همکاران، ۲۰۲۵؛ کارا و همکاران، ۲۰۲۵).^۵ در این میان سامانه‌های فتوولتائیک، که انرژی خورشید را مستقیماً به برق تبدیل می‌کنند، از جمله راهکارهای کلیدی در این زمینه هستند که با نصب در زاویه و جهت مناسب روی پشت‌بام و نمای ساختمان‌ها می‌تواند انرژی موردنیاز آن‌ها را تأمین کرده و با تولید انرژی پاک، اثرات محیط زیستی را کاهش داده و به پایداری انرژی کمک می‌کنند (واین و همکاران، ۲۰۲۴؛ طیبی چهره و همکاران، ۱۳۹۹).

ایران، با توجه به موقعیت جغرافیایی منحصربه‌فرد و داشتن میزان تابش خورشیدی بسیار مناسب که در برخی مناطق که هوای خشک‌تری دارند به ۵/۵ تا ۶/۵ کیلووات بر مترمربع می‌رسد، از پتانسیلی به‌مراتب بالاتر از میانگین جهانی برای بهره‌گیری از سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی برخوردار است (اطلس گرمایش جهانی، ۲۰۲۵؛ سادات و همکاران، ۲۰۲۱؛ پرهامفر و همکاران، ۲۰۲۵).^۶ از این رو، تحقیقات متعددی با هدف ارزیابی پتانسیل فتوولتائیک خورشیدی از منظر اقلیمی و زیرساختی در ایران، به شناسایی مناطق مناسب و عوامل کلیدی در توسعه نیروگاه‌های خورشیدی نظیر شدت تابش خورشیدی، میانگین دمای سالانه، فاصله از شبکه‌های انتقال برق، دسترسی به راه‌ها، ارتفاع، شیب زمین و کاربری اراضی، انجام شده که نشان می‌دهد که حدود ۱۸/۳۳ درصد از مساحت کشور برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی مناسب است (رحمانی و همکاران، ۲۰۲۱؛ جعفری و همکاران، ۲۰۲۰).^۸ با وجود این ظرفیت، پروژه‌های خورشیدی فتوولتائیک در مسیر دستیابی به انرژی پاک با چالش‌هایی مواجه هستند. بارانه‌های عظیم انرژی، هزینه‌های اولیه بالا، بازده محدود، تغییرات مداوم در قوانین حمایتی و نبود مکانیزم کارآمد توافق‌نامه خرید برق، عدم اطمینان در روندهای آینده بازار و پیشرفت‌های فناوری، نبود حمایت مالی کافی، آگاهی عمومی پایین و کمبود سیاست‌های تشویقی مؤثر، موانعی هستند که سرمایه‌گذاری در این حوزه را دشوار کرده‌اند. این عوامل باعث شده‌اند سهم انرژی خورشیدی در سبد انرژی کشور کمتر از ظرفیت بالقوه آن باشد و

³ Hakemzadeh et al., 2024

⁴ Frousoo et al., 2024; Abu Qadourah, 2022

⁵ Ali et al., 2025; Carrera et al., 2025

⁶ Yin et al., 2024

⁷ Sadat et al., 2021; Parhamfar et al., 2025; Global Solar Atlas, 2025

⁸ Jafari et al., 2020; Rahmani et al., 2021

توسعه این فناوری با سرعت کمتری پیشرفت کند (اسلامی و روازدر، ۱۹۹۳؛ آریانفر و همکاران^۹، ۲۰۲۰). بنابراین، با توجه به چالش ناترازی انرژی در ایران که ناشی از عواملی مانند افزایش مصرف، وابستگی بیش از حد به منابع فسیلی و زیرساخت‌های ناکافی و فرسوده است، اهمیت استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک بیش از پیش نمایان شده و ضرورت بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر حتی در مناطقی مانند گیلان، که ممکن است در نگاه اول برای استفاده از انرژی خورشیدی چندان مناسب به نظر نرسد را برجسته می‌کند (صیادی و همکاران، ۱۴۰۲).

هدف اصلی این پژوهش، امکان‌سنجی فنی و اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی شهرستان‌های استان گیلان با توجه به عوامل تأثیرگذار در به حداکثر رساندن عملکرد و خروجی انرژی این سیستم‌ها، از جمله فناوری سلول‌های خورشیدی، تابش خورشیدی، دمای محیط و سرعت باد است. استان گیلان، به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، از تنوع اقلیمی قابل‌توجهی برخوردار است که تحت تأثیر عوامل جغرافیایی و شرایط آب‌وهوایی قرار دارد. نزدیکی به دریا، اقلیمی مرطوب و معتدل را به این منطقه بخشیده و ویژگی‌های منحصر به فردی به آن داده است. اقلیم گیلان به طور کلی در سه دسته معتدل و مرطوب، نیمه‌گرمسیری و سرد تقسیم‌بندی می‌شود (فلاح قاله‌ری و همکاران، ۱۳۹۴). بارندگی فراوان و رطوبت بالای این استان، آن را به یکی از پربارش‌ترین مناطق ایران تبدیل کرده است. میانگین دما در گیلان بین ۱۰ تا ۱۷ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی معمولاً بین ۶۸ تا ۷۴ درصد است که نشان‌دهنده اقلیمی متعادل با فصول گرم و سرد مشخص است. مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه استان گیلان با میانگین تابش خورشیدی ۴/۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز در مقایسه با مناطق مرکزی و جنوبی ایران از تابش خورشیدی کمتری برخوردار است، نواحی جنوبی این استان دارای پتانسیل مناسبی برای استفاده از سیستم‌های خورشیدی است (حاکم زاده و همکاران، ۱۴۰۴). در این مطالعه، رویکردی تحلیلی مبتنی بر شبکه محاسباتی چندلایه توسعه داده شده تا عوامل و متغیرهای کلیدی مؤثر بر عملکرد فنی و اقتصادی این سیستم‌ها بررسی شوند. از طریق تحلیل‌های حساسیت، ارزیابی‌های انرژی و محیط زیستی و مطالعات اقتصادی، پتانسیل این سیستم‌ها در شرایط اقلیمی ویژه تعیین می‌شود. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان راهنمایی کاربردی برای پیاده‌سازی و بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های فتوولتائیک در گیلان و مناطق با آب و هوای مشابه به کار رود. تحلیل دقیق داده‌های مربوط به پتانسیل فنی و اقتصادی این سیستم‌ها و بررسی تأثیر عوامل محیطی مانند تابش خورشید، سرعت باد، رطوبت و دما، می‌تواند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در توسعه این نیروگاه‌ها و اتخاذ تصمیمات سرمایه‌گذاری بهتر در راستای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حفاظت از محیط زیست کمک کند.

مواد و روش‌ها

روش پژوهش

در این پژوهش، به منظور ارزیابی پتانسیل فنی-اقتصادی سیستم‌های برق خورشیدی ساختمان‌های مسکونی در آب و هوای استان گیلان، یک رویکرد تحلیلی به شرح زیر توسعه داده شد: (۱) تعیین شرایط آب و هوایی شهرهای استان گیلان، (۲) مدل سازی و شبیه سازی، (۳) تجزیه و تحلیل حساسیت، (۴) تجزیه و تحلیل انرژی و (۵) تجزیه و تحلیل اقتصادی،

تعیین شرایط آب و هوایی شهرهای استان گیلان

برای به دست آوردن تصویری دقیق و قابل اطمینان از الگوهای اقلیمی و تغییرات فصلی و به دنبال آن بررسی پتانسیل فنی-اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان‌های مسکونی استان گیلان، داده‌های مورد نیاز از پایگاه داده‌های اقلیمی سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا (ناسا) برای دوره‌ای پنج‌ساله از ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ استخراج شده است (ناسانف ۲۰۲۵)^{۱۰}. ناسا به‌عنوان یکی از معتبرترین منابع در حوزه علوم زمین و اقلیم، مجموعه‌ای گسترده از داده‌های اقلیمی را به صورت عمومی

⁹ Aryanfar et al., 2020

¹⁰ Nasa, 2025

ارائه می‌دهد که به دلیل دقت بالا، پوشش وسیع جغرافیایی و استفاده از روش‌های استاندارد در جمع‌آوری و پردازش اطلاعات، امکان تحلیل جامع و دقیق تغییرات اقلیمی را در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌کند. با تعیین مختصات جغرافیایی هر یک از شهرهای استان گیلان، داده‌های مربوط به هر منطقه به صورت جداگانه استخراج و سپس برای اطمینان از صحت و دقت اطلاعات، فرایندی شامل بررسی داده‌های ناقص، همگن‌سازی و در صورت نیاز، درونیایی انجام شده است. این مجموعه داده‌ها شامل اطلاعات جامع در مورد شرایط اقلیمی منطقه، میزان تابش خورشیدی، دما، رطوبت و سایر عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان‌های مسکونی است که به عنوان ورودی اصلی برای مدل‌سازی و تحلیل‌های آماری مورد استفاده قرار گرفته و نقش کلیدی در ارزیابی بهره‌وری این سیستم‌ها با توجه به الگوهای آب‌وهوایی و تغییرات محیطی ایفا می‌کند.

مدل سازی و شبیه‌سازی

در این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان‌های مسکونی استان گیلان، از نرم‌افزار PVsyst بهره گرفته شد که به دلیل دقت بالا در مدل‌سازی پارامترهای فنی و محیطی، یکی از پیشرفته‌ترین و معتبرترین ابزارهای تحلیل و طراحی سیستم‌های خورشیدی به شمار می‌رود. ابتدا، داده‌های مرتبط با موقعیت جغرافیایی شهرهای استان، شامل عرض و طول جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و شرایط اقلیمی نظیر دما، تابش خورشیدی و رطوبت، که پیش‌تر با دقت گردآوری شده بودند، در نرم‌افزار وارد شدند. این نرم افزار، با قابلیت‌های برجسته‌ای همچون محاسبه دقیق تابش خورشیدی کل، تابش مستقیم و پراکنده، تعیین زوایا و جهت‌گیری بهینه برای نصب پنل‌ها و تحلیل عملکرد سیستم در شرایط واقعی، امکان ارزیابی جامع و دقیقی از بازدهی سیستم‌های فتوولتائیک را در ساختمان‌های مسکونی فراهم می‌سازد. در فرآیند شبیه‌سازی، طراحی سیستم‌های خورشیدی بر اساس نیازهای مصرف انرژی و ظرفیت بهینه انجام گرفت. مدل‌های متنوع پنل‌ها و اینورترها با در نظر گرفتن راندمان و مشخصات فنی آن‌ها به دقت بررسی شدند. در این راستا، انتخاب نوع و تعداد پنل‌های خورشیدی، اینورترها و سایر تجهیزات موردنیاز، متناسب با شرایط اقلیمی منطقه و ویژگی‌های فنی آن‌ها صورت پذیرفت. در این مطالعه، پنل‌های مونوکریستالین به دلیل راندمان بالا (۱۷-۲۲٪) و عملکرد مطلوب در شرایط نور کم و ابری، به عنوان گزینه‌ای ایده‌آل برای اقلیم مرطوب و معتدل استان گیلان برگزیده شدند. این پنل‌ها در دماها و رطوبت بالا افت کارایی ناچیزی از خود نشان می‌دهند و با بهره‌مندی از پوشش مقاوم در برابر خوردگی، برای محیط‌های مرطوب بسیار مناسب‌اند. افزون بر این، راندمان بالای آن‌ها در فضاهای محدود و قابلیت شستشوی طبیعی توسط بارش‌های فراوان منطقه، کارایی و دوام سیستم را به طور قابل توجهی ارتقا می‌بخشد (حاکم زاده و همکاران، ۱۴۰۴). همچنین، با شبیه‌سازی زوایای نصب و جهت بهینه پنل‌ها، دریافت حداکثری تابش خورشیدی در طول سال مدنظر قرار گرفت. علاوه بر این، تأثیر خط افق و موانع احتمالی بر میزان تابش خورشیدی دریافتی در نرم‌افزار مدل‌سازی شد تا برآورد دقیقی از عملکرد واقعی سیستم حاصل شود. در نهایت، با استفاده از ابزارهای تحلیلی PVsyst، نتایج شبیه‌سازی شامل میزان انرژی تولیدی سالانه، بازده سیستم، تلفات انرژی و سایر شاخص‌های کلیدی استخراج و تحلیل شد.

بررسی عملکرد فنی نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی

در این پژوهش، ضریب عملکرد (CF) و نسبت عملکرد (PR) به عنوان دو شاخص کلیدی برای ارزیابی کارایی سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان‌های مسکونی استان گیلان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. CF میزان بهره‌برداری عملی از ظرفیت سیستم را نشان داده و نسبت انرژی تولیدی واقعی را به حداکثر انرژی قابل تولید در یک بازه زمانی مشخص بیان می‌کند. این شاخص تحت تأثیر عواملی نظیر موقعیت جغرافیایی، میزان تابش خورشیدی و ساعات آفتابی منطقه قرار دارد. PR به عنوان یکی از معیارهای مهم ارزیابی بهره‌وری سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان‌های مسکونی، بیانگر میزان توان عملیاتی سیستم نسبت به توان نظری آن است. این شاخص با در نظر گرفتن تمامی تلفات ممکن، از جمله تلفات تبدیل انرژی، تلفات ناشی از افزایش دما، اثرات سایه و آلودگی سطح پنل‌ها، عملکرد واقعی سیستم را مشخص می‌کند. محاسبه مقادیر CF و PR، درک جامعی از بهره‌وری کلی سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان‌های مسکونی ارائه داده و تأثیر شرایط محیطی و طراحی بر

عملکرد آن‌ها را مشخص می‌سازد. در این پژوهش، داده‌های مربوط به انرژی تولیدی، تابش خورشیدی و سایر پارامترهای فنی به‌منظور محاسبه این شاخص‌ها به کار گرفته شده‌اند تا تحلیل دقیق و جامعی از عملکرد سیستم ارائه شود. روابط مربوط به این دو شاخص به‌صورت زیر تعریف می‌شوند (حاکم زاده و همکاران، ۱۴۰۴):

$$CF = \frac{E_{grid}}{T \cdot E_{nom}} \quad (1)$$

$$PR = \frac{E_{Grid}}{\eta_{module} \cdot A_c \cdot G_T} \quad (2)$$

ارزیابی صرفه‌جویی انرژی و تأثیرات محیط زیستی نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی

شاخص صرفه‌جویی در مصرف انرژی تجدیدناپذیر (Qsaved) و شاخص کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG reduced) به عنوان دو معیار اساسی برای سنجش عملکرد نیروگاه‌های فتوولتائیک از جنبه کاهش مصرف انرژی اولیه و مزایای محیط زیستی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. بررسی این دو شاخص، میزان اثربخشی نیروگاه‌های خورشیدی در کاهش پیامدهای منفی محیط زیستی و بهینه‌سازی مصرف انرژی را به‌طور جامع نشان می‌دهد. نتایج این تحلیل، درک بهتری از نقش نیروگاه‌های خورشیدی در حرکت به سمت توسعه پایدار ارائه می‌دهد. شاخص Qsaved مقدار انرژی تجدیدناپذیر صرفه‌جویی شده را از طریق بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر مشخص می‌کند که می‌توان آن را بر اساس رابطه زیر محاسبه کرد (نایما رشید و همکاران، ۲۰۲۴):^{۱۱}

$$Q_{saved} = E_{grid} \times C_{fuel} \quad (3)$$

در این معادله C_{fuel} ، ضریب تبدیل مخصوص سوخت (کیلووات ساعت به ازای هر واحد سوخت جایگزین شده) می‌باشد که در محاسبات برای زغال‌سنگ در حدود ۱/۲ تا ۱/۵ کیلووات ساعت بر کیلوگرم (بسته به نوع زغال سنگ متغیر است)، گاز طبیعی در حدود ۳/۶ تا ۴ کیلووات ساعت بر متر مکعب، گازوئیل یا نفت کوره در حدود ۱۰ تا ۱۲ کیلووات ساعت بر لیتر در نظر گرفته می‌شود (IPCC, 2006).

از سوی دیگر، GHG reduced میزان کاهش انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) و سایر گازهای آلاینده را در نتیجه جایگزینی سیستم‌های خورشیدی به‌جای سیستم‌های متداول مبتنی بر سوخت‌های فسیلی بررسی می‌کند. این شاخص از طریق ضرب مقدار کاهش مصرف انرژی اولیه در ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدشده از سوخت‌های فسیلی به دست می‌آید (یونگ- ساب آن و همکاران، ۲۰۲۳):^{۱۲}

$$GHG_{reduced} = E_{grid} \times EF_{grid} \quad (4)$$

در این معادله EF_{grid} ، ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای به ازای هر کیلووات ساعت تولید انرژی الکتریکی می‌باشد که در محاسبات برای زغال سنگ در حدود (kg CO₂/kWh) ۰/۹ تا ۱/۲، گاز طبیعی در حدود ۰/۴ تا ۰/۶ (kg CO₂/kWh)، گازوئیل یا نفت کوره در حدود ۰/۷ تا ۰/۹ (kg CO₂/kWh) در نظر گرفته می‌شود (سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، ۲۰۲۳).^{۱۳}

ارزیابی اقتصادی نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی

برای بررسی اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان‌های مسکونی، از شاخص‌های کلیدی مانند دوره بازگشت سرمایه (PBP) و میزان سودآوری سیستم (SP) استفاده شده است. دوره بازگشت سرمایه، مدت زمان لازم برای جبران هزینه‌های

¹¹ Nayeema Rashid et al., 2024

¹² Young-sub An et al., 2023

¹³ EPA, 2023

اولیه سرمایه‌گذاری از طریق کاهش هزینه‌های انرژی را نشان می‌دهد. این شاخص به عنوان یکی از معیارهای اصلی اقتصادی، تأثیر هزینه‌های اولیه، میزان تولید انرژی و نرخ تعرفه خرید برق را در تحلیل اقتصادی سیستم‌های خورشیدی در ساختمان-های مسکونی مشخص می‌کند. معادله محاسبه دوره بازگشت سرمایه به صورت زیر تعریف می‌شود (حاکم‌زاده و همکاران، ۲۰۲۲):^{۱۴}

$$PBP = \frac{\ln\left(1 + \frac{C_{inv}i}{P_i Q_{save}}\right)}{\ln(1+i)} \quad (5)$$

در نهایت، ارزش خالص فعلی (NPV) که تفاوت بین هزینه اولیه سرمایه‌گذاری و جریان‌های درآمدی حاصل از سرمایه‌گذاری در یک دوره زمانی مشخص را محاسبه و میزان سودآوری پروژه را با توجه به ارزش زمانی پول مشخص می‌سازد. NPV مثبت بیانگر امکان‌پذیری اقتصادی پروژه و سودآوری سرمایه‌گذاری است، در حالی که NPV منفی نشان می‌دهد، پروژه از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. به کمک این شاخص‌ها می‌توان به طور جامع عملکرد اقتصادی نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی را ارزیابی کرده و میزان سودآوری و بازدهی سرمایه‌گذاری را تحلیل نمود. این رویکرد امکان مقایسه میان طرح‌های مختلف و اتخاذ تصمیم‌های بهتر برای سرمایه‌گذاری در سیستم‌های خورشیدی را فراهم می‌سازد. NPV به صورت زیر محاسبه می‌شود (اولاتایو و همکاران، ۲۰۱۸):^{۱۵}

$$NPV = -C_{inv} + \sum_{n=1}^1 \frac{R_n}{(1+i)^n} \quad (6)$$

یافته های پژوهش

شرایط اقلیمی استان گیلان

تنوع اقلیمی و جغرافیایی استان گیلان تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان‌های مسکونی دارد. این پژوهش پارامترهای کلیدی نظیر تابش خورشیدی، دما، رطوبت نسبی و سرعت باد را بررسی کرده است. بر اساس جدول ۱، رودبار با تابش کل سالانه 1861 kWh/m^2 و تابش پراکنده 598 kWh/m^2 بالاترین تابش کل و کمترین تابش پراکنده را به دلیل موقعیت جغرافیایی و کاهش پوشش ابری دارد، در حالی که بندر انزلی با تابش کل 1384 kWh/m^2 و تابش پراکنده 816 kWh/m^2 کمترین تابش کل و بیشترین تابش پراکنده را ثبت کرده است. سایر مناطق استان ۴۰ تا ۶۰ درصد تابش پراکنده دارند که در طراحی سیستم‌های فتوولتائیک باید مدنظر قرار گیرد. دمای محیط در گیلان بین ۱۰ درجه سانتی‌گراد (تالش) تا ۱۷ درجه سانتی‌گراد (بندر انزلی) متغیر است. دماهای بالاتر در شهرهایی مانند بندر انزلی و ماسال با افزایش مقاومت الکتریکی سلول‌ها، راندمان پنل‌های خورشیدی را کاهش می‌دهد، در حالی که دماهای پایین‌تر در تالش (10°C)، آستارا (11°C) و رودبار (13°C) شرایط مساعدتری برای عملکرد بهینه فراهم می‌کنند. رطوبت نسبی، که بین ۶۸ تا ۷۴ درصد متغیر است، چالش دیگری است که می‌تواند کارایی سیستم را کاهش داده و هزینه‌های نگهداری را افزایش دهد. سرعت باد، به عنوان عاملی مؤثر بر خنک‌سازی پنل‌ها، در مناطق مختلف بین $1/51 \text{ m/s}$ تا $3/14 \text{ m/s}$ متغیر است. جدول ۱ نشان می‌دهد که شهرهایی مانند آستانه اشرفیه ($3/14 \text{ m/s}$)، بندر انزلی ($2/30 \text{ m/s}$) و رودبار ($2/03 \text{ m/s}$) با سرعت باد بالاتر، از خنک‌سازی طبیعی و راندمان بهتر برخوردارند، اما ممکن است نیاز به سازه‌های مقاوم‌تر داشته باشند. در مقابل، آستارا ($1/51 \text{ m/s}$)، تالش ($1/61 \text{ m/s}$) و املش ($1/71 \text{ m/s}$) با سرعت باد کمتر، در روزهای گرم با کاهش خنک‌سازی طبیعی مواجه شده و دمای پنل‌ها افزایش می‌یابد. این عوامل در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک برای تأمین انرژی ساختمان‌های مسکونی در گیلان باید به دقت لحاظ شوند.

¹⁴ Hakemzadeh et al., 2022

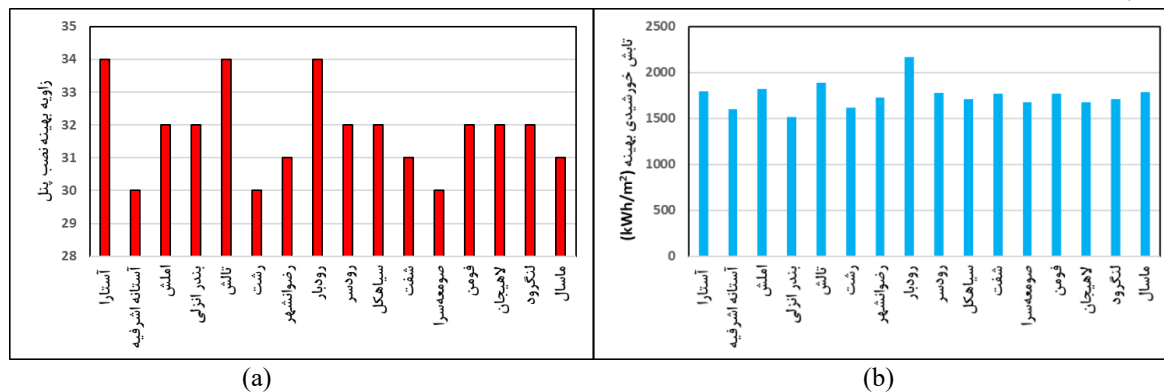
¹⁵ Olatayo et al., 2018

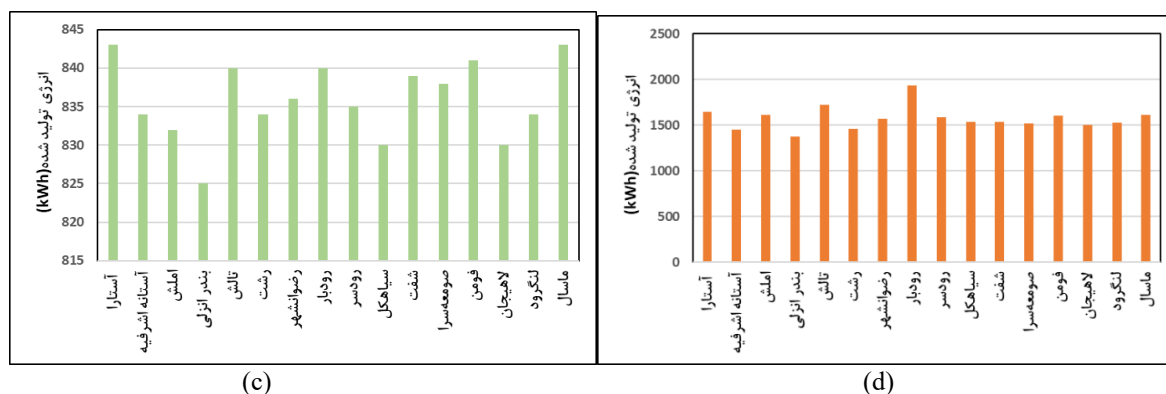
جدول (۱) شرایط اب و هوایی شهرستان های استان گیلان.

ردیف	شهرستان	تابش خورشیدی (kWh/m ²)	تابش پراکنده خورشیدی (kWh/m ²)	دمای محیط (°C)	رطوبت نسبی (%)	سرعت باد (m/s)
۱	آستارا	۱۵۵۹	۷۴۴	۱۱	۷۴	۱/۵۱
۲	آستانه اشرفیه	۱۴۴۹	۷۹۲	۱۷	۷۳	۳/۱۵
۳	املش	۱۶۰۵	۶۹۵	۱۵	۷۳	۱/۷۱
۴	بندر انزلی	۱۳۸۴	۸۱۶	۱۷	۷۳	۲/۳۰
۵	تالش	۱۶۴۳	۶۶۷	۱۰	۷۴	۱/۶۲
۶	رشت	۱۴۶۰	۷۸۸	۱۶	۷۳	۲/۳۰
۷	رضوانشهر	۱۵۴۰	۱۹۰	۱۶	۶۸	۲/۳۰
۸	رودبار	۱۸۶۱	۵۹۸	۱۳	۷۳	۲/۰۴
۹	رودسر	۱۵۷۰	۶۸۶	۱۶	۷۳	۱/۷۱
۱۰	سیاهکل	۱۵۲۳	۶۹۵	۱۵	۷۰	۱/۷۱
۱۱	شفت	۱۵۱۸	۷۴۰	۱۵	۷۳	۱/۷۷
۱۲	صومعه سرا	۱۵۰۳	۸۰۰۲	۱۶	۷۰	۲/۳۰
۱۳	فومن	۱۵۶۳	۷۳۳	۱۵	۷۳	۱/۷۷
۱۴	لاهیجان	۱۴۹۳	۶۷۵	۱۵	۷۳	۱/۷۱
۱۵	لنگرود	۱۵۱۶	۶۷۹	۱۵	۷۳	۱/۷۱
۱۶	ماسال	۱۵۸۴	۸۰۳	۱۶	۷۳	۲/۳۰

عملکرد سیستم های انرژی فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان

شکل ۲ مربوط به بررسی عملکرد فنی سیستم های انرژی فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان است. این جدول شامل اطلاعات مربوط به زاویه بهینه پنل، تابش خورشیدی بهینه و انرژی تولید شده در سیستم های متصل به شبکه و منفصل از شبکه در شهرستان های مختلف این استان است. بر اساس داده ها بدست آمده، رودبار با تابش بهینه 2166 kWh/m^2 و تولید 1936 kWh/year در سیستم متصل به شبکه، بالاترین عملکرد را دارد. در حالی که بندر انزلی با تابش kWh/m^2 1515 و تولید 1375 kWh/year کمترین است. زاویه بهینه پنل ها بین 30 تا 34 درجه است. در سیستم های منفصل از شبکه، تولید انرژی بین 825 kWh/year تا 843 نوسان دارد که به دلیل محدودیت های ظرفیت ذخیره سازی و طراحی این سیستم ها است.





شکل (۲) بررسی عملکرد فنی سیستم‌های انرژی فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان (a) زاویه بهینه نصب پنل، (b) میزان تابش خورشیدی بهینه، (c) انرژی تولید شده در سیستم متصل از شبکه و (d) انرژی تولید شده در سیستم متصل به شبکه.

جدول ۳ عملکرد سیستم‌های خورشیدی متصل و منفصل از شبکه را در ۱۶ شهرستان استان گیلان با بررسی شاخص‌های افت توان، انرژی هدررفته، ضریب عملکرد (CF) و نسبت عملکرد (PR) تحلیل می‌کند. ضریب عملکرد (CF) در سیستم‌های متصل به شبکه بین ۱۴/۲۷٪ (بندر انزلی) تا ۲۰/۰۹٪ (رودبار) و در سیستم‌های متصل بین ۸/۵۶٪ (بندر انزلی) تا ۸/۷۴٪ (آستارا) متغیر است. نسبت عملکرد (PR) در سیستم‌های متصل از ۷۸/۶۴٪ (رودسر) تا ۸۲/۲۷٪ (لاهیجان) و در سیستم‌های متصل از ۳۴/۳٪ (رودبار) تا ۴۷/۶٪ (بندر انزلی) تغییر می‌کند، که نشان‌دهنده برتری کارایی سیستم‌های متصل است. هدررفت انرژی در سیستم‌های متصل بین ۳۷/۱۷٪ (بندر انزلی) تا ۵۳/۱۵٪ (رودبار) با میانگین ۴۳/۵۳٪ است. رودبار به دلیل تابش بالای سالانه (2166 kWh/m^2) انرژی بیشتری تولید می‌کند که از ظرفیت باتری‌ها فراتر می‌رود، درحالی‌که بندر انزلی با تابش کمتر (1515 kWh/m^2) هدررفت کمتری دارد. افت توان ناشی از دمای ماژول بین ۴/۴۸٪ (آستارا) تا ۶/۷۵٪ (رودبار) با میانگین ۵/۸۱٪ متغیر است. آستارا به دلیل دمای پایین‌تر کمترین افت را دارد، اما رودبار با تابش و دمای بالا افت بیشتری نشان می‌دهد. افت توان ناشی از موانع طبیعی از ۰/۳۷٪ (بندر انزلی) تا ۱/۸۷٪ (املش و رودبار) و افت ناشی از سطح تابش از ۰/۴۶٪ (رودبار) تا ۰/۹۵٪ (بندر انزلی) متغیر است. بندر انزلی به دلیل شرایط ابری و رطوبت بالا افت تابش بیشتری دارد، درحالی‌که رودبار با تابش بهینه و شرایط جوی مساعد، عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. انتخاب زاویه بهینه پنل (۳۰-۳۴ درجه) و مکان‌یابی مناسب می‌تواند افت تابش را کاهش دهد، اما دما تأثیر بیشتری بر کارایی دارد. در مناطق مرطوب مانند بندر انزلی، بهینه‌سازی جهت‌گیری پنل‌ها برای افزایش بهره‌وری سیستم‌های خورشیدی ضروری است.

جدول (۳) بررسی شاخص‌های افت توان، انرژی هدررفته، ضریب عملکرد و نسبت عملکرد سیستم‌های انرژی فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان.

ردیف	شهرستان	هدر رفت انرژی در سیستم منفصل از شبکه	افت توان (%)			سیستم متصل به شبکه		
			به دلیل موانع طبیعی	به دلیل سطح تابش	به دلیل دما ماژول	PR (%)	CF (%)	
۱	آستارا	۴۵/۵	۰/۶۴	۰/۶۹	۴/۴۸	۸/۷۴	۴۱/۱	۱۷/۱۰
۲	آستانه اشرفیه	۳۹/۴	۰/۴۷	۰/۸۷	۵/۷۴	۸/۶۶	۴۵/۶	۱۵/۰۲
۳	املش	۴۵/۱	۱/۸۷	۰/۶۹	۶/۳۴	۸/۶۳	۴۰/۶	۱۶/۷۵
۴	بندر انزلی	۳۷/۱۷	۰/۳۷	۰/۹۵	۵/۲۵	۸/۵۶	۴۷/۶	۱۴/۲۷
۵	تالش	۴۷/۷۳	۱/۶۴	۰/۶۲	۴/۶۸	۸/۷۲	۳۹/۳	۱۷/۸۴
۶	رشت	۳۹/۸۷	۰/۶۴	۰/۸۴	۵/۸	۸/۶۵	۴۵/۱	۱۵/۱۵
۷	رضوانشهر	۴۳/۵۱	۰/۵۸	۰/۷۴	۵/۸۹	۸/۶۸	۴۲/۳	۱۶/۳۶
۸	رودبار	۵۳/۱۵	۱/۸۷	۰/۴۶	۶/۷۵	۸/۷۱	۳۴/۳	۲۰/۰۹

۷۸/۶۴	۱۶/۵۱	۴۱/۳	۸/۶۶	۶/۳۳	۰/۷	۰/۸۵	۴۴/۱۹	رودسر	۹
۷۸/۸۸	۱۵/۹۶	۴۲/۶	۸/۶۱	۶/۰۵	۰/۷۶	۱/۰۸	۴۲/۸۵	سیاهکل	۱۰
۷۸/۹۵	۱۵/۹۱	۴۳/۲	۸/۷۱	۵/۹۱	۰/۷۶	۰/۸۵	۴۲/۰۷	شفت	۱۱
۷۹/۲۷	۱۵/۷۳	۴۳/۸	۸/۷۰	۵/۷۲	۰/۷۹	۰/۷۱	۴۱/۶۳	صومعه سرا	۱۲
۷۹/۳۳	۱۶/۶۰	۴۱/۷	۸/۷۳	۵/۹۴	۰/۷۱	۰/۷۹	۴۴/۲۹	فومن	۱۳
۸۲/۲۷	۱۵/۶۰	۴۵/۴	۸/۶۱	۶/۰۶	۰/۷۹	۰/۵	۴۱/۵۸	لاهیجان	۱۴
۷۸/۸۰	۱۵/۸۸	۴۲/۹	۸/۶۵	۶/۱۸	۰/۷۱	۱/۰۴	۴۲/۳۸	لنگرود	۱۵
۷۹/۳۶	۱۶/۷۵	۴۱/۵	۸/۷۵	۵/۸۶	۰/۶۹	۱/۰۴	۴۴/۵۸	ماسال	۱۶

ارزیابی تأثیرات محیط زیستی سیستم‌های انرژی فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان

جدول ۴ به بررسی کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی (گازوئیل، گاز طبیعی و زغال سنگ) و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) در دو سیستم نوع فتوولتائیک خورشیدی، یعنی سیستم متصل به شبکه و سیستم منفصل از شبکه، در شهرستان‌های مختلف استان گیلان می‌پردازد. بر اساس جدول، در هر دو سیستم و در تمام شهرستان‌ها، مقدار کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از صرفه‌جویی در مصرف زغال سنگ به دلیل ضریب انتشار بالاتر، به طور قابل توجهی بیشتر از گازوئیل و گاز طبیعی است. همچنین، نسبت صرفه‌جویی سوخت به کاهش گازهای گلخانه‌ای در مناطق مختلف تقریباً یکنواخت است. نتایج نشان می‌دهد که در سیستم متصل به شبکه، بیشترین صرفه‌جویی در گازوئیل در رودبار با ۱۹۴ لیتر و کاهش ۱۳۵۵ کیلوگرم گاز گلخانه‌ای دیده می‌شود، که با تولید بالای انرژی در این منطقه همخوانی دارد. در مقابل، بندر انزلی با ۱۳۸ لیتر

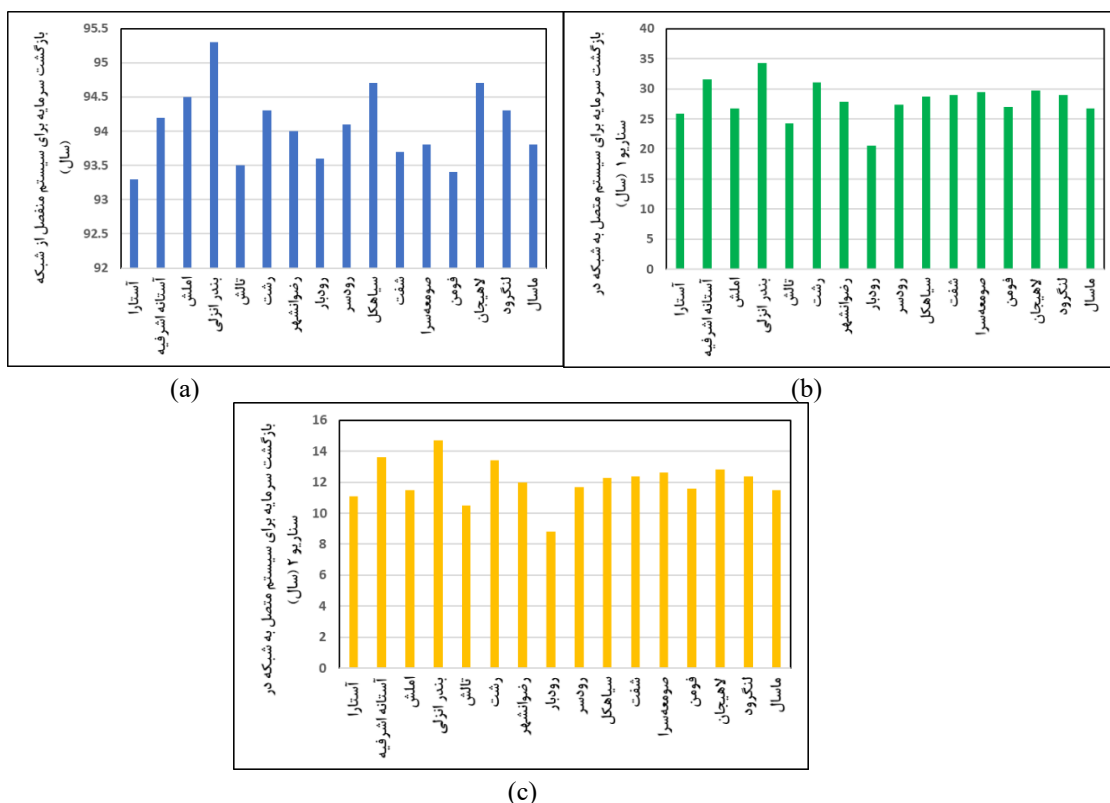
جدول (۴) ارزیابی تأثیرات محیط زیستی سیستم‌های انرژی فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان.

گازوئیل		گاز طبیعی				زغال سنگ				شهرستان	ردیف		
GHG (کیلوگرم)		Fsaved (لیتر)		GHG (کیلوگرم)		Fsaved (لیتر)		GHG (کیلوگرم)				Fsaved (لیتر)	
سیستم متصل به شبکه	سیستم منفصل از شبکه	سیستم متصل به شبکه	سیستم منفصل از شبکه	سیستم متصل به شبکه	سیستم منفصل از شبکه	سیستم متصل به شبکه	سیستم منفصل از شبکه	سیستم متصل به شبکه	سیستم منفصل از شبکه	سیستم متصل به شبکه	سیستم منفصل از شبکه		
۱۱۵۴	۵۹۰	۱۶۵	۸۴	۶۵۹	۳۳۷	۴۳۴	۲۲۲	۱۴۸۳	۷۵۸	۱۲۶۸	۶۴۸	آستارا	۱
۱۰۱۳	۵۸۴	۱۴۵	۸۳	۵۷۹	۳۳۴	۳۸۱	۲۲۰	۱۳۰۳	۷۵۱	۱۱۱۳	۶۴۲	آستانه اشرفیه	۲
۱۱۳۰	۵۸۲	۱۶۱	۸۳	۶۴۵	۳۳۳	۴۲۵	۲۱۹	۱۴۵۲	۷۴۹	۱۲۴۱	۶۴۰	املش	۳
۹۶۳	۵۷۷	۱۳۷	۸۲	۵۵۰	۳۳۰	۳۶۲	۲۱۷	۱۲۳۸	۷۴۲	۱۰۵۸	۶۴۳	بندر انزلی	۴
۱۲۰۳	۵۸۸	۱۷۲	۸۴	۶۸۷	۳۳۶	۴۵۲	۲۲۱	۱۵۴۷	۷۵۶	۱۳۲۲	۶۴۶	تالش	۵
۱۰۲۲	۵۸۳	۱۴۶	۸۳	۵۸۴	۳۳۳	۳۸۴	۲۱۹	۱۳۱۴	۷۵۰	۱۱۲۳	۶۴۱	رشت	۶
۱۰۹۷	۵۸۵	۱۵۷	۸۴	۶۲۷	۳۳۵	۴۱۲	۲۲۰	۱۴۱۰	۷۵۳	۱۲۰۵	۶۴۳	رضوانشهر	۷
۱۳۵۵	۵۸۸	۱۹۴	۸۴	۷۷۴	۳۳۶	۵۱۰	۲۲۱	۱۷۴۳	۷۵۶	۱۴۸۹	۶۴۶	رودبار	۸
۱۱۱۳	۵۸۴	۱۵۹	۸۳	۶۳۶	۳۳۴	۴۱۹	۲۲۰	۱۴۳۱	۷۵۱	۱۲۲۳	۶۴۲	رودسر	۹
۱۰۷۶	۵۸۱	۱۵۴	۸۳	۶۱۵	۳۳۲	۴۰۵	۲۱۸	۱۳۸۴	۷۴۷	۱۱۸۳	۶۳۸	سیاهکل	۱۰
۱۰۷۳	۵۸۷	۱۵۳	۸۴	۶۱۳	۳۳۶	۴۰۳	۲۲۱	۱۳۷۹	۷۵۵	۱۱۷۹	۶۴۶	شفت	۱۱
۱۰۶۱	۵۸۷	۱۵۲	۸۴	۶۰۶	۳۳۵	۳۹۹	۲۲۱	۱۳۶۴	۷۵۵	۱۱۶۶	۶۴۵	صومعه سرا	۱۲
۱۱۲۰	۵۸۹	۱۶۰	۸۴	۶۴۰	۳۳۷	۴۲۱	۲۲۱	۱۴۴۰	۷۵۷	۱۲۳۱	۶۴۷	فومن	۱۳
۱۰۵۳	۵۸۱	۱۵۰	۸۳	۶۰۱	۳۳۲	۳۹۶	۲۱۸	۱۳۵۳	۷۴۷	۱۱۵۷	۶۳۸	لاهیجان	۱۴
۱۰۷۱	۵۸۴	۱۵۳	۸۳	۶۱۲	۳۳۳	۴۰۳	۲۱۹	۱۳۷۷	۷۵۰	۱۱۷۷	۶۴۱	لنگرود	۱۵
۱۱۳۰	۵۹۰	۱۶۱	۸۴	۶۴۶	۳۳۷	۴۲۵	۲۲۲	۱۴۵۳	۷۵۹	۱۲۴۲	۶۴۹	ماسال	۱۶

صرفه‌جویی و ۹۶۳ کیلوگرم کاهش GHG کمترین مقدار دارد. برای گاز طبیعی و زغال‌سنگ نیز الگوی مشابهی مشاهده می‌شود، رودبار با ۵۱۰ مترمکعب و ۱۴۸۹ کیلوگرم صرفه‌جویی به ترتیب، و کاهش ۷۷۴ و ۱۷۴۳ کیلوگرم GHG، پیش‌تاز است. در سیستم منفصل از شبکه، مقادیر صرفه‌جویی و کاهش GHG تقریباً نصف سیستم متصل به شبکه است، که به دلیل تولید محدودتر (۸۴۳-۸۲۵ kWh/year) و وابستگی به ذخیره‌سازی است. این داده‌ها نشان می‌دهد که سیستم متصل به شبکه تأثیر بیشتری در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و آلودگی محیط زیستی، به‌ویژه در مناطقی با پتانسیل بالای تولید انرژی دارد.

ارزیابی شاخص‌های اقتصادی احداث نیروگاه‌های خورشیدی در استان گیلان

شکل ۵ و جدول ۶، به بررسی دوره بازگشت سرمایه (PBP) و ارزش خالص فعلی (NPV) برای سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی در سه حالت مختلف در شهرستان‌های استان گیلان می‌پردازد: سیستم منفصل از شبکه، سیستم متصل به شبکه در سناریو ۱ (با باتری و تزریق برق مازاد به شبکه) و سیستم متصل به شبکه در سناریو ۲ (بدون باتری و، تزریق کامل انرژی به شبکه و تأمین انرژی از شبکه در زمان مورد نیاز). بر اساس داده‌های بدست آمده، برای سیستم‌های منفصل از شبکه، دوره بازگشت سرمایه بسیار طولانی‌تر است و بین ۹۳/۶ سال (رودبار) تا ۹۵/۳ سال (بندر انزلی) متغیر است، که نشان‌دهنده هزینه‌های بالای سیستم ذخیره‌سازی انرژی است. سیستم‌های منفصل از شبکه به دلیل وابستگی کامل به باتری و عدم اتصال به شبکه، برای مناطق شهری یا نزدیک به شبکه عملاً غیراقتصادی هستند، اما ممکن است در مناطق دورافتاده کاربرد داشته باشند. در سناریو ۱، به علت در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌سازی انرژی، دوره بازگشت به طور متوسط حدود دو برابر سناریو ۲ می‌باشد. حذف باتری در سناریو ۲ توجیه‌پذیری اقتصادی را به‌ویژه در مناطقی مانند رودبار، افزایش می‌دهد، در حالی که باتری در سناریو ۱ به دلیل هزینه‌ها و محدودیت ذخیره‌سازی، توجیه اقتصادی را کاهش می‌دهد. کوتاه‌ترین دوره بازگشت سرمایه در این سناریو برای شهرستان رودبار با ۸/۸ سال بدست آمده است. در مقابل، بندر انزلی با ۱۴/۷ سال، طولانی‌ترین دوره بازگشت را در میان سیستم‌های متصل به شبکه نشان می‌دهد.



جدول (۵) دوره بازگشت سرمایه سیستم‌های انرژی فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان (a) منفصل از شبکه، (b) متصل به شبکه در سناریو ۱، (c) متصل به شبکه در سناریو ۲.

در جدول ۶ ارزش خالص فعلی به میلیون ریال بیان شده و نشان‌دهنده سودآوری اقتصادی پروژه پس از کسر هزینه‌های اولیه و عملیاتی از درآمدهای تنزیل‌شده در طول عمر پروژه است. بر اساس داده‌ها، در سناریو ۲، حذف باتری هزینه‌های اولیه و نگهداری را کاهش داده و تمام انرژی تولیدی به شبکه فروخته می‌شود، که منجر به NPV مثبت در همه مناطق می‌شود. بالاترین NPV در این سناریو برای شهرستان رودبار با ۶۸۰ میلیون ریال ثبت شده که با تولید بالای انرژی (kWh/year) (۱۹۳۶) همخوانی دارد. در مقابل، بندرانزلی با ۲۵۹ میلیون ریال کمترین NPV را در سناریو ۲ دارد که با تولید پایین‌تر (۱۳۷۵ kWh/year) و دوره بازگشت طولانی‌تر (۱۴/۷ سال) سازگار است. در سناریو ۱، اکثر مناطق NPV منفی دارند، به جز رودبار (۱۸۹ میلیون ریال) و تالش (۲۵ میلیون ریال)، که نشان‌دهنده هزینه‌های بالای باتری و کاهش سودآوری است. سیستم‌های منفصل از شبکه به دلیل وابستگی کامل به باتری و عدم اتصال به شبکه در تمامی شهرستان‌ها NPV منفی و بسیار پایین (بین ۶۳۸ تا ۶۳۳ میلیون ریال) دارند، که نشان‌دهنده غیراقتصادی بودن این سیستم‌ها در شرایط فعلی است. این جدول تأیید می‌کند که سناریو ۲ بهترین گزینه سرمایه‌گذاری است.

جدول (۶) ارزش خالص فعلی سیستم‌های انرژی فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان

ردیف	شهرستان	منفصل از شبکه (میلیون ریال)	متصل به شبکه در سناریو ۱ (میلیون ریال)	متصل به شبکه در سناریو ۲ (میلیون ریال)
۱	آستارا	-۶۳۳	-۲۹	۴۶۴
۲	آستانه اشرفیه	-۶۲۵	-۱۷۵	۳۱۳
۳	املش	-۶۲۶	-۵۰	۴۳۸
۴	بندر انزلی	-۶۲۸	-۲۲۵	۲۵۹
۵	تالش	-۶۳۴	۲۵	۵۱۷
۶	رشت	-۶۳۵	-۱۶۵	۳۲۳
۷	رضوانشهر	-۶۳۵	-۸۷	۴۰۳
۸	رودبار	-۶۳۴	۱۸۹	۶۸۰
۹	رودسر	-۶۳۵	-۶۸	۴۲۱
۱۰	سیاهکل	-۶۳۶	-۱۰۵	۳۸۱
۱۱	شفث	-۶۳۴	-۱۱۴	۳۷۷
۱۲	صومعه‌سرا	-۶۳۴	-۱۲۶	۳۶۵
۱۳	فومن	-۶۳۳	-۶۴	۴۲۷
۱۴	لاهیجان	-۶۳۶	-۱۳۱	۳۵۵
۱۵	لنگرود	-۶۳۵	-۱۱۳	۳۷۵
۱۶	ماسال	-۶۳۳	-۵۴	۴۳۹

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک ارزیابی جامع بر روی پتانسیل فنی- اقتصادی نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی و تأثیر آن‌ها در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در شرایط اقلیمی استان گیلان انجام شد. در این تحقیق از نرم‌افزار PVsyst و داده‌های آب و هوای پایگاه داده اقلیمی ناسا برای تحلیل پارامتری، شبیه‌سازی عملکرد و بهینه‌سازی این نیروگاه‌ها استفاده شد. سپس، پتانسیل فنی-اقتصادی محیط زیستی سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی برای تأمین برق موردنیاز در ساختمان مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد:

تنوع اقلیمی گیلان بر عملکرد نیروگاه‌های خورشیدی تأثیر دارد. رودبار و بندر انزلی به ترتیب با 1861 kWh/m^2 و 1384 kWh/m^2 بالاترین و کمترین تابش را دارند. میزان تابش پراکنده (۴۰-۶۰٪) در طراحی سیستم‌ها تأثیر گذار است. دمای سالانه از 10°C (تالش) تا 17°C (بندر انزلی) متغیر است و دمای بالا راندمان پنل‌ها را کاهش می‌دهد. رطوبت نسبی از ۶۸٪

- (رودبار) تا ۰.۷۴٪ (تالش و آستارا) و سرعت باد از ۱/۵۱ m/s (آستارا) تا ۳/۱۴ m/s (آستانه اشرفیه) است. باد در آستانه اشرفیه و بندر انزلی به خنک‌سازی کمک می‌کند، اما نیاز به سازه‌های مقاوم دارد. زاویه بهینه پنل‌های خورشیدی در استان گیلان بین ۳۰ تا ۳۴ درجه است که با عرض جغرافیایی منطقه سازگار بوده اما به دلیل شرایط اقلیمی کمی کمتر از مقدار تئوریک است. تابش خورشیدی در رودبار با ۲۱۶۶ kWh/m² بالاترین و در بندر انزلی با ۱۵۱۵ kWh/m² کمترین مقدار را دارد.
- سیستم متصل به شبکه در شهرستان رودبار با تولید ۱۹۳۶ kWh/year برق فتوولتائیک خورشیدی، بهترین عملکرد را دارد، در حالی که بندر انزلی با تولید ۱۳۷۵ kWh/year در سال پایین‌ترین عملکرد را نشان می‌دهد.
 - در سیستم متصل به شبکه، رودبار با صرفه‌جویی ۱۹۴ لیتر گازوئیل، ۵۱۰ مترمکعب گاز طبیعی، ۱۴۸۹ کیلوگرم زغال‌سنگ و کاهش ۱۳۵۵، ۷۷۴ و ۱۷۴۳ کیلوگرم GHG پیش‌تاز است، در حالی که بندر انزلی کمترین صرفه‌جویی (۱۳۸ لیتر گازوئیل، ۹۶۳ کیلوگرم GHG) را دارد. در سیستم منفصل، صرفه‌جویی و کاهش GHG تقریباً نصف متصل به شبکه است، به دلیل تولید کمتر (۸۲۵-۸۴۳ kWh/year) و محدودیت ذخیره‌سازی. سیستم متصل به شبکه در مناطق با تولید بالا، تأثیر بیشتری در کاهش سوخت فسیلی و آلودگی دارد.
 - سیستم‌های منفصل با دوره بازگشت ۹۳/۲ (ماسال) تا ۹۵/۳ سال (بندر انزلی) به دلیل هزینه بالای باتری غیراقتصادی‌اند و برای مناطق شهری مناسب نیستند. در سناریو ۱، دوره بازگشت حدود دو برابر سناریو ۲ است، به دلیل هزینه‌های باتری. سناریو ۲ با تزریق کامل انرژی به شبکه، اقتصادی‌ترین است؛ رودبار با ۸/۸ سال کوتاه‌ترین و بندر انزلی با ۱۴/۷ سال، طولانی‌ترین دوره بازگشت را دارد. حذف باتری در سناریو ۲ سودآوری را، به‌ویژه در مناطقی مانند رودبار، افزایش می‌دهد، در حالی که باتری در سناریو ۱ به دلیل هزینه‌ها و محدودیت ذخیره‌سازی، توجیه اقتصادی را کاهش می‌دهد.
 - در سناریو ۲، حذف باتری و فروش کامل انرژی به شبکه، NPV مثبت در همه مناطق ایجاد می‌کند، رودبار با ۶۸۰ میلیون ریال بالاترین و بندر انزلی با ۲۵۹ میلیون ریال پایین‌ترین NPV را دارد. در سناریو ۱، به جز رودبار (۱۸۹ میلیون ریال) و تالش (۲۵ میلیون ریال)، سایر مناطق NPV منفی دارند که به دلیل هزینه‌های بالای باتری است. سیستم‌های منفصل از شبکه با NPV منفی (۶۳۸- تا ۶۳۳- میلیون ریال) در همه شهرستان‌ها غیراقتصادی‌اند. سناریو ۲ بهترین گزینه سرمایه‌گذاری است.

فهرست علائم

CF	Performance Coefficient	mn	Maintenance Index
Cinv	Investment Cost (or Capital Investment Cost)	Pt	Primary Energy Price
Egrid	Energy Generated in the Power Plant	PBP	Payback Period
Enom	Nominal Capacity of the Power Plant	Qsave	Saved Primary Energy
Fsaved	Primary Energy Saved	PR	Performance Ratio
GT	Solar Radiation on Tilted Surface	r	Repair Index
GHG reduced	Greenhouse Gas Reduction Index	SP	System Profitability
Lf	System Lifetime	T	Time

منابع

- شعبان‌یان مهدی، کابلی محمدهادی، دهقان بنادکی علی، زارع لیلیا (۱۴۰۰)، سنجش اثر کاربرد پلی‌استایرن در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی اقلیم سرد، نشریه اندیشه معماری، دوره ۵، شماره ۹، صفحات ۳۲۳-۳۱۱.
- طیبی چهره، فرانک، و کامران کسمایی، حدیثه. (۱۳۹۹). تأثیر نقش انرژی خورشید بر ساختمان‌های اداری شمال شهر تهران با هدف کاهش مصرف انرژی، نشریه معماری شناسی، دوره ۳، شماره ۱۶.
- اسلامی اندارگلی، مجید و رواز دژ، فردانه (۱۳۹۳). واکاوی موانع اقتصادی عدم توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک در کشور، اولین کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی انرژی خورشیدی، تهران.
- صیادی، محمد و مرادی، فرزانه و آریافر، محمدرضا (۱۴۰۲). تحلیل علل و آثار ناترازی گازی کشور از منظر امنیت انرژی، نشریه اکتشاف و تولید نفت و گاز، دوره ۱۴۰۲، شماره ۲۰۸.

- فلاح قاهره، غلامعباس واسدی، مهدی وانتظاری، علیرضا(۱۳۹۴). ناحیه بندی آب و هوایی استان گیلان با روش‌های چندمتغیره، نشریه: جغرافیا و برنامه ریزی، دوره: ۱۹، شماره ۵۴، صفحات ۲۵۱-۲۳۵
- حاکم‌زاده میرحامد، شریفی شهرام، میربلوکی هانیه، عابدی طوبی، مقدمی شمیم، موسوی سیدجواد (۱۴۰۳)، ارزیابی فنی - اقتصادی نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان، مجله زیست پژوهش و فناوری محیط، دوره ۹ شماره ۱۶، صفحات ۱۸۶-۱۶۹
- Hakemzadeh M H, Kamaruzzaman Sopian, Hussein A. Kazem, Ali H.A. Al-Waeli, Miqdam Tariq Chaichan, Evaluating the techno-economic viability of different solar collectors integrated into an adsorption cooling system in tropical climate conditions, *Solar Energy*, Volume 268, 2024, 112304.
- Forrousso S., Kaitouni S. I., Abdelali M., Wakil M., Jamil A., Brigui J., Azzouzi H., Optimal sizing of off-grid microgrid building-integrated-photovoltaic system with battery for a net zero energy residential building in different climates of Morocco, *Results in Engineering*, Volume 22, 2024, 102288.
- Jenan A. Q., Energy and economic potential for photovoltaic systems installed on the rooftop of apartment buildings in Jordan, *Results in Engineering*, Volume 16, 2022, 100642,
- Abdelrahman O. Ali, Abdelrahman T. Elgohr, Mostafa H. El-Mahdy, Hossam M. Zohir, Ahmed Z. Emam, Mostafa G. Mostafa, Muna Al-Razgan, Hossam M. Kasem, Mohamed S. Elhadidy, *Advancements in photovoltaic technology: A comprehensive review of recent advances and future prospects*, *Energy Conversion and Management: X*, Volume 26, 2025, 100952.
- Iturralde Carrera, L.A., Garcia-Barajas, M.G.; Constantino-Robles, C.D.; Álvarez-Alvarado, J.M.; Castillo-Alvarez, Y.; Rodríguez-Reséndiz, J. Efficiency and Sustainability in Solar Photovoltaic Systems: A Review of Key Factors and Innovative Technologies. *Eng* 2025, 6, 50.
- Yin, Q., Li, A., Han, C. The Role of Solar Photovoltaic Roofs in Energy-Saving Buildings: Research Progress and Future Development Trends. *Buildings* 2024, 14, 3091.
- Parhamfar M., Naderi R, Sadeghkhan I, Risk assessment, lightning protection, and earthing system design for photovoltaic power plants: A case study of utility-scale solar farm in Iran, *Solar Energy Advances*, Volume 5, 2025, 100098.
- Sadat S. A., Faraji J., Nazifard M., Ketabi A., The experimental analysis of dust deposition effect on solar photovoltaic panels in Iran's desert environment, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 47, 2021, 101542.
- Global Solar Atlas, 2025. [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map>.
- Jafari, S., Ghanbari, A., & Ebrahimi, H. (2020). Potential assessment of solar photovoltaic power plants in Iran based on geographical and climatic factors. *Journal of Geographic Space and Technology*, 15(4), 123-136.
- Rahmani, R., & Norouzi, M. (2021). Multi-criteria decision-making methods for solar energy site selection using GIS in Iran. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Studies*, 9(3), 78-89. Retrieved from <https://ensani.ir/fa/article/372842>
- Aryanfar A., Gholami A., Pourgholi M., Shahroozi S., Zandi M., Khosravi A., Multi-criteria photovoltaic potential assessment using fuzzy logic in decision-making: A case study of Iran, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 42, 2020, 100877.
- NASA. (n.d.). Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER). NASA Langley Research Center. Retrieved Jan 4, 2025, from <https://power.larc.nasa.gov>
- Rashid, N., Kabir, M. H. (2024). Greenhouse Gas Emission Reduction through Electricity Generation from Solar Photovoltaic Systems: A Study in Dhaka. *The Dhaka University Journal of Earth and Environmental Sciences*. 12. 1-8.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES. Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/>
- An, y., Kim, J., Joo, H., Lee, W. (2023). Gwang-woo Han, Haneul Kim, Min-Hwi Kim, Experimental performance analysis of photovoltaic systems applied to an positive energy community based on building renovation, *Renewable Energy*, Volume 219, Part 1, 119369.

- U.S. Environmental Protection Agency.GHG Emission Factors Hub. EPA, 2023. https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-03/ghg_emission_factors_hub.pdf
- Hakemzadeh, M. H., Sopian, K., Fazlizan Abdullah, A., Jarimi, H., Fauzan, M. F., Ibrahim, A. (2022). Technoeconomics of solar thermal-assisted sorption cooling systems under tropical climate condition – A case of Malaysia, Energy Conversion and Management: X, Volume 16, 100305.
- Olatayo, K. H., Wichers, J.H., Stoker, P.W. (2018). Energy and economic performance of small wind energy systems under different climatic conditions of South Africa, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 98, Pages 376-392.

-

