



ارزیابی فنی-اقتصادی نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان

میرحامد حاکم زاده^۱، شهرام شریفی^۲، هانیه میربلوکی^۳، طوبی عابدی^۴، شمیم مقدمی^۵، سید جواد موسوی^۶✉

- ۱- کارشناس، گروه مطالعات انرژی، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران
- ۲- استادیار، گروه مطالعات ناحیه ای، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران
- ۳- پژوهشگر گروه مهندسی محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران
- ۴- استادیار، گروه محیط زیست طبیعی، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی گیلان، رشت، ایران
- ۵- 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	افزایش تقاضای انرژی، نیاز به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حرکت به سوی منابع انرژی تجدیدپذیر، احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی را به گزینه‌ای قابل توجه در استان گیلان تبدیل کرده است. این در حالی است که تاکنون ارزیابی فنی-اقتصادی جامع برای احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی، با توجه به میزان تابش خورشیدی که به دلیل شرایط اقلیمی در بخش عمده‌ای از سال محدود است، در این منطقه انجام نشده بود. این پژوهش با هدف امکان‌سنجی تأمین انرژی پایدار، کاهش اثرات محیط زیستی و بررسی هزینه‌ها و سودآوری پروژه، به ارزیابی فنی-اقتصادی نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان می‌پردازد. برای شبیه‌سازی عملکرد این نیروگاه‌ها، از داده‌های آب‌وهوایی پایگاه اقلیمی ناسا و نرم‌افزار PVsyst استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که به دلیل شرایط اقلیمی، به‌ویژه میزان تابش خورشیدی، عملکرد نیروگاه‌های خورشیدی در شهرهای رودبار و تالش بسیار مطلوب است. این وضعیت منجر به بازگشت سریع‌تر سرمایه و افزایش سودآوری سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی در این مناطق می‌شود. با این وجود، در اکثر نقاط استان گیلان، پتانسیل تولید انرژی خورشیدی به دلیل تابش نسبتاً کم، پوشش ابری گسترده و شرایط جوی مرطوب و بارانی، محدود است. علاوه بر این، یافته‌ها حاکی از آن است که استفاده مستقیم از برق تولیدی در صنایع، به جای فروش آن به شبکه، گزینه‌ای به مراتب مقرون به صرفه‌تر است. این رویکرد نه تنها هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد، بلکه انگیزه سرمایه‌گذاری در این حوزه را نیز تقویت می‌کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵	
کلید واژه‌ها: انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، نیروگاه‌های فتوولتائیک، ارزیابی فنی-اقتصادی، انتشار گازهای گلخانه‌ای.	



Techno-Economic Evaluation of Solar Photovoltaic Power Plants in Gilan Province

Mir Hamed Hakem Zadeh¹, Shahram Sharifi², Hanieh Mirbolooki³, Tooba Abedi⁴, Shamim Moghadami⁵, Seyed Javad Mousavi^{6✉}

- 1- Specialist, Department of Energy, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran
- 2- Assistant Professor, 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- Assistant Professor, Department of Natural Environment, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran
- 5- Department of Water Resources Monitoring, Environmental Research Institute of Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Rasht, Iran
- 6- Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran

Article Info	Abstract
Article type: Research Article	The increasing demand for energy, the necessity to reduce dependence on fossil fuels, and the global shift toward renewable energy sources have made the construction of solar photovoltaic power plants as a significant option in Gilan Province. However, a comprehensive techno-economic evaluation of solar photovoltaic power plants had not previously been conducted in this region, where solar radiation is limited for a large portion of the year due to climatic conditions. This study aims to assess the feasibility of ensuring a sustainable energy supply, reducing environmental impacts, and evaluating the costs and profitability of these projects by conducting a techno-economic analysis of solar photovoltaic power plants in Gilan Province. To simulate the performance of these power plants, the study used the PVsyst software along with meteorological data from NASA's climate database. The results of the study show that, due to favorable climatic conditions, particularly solar radiation levels, the performance of solar power plants in the cities of Rudbar and Talesh is very promising. This leads to a quicker payback period and greater profitability for solar photovoltaic systems in these areas. However, in most parts of Gilan Province, the potential for solar energy production is constrained by relatively low solar radiation, widespread cloud cover, and humid, rainy weather conditions. Furthermore, the findings suggest that directly using the generated electricity in industries, rather than selling it to the grid, is a much more cost-effective option. This approach not only reduces production costs but also strengthens the incentive for investment in this sector.
Article history: Received: 2025/03/10 Accepted: 2025/04/20 Available online: 2025/05/05	
Keywords: Renewable energy, Solar energy, Photovoltaic power plants, Techno-economic evaluation, Greenhouse gas emissions	

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

مقدمه

در دنیای امروز، انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل بحران‌های زیست‌محیطی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌های فزاینده درباره تغییرات اقلیمی، از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار شده‌اند. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نه تنها انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد، بلکه نقشی اساسی در مقابله با گرمایش جهانی ایفا می‌کند. با رشد جمعیت و افزایش تقاضای انرژی، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان راه‌حلی پایدار برای تأمین انرژی، بدون آسیب به محیط زیست، ضروری به نظر می‌رسد. در بسیاری از کشورها، انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان ابزاری کلیدی برای تأمین امنیت انرژی و کاهش وابستگی به بازارهای ناپایدار جهانی مورد توجه قرار گرفته‌اند (Hakemzadeh et al., 2023). در میان فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر، انرژی فتوولتائیک خورشیدی به دلیل مقیاس‌پذیری بالا و قابلیت انطباق با نیازهای متنوع انرژی، پتانسیل چشمگیری از خود نشان داده است (Kumar Sahoo., 2016). در سال‌های اخیر، سامانه‌های خورشیدی فتوولتائیک، به دلیل کاهش چشمگیر هزینه‌ها، تکامل فناوری، رشد سریع و ادغام موفق با بازار، جایگاه ویژه‌ای در آینده انرژی‌های تجدیدپذیر یافته‌اند. این فناوری در دهه گذشته از نظر فنی و تجاری به سطح بالایی از بلوغ رسیده و اکنون در خط مقدم تحقق اهداف جهانی در حوزه انرژی و تغییرات اقلیمی قرار دارد (Dong & Zhong, 2025).

کشور ایران با توجه به موقعیت جغرافیایی خود، پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری از سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی دارد. مطالعات متعدد در این زمینه به بررسی مناطق مستعد و عوامل مؤثر در احداث نیروگاه‌های خورشیدی پرداخته‌اند. در پژوهشی با هدف پتانسیل‌سنجی کشور ایران از نظر اقلیمی و زیرساختی، عواملی همچون شدت تابش، میانگین دمای سالیانه، فاصله از خطوط انتقال نیرو و راه‌های دسترسی، ارتفاع، شیب و کاربری اراضی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که استان‌های کرمان، خراسان جنوبی، فارس، یزد، هرمزگان و سیستان و بلوچستان به ترتیب مناسب‌ترین مناطق برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک هستند. به طور کلی، بیش از ۵۵۷٬۰۰۰ کیلومترمربع از خاک ایران دارای پتانسیل بالایی برای احداث این نیروگاه‌ها است (Jafari et al, 2020). تحقیقی دیگر با استفاده از سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و ابزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، به تلفیق عوامل مؤثر در احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک در مقیاس کشوری پرداخته است. در این مطالعه، روش‌های تاپسیس (TOPSIS)، فازی تاپسیس (Fuzzy TOPSIS) و فازی سوگنو (Fuzzy Sugeno) برای تعیین مناطق مساعد به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که روش فازی تاپسیس ٪ ۱۸٫۳۳ از کل کشور را برای احداث نیروگاه خورشیدی مناسب دانسته است (Rahmani et al., 2021). علاوه بر این، بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان تابش خورشید در ایران بسیار بیشتر از میانگین جهانی است؛ به‌طوری‌که در برخی مناطق، این مقدار به بیش از ۷ تا ۸ کیلووات ساعت بر متر مربع می‌رسد (Ahmadi et al., 2018).

با وجود ظرفیت بالای انرژی خورشیدی در ایران، بهره‌برداری از سیستم‌های فتوولتائیک با موانع متعددی مواجه است. مطالعات نشان می‌دهد که عواملی مانند هزینه‌های اولیه بالا، نبود حمایت‌های مالی مناسب، آگاهی ناکافی عمومی و عدم وجود سیاست‌های تشویقی مؤثر، از جمله موانع اصلی در توسعه نیروگاه‌های خورشیدی هستند. این موانع باعث شده‌اند تا سهم انرژی خورشیدی در سبد انرژی کشور کمتر از ظرفیت واقعی آن باشد (اسلامی و روازدر، ۱۹۹۳). از سوی دیگر، ناترازی انرژی در ایران به دلیل افزایش تقاضا ناشی از رشد جمعیت، توسعه صنعتی، استفاده بی‌رویه از انرژی در فصول پیک مصرف، سرمایه‌گذاری ناکافی در زیرساخت‌های تولید و توزیع انرژی و وابستگی به سوخت‌های فسیلی، به یکی از چالش‌های اساسی کشور تبدیل شده است. این مسئله فشار مضاعفی بر زیرساخت‌های انرژی وارد کرده و تأثیرات گسترده‌ای بر توسعه اقتصادی، امنیت انرژی، بهره‌وری صنایع، افزایش هزینه‌های تولید، کاهش سرمایه‌گذاری و تورم داشته است (صیادی و همکاران، ۱۴۰۲). برای مقابله با این چالش، پژوهشگران بر تدوین سیاست‌های جامع انرژی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های تولید و توزیع، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش آگاهی عمومی در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی تأکید دارند (حافظی و همکاران، ۱۴۰۳). اجرای این راهکارها می‌تواند به تعادل عرضه و تقاضای انرژی و بهبود امنیت انرژی کشور کمک کند.

این تحقیق به بررسی عملکرد فنی-اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان می‌پردازد. استان گیلان به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، دارای آب و هوای متنوعی است که تحت تأثیر ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی منطقه قرار دارد. این استان به دلیل نزدیکی به دریا، دارای آب و هوای مرطوب و معتدل است که ویژگی‌های خاصی را به آن می‌بخشد. به طور کلی، گیلان سه نوع آب و هوا دارد: ناحیه معتدل و مرطوب، کوهستانی و نیمه مرطوب و سرد. (فلاح قاله‌ری و همکاران، ۱۳۹۴). بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان تابش خورشیدی در استان گیلان حدود ۴.۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز است. این مقدار به طور قابل توجهی کمتر از تابش خورشیدی در مناطق مرکزی و جنوبی ایران است که هوای خشک‌تری دارند و میزان تابش در آن‌ها بین ۵.۵ تا ۶.۵ کیلووات ساعت در روز متغیر است. با این حال، گیلان همچنان پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی دارد و استقرار سیستم‌های فتوولتائیک در مناطق با تابش بیشتر می‌تواند به تأمین انرژی پایدار و کاهش هزینه‌های انرژی کمک کند (Global Solar Atlas, 2025).

با این وجود، عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی در استان گیلان به دلیل تنوع آب و هوایی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این تحقیق، تحلیل فنی و اقتصادی نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی با توجه به شرایط آب و هوایی این استان است. در این مطالعه، یک رویکرد تحلیلی مبتنی بر شبکه محاسباتی چندلایه به منظور بررسی مؤلفه‌ها و متغیرهای تأثیرگذار بر عملکرد فنی-اقتصادی نیروگاه‌های فتوولتائیک توسعه داده شده است. از طریق آنالیزهای حساسیت، بررسی‌های انرژی و محیطی، و تحلیل‌های اقتصادی، پتانسیل این نیروگاه‌ها برای شرایط خاص اقلیمی تعیین می‌شود. نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای عملی برای پیاده‌سازی و بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های فتوولتائیک در گیلان و مناطق با شرایط اقلیمی مشابه باشد. تحلیل دقیق داده‌های حاصل از بررسی پتانسیل فنی-اقتصادی نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی و شناخت تأثیر عوامل محیطی همچون میزان تابش خورشید، سرعت باد، رطوبت و دما، می‌تواند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در توسعه این نیروگاه‌ها کمک کند. همچنین، اتخاذ تصمیمات سرمایه‌گذاری بهتر در راستای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حفاظت از محیط زیست را تسهیل خواهد کرد.

مواد و روش‌ها

روش پژوهش

در این پژوهش، به منظور ارزیابی پتانسیل فنی-اقتصادی نیروگاه‌های خورشیدی 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

به‌منظور دستیابی به تصویری دقیق و قابل اعتماد از روندهای اقلیمی و تغییرات فصلی و به دنبال آن ارزیابی پتانسیل فنی-اقتصادی نیروگاه‌های خورشیدی در استان گیلان، داده‌های آب و هوایی مورد نیاز از پایگاه داده‌های اقلیمی سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا (ناسا) برای بازه زمانی پنج ساله از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ استخراج شده است. ناسا به عنوان یک منبع معتبر و پیشرو در زمینه علوم زمین و اقلیم، مجموعه‌ای گسترده و جامع از داده‌های اقلیمی را به صورت عمومی در دسترس قرار می‌دهد که به دلیل دقت و پوشش گسترده جغرافیایی، کیفیت بالا، و روش‌های مدون جمع‌آوری و پردازش، امکان تحلیل دقیق و معتبر تغییرات اقلیمی را در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌کند. با تعیین مختصات جغرافیایی شهرهای مختلف استان گیلان، داده‌های مربوط به هر منطقه به‌صورت جداگانه استخراج و به منظور اطمینان از صحت و دقت اطلاعات، یک فرآیند پردازش و تحلیل گسترده شامل بررسی نواقص، همگن‌سازی و در صورت لزوم درونیابی داده‌ها انجام شده است. این داده‌ها شامل اطلاعات دقیق و جامعی از شرایط آب و هوایی منطقه، میزان تابش خورشید، دما، رطوبت و سایر پارامترهای مرتبط با بهره‌وری سیستم‌های

فتوولتائیک است که به عنوان ورودی اصلی برای مدل‌سازی و تحلیل‌های آماری استفاده و نقش مهمی در ارزیابی عملکرد نیروگاه خورشیدی با توجه به الگوهای اقلیمی و تغییرات محیطی ایفا می‌کنند.

مدل سازی و شبیه سازی

در این مطالعه، برای شبیه‌سازی عملکرد نیروگاه خورشیدی در استان گیلان، از نرم‌افزار PVsyst به دلیل دقت بالا در مدل‌سازی پارامترهای فنی و محیطی استفاده شد که یکی از ابزارهای پیشرفته و معتبر برای تحلیل و طراحی سیستم‌های فتوولتائیک است. ابتدا اطلاعات مربوط به موقعیت جغرافیایی شهرهای استان گیلان شامل عرض و طول جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و شرایط اقلیمی (مانند دما، تابش خورشیدی و رطوبت) که در مرحله قبل جمع‌آوری شد، به صورت دقیق در نرم‌افزار وارد شد. نرم‌افزار PVsyst با ارائه قابلیت‌هایی همچون محاسبه تابش خورشیدی، تابش مستقیم و انتشاری، زاویه و جهت نصب پنل‌ها و تحلیل عملکرد سیستم در شرایط واقعی، امکان بررسی دقیق بازدهی نیروگاه را فراهم می‌سازد. در فرآیند شبیه‌سازی، طراحی سیستم فتوولتائیک بر اساس ظرفیت مورد نظر انجام شد. برای این منظور، انتخاب نوع و تعداد پنل‌های خورشیدی، اینورترها و سایر تجهیزات مطابق با نیاز پروژه و شرایط منطقه صورت گرفت. مدل‌های مختلف پنل و اینورتر با در نظر گرفتن راندمان و مشخصات فنی آن‌ها بررسی شدند. در این تحقیق، پنل‌های مونوکریستالین به دلیل بازده بالا (۱۷-۲۲٪) و عملکرد عالی در شرایط نور کم و ابری، برای آب و هوای مرطوب و معتدل استان گیلان انتخاب شدند. این پنل‌ها در دما و رطوبت بالا افت بازده کمتری دارند و با پوشش مقاوم در برابر خوردگی، برای محیط‌های مرطوب مناسب‌اند. همچنین، بهره‌وری بالای آن‌ها در فضای محدود و شستشوی طبیعی توسط باران‌های فراوان گیلان، کارایی و دوام سیستم را افزایش می‌دهد. همچنین، زوایای نصب و جهت بهینه پنل‌ها با هدف حداکثرسازی دریافت تابش خورشیدی شبیه‌سازی گردید. علاوه بر این، برای مدل‌سازی خط افق و تأثیر آن بر تابش خورشیدی دریافتی توسط پنل‌ها، در نرم‌افزار مدل‌سازی شد تا ارزیابی دقیقی از عملکرد سیستم در شرایط واقعی ارائه شود. در نهایت، با استفاده از ابزارهای تحلیلی PVsyst، نتایج شبیه‌سازی شامل بازده سالانه، انرژی تولیدی، تلفات سیستم و سایر شاخص‌های کلیدی محاسبه 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 عملکرد نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی استفاده شده‌اند. ضریب عملکرد نشان‌دهنده بهره‌برداری عملی از ظرفیت نیروگاه است و نسبت تولید واقعی انرژی به حداکثر انرژی ممکن را در یک بازه زمانی مشخص بیان می‌کند. این شاخص نشان‌دهنده میزان بهره‌وری و استفاده واقعی از نیروگاه خورشیدی در مقایسه با ظرفیت اسمی تولید آن است. که به موقعیت جغرافیایی، میزان تابش خورشید، و ساعات آفتابی منطقه بستگی دارد. نسبت عملکرد (PR) یکی از معیارهای کلیدی برای ارزیابی بهره‌وری نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی که نشان می‌دهد نیروگاه خورشیدی در عمل چقدر از توان تئوری خود را با در نظر گرفتن تمام تلفات ممکن (مانند تلفات تبدیل انرژی، تلفات حرارتی، سایه و گرد و غبار) و شرایط محیطی استفاده می‌کند. محاسبه CF و PR، درک جامعی از بهره‌وری کلی سیستم و تأثیر عوامل محیطی و طراحی بر عملکرد نیروگاه ارائه می‌دهد. در این مطالعه، داده‌های مربوط به تولید انرژی، تابش خورشیدی و پارامترهای فنی نیروگاه برای محاسبه این دو شاخص به کار گرفته شده‌اند تا عملکرد نیروگاه به صورت کمی و کیفی تحلیل شود. این دو شاخص از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$CF = \frac{E_{grid}}{T \cdot E_{nom}} \quad (۱)$$

$$PR = \frac{E_{Grid}}{\eta_{module} \cdot A_c \cdot G_T} \quad (۲)$$

ارزیابی صرفه‌جویی انرژی و تأثیرات زیست محیطی نیروگاه فتوولتایک خورشیدی

شاخص صرفه‌جویی انرژی تجدیدناپذیر (Qsaved) و شاخص کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG_{reduced}) به عنوان دو معیار اصلی برای ارزیابی عملکرد نیروگاه فتوولتایک خورشیدی از منظر کاهش مصرف انرژی اولیه و مزایای محیط‌زیستی بررسی می‌شوند. ارزیابی این دو شاخص می‌تواند کارایی نیروگاه فتوولتایک در کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و بهره‌وری انرژی را به‌طور جامع نمایش دهد. نتایج این تحلیل به درک بهتر نقش نیروگاه‌های خورشیدی در دستیابی به توسعه پایدار کمک می‌کند. Qsaved صرفه‌جویی در انرژی اولیه تجدیدناپذیر از طریق استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را تعیین می‌کند که می‌توان آن را با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد (Nayeema Rashid et al., 2024):

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

در این معادله C_{fuel} ضریب تبدیل مخصوص سوخت (کیلووات ساعت به ازای هر واحد سوخت جایگزین شده) می‌باشد که در محاسبات برای زغال سنگ در حدود 1.2 تا 1.5 کیلووات ساعت بر کیلوگرم (بسته به نوع زغال سنگ متغیر است)، گاز طبیعی در حدود 3.6 تا 4 کیلووات ساعت بر متر مکعب، گازوئیل یا نفت کوره در حدود 10 تا 12 کیلووات ساعت بر لیتر در نظر گرفته می‌شود (IPCC, 2006).

از سوی دیگر، GHG_{reduced} میزان کاهش انتشار CO₂ و سایر گازهای مضر ناشی از جایگزینی سیستم‌های خورشیدی به جای سیستم‌های متداول مبتنی بر سوخت‌های فسیلی را بررسی می‌کند. این شاخص از طریق ضرب میزان کاهش مصرف انرژی اولیه و ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای به ازای هر کیلووات ساعت تولید انرژی الکتریکی و حرارتی از سوخت‌های فسیلی به شرح زیر دست می‌آید (Young-sub An et al., 2023):

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

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 0.9 تا 1.2 (kg CO₂/kWh)، گاز طبیعی در حدود 0.4 تا 0.6 (kg CO₂/kWh)، گازوئیل یا نفت کوره در حدود 0.7 تا 0.9 (kg CO₂/kWh) در نظر گرفته می‌شود (EPA, 2023).

ارزیابی اقتصادی نیروگاه فتوولتایک خورشیدی

برای ارزیابی اقتصادی نیروگاه فتوولتایک خورشیدی، از شاخص‌های کلیدی دوره بازگشت سرمایه (PBP) و سودآوری سیستم (SP) استفاده شده است. دوره بازگشت سرمایه به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی، به مدت زمان لازم برای جبران هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری از طریق کاهش هزینه‌های انرژی اشاره دارد. دوره بازگشت سرمایه به صورت زیر محاسبه می‌شود (Hakemzadeh et al., 2024):

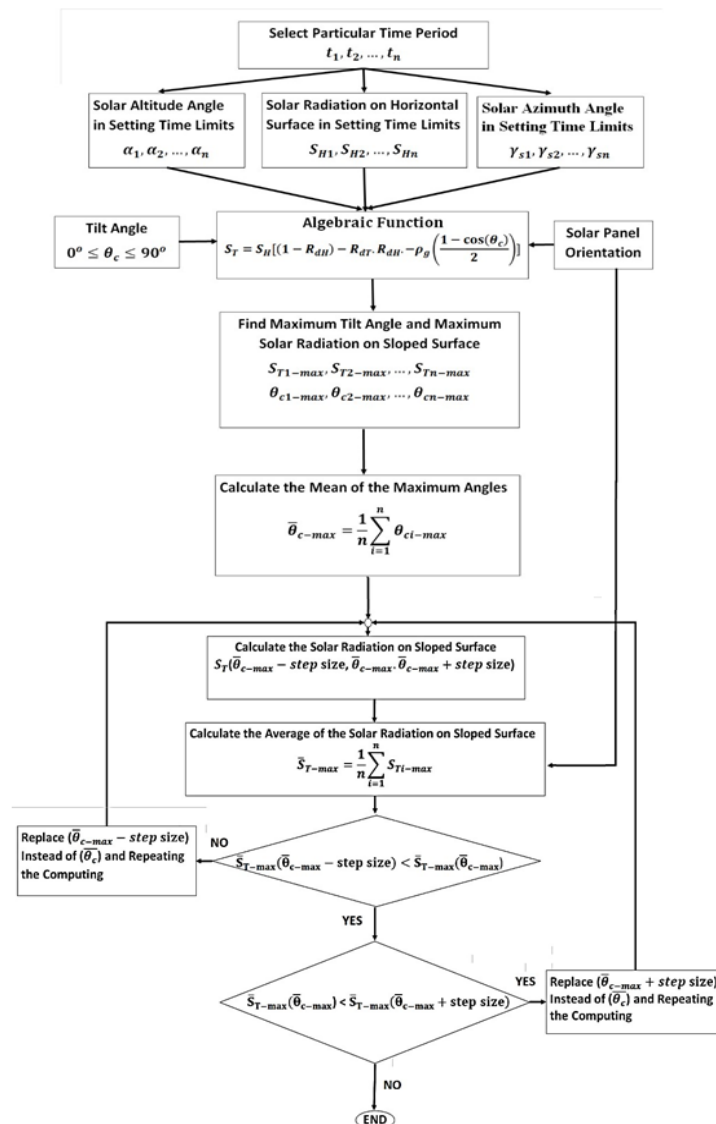
$$PBP = \frac{\ln\left(1 + \frac{C_{inv}i}{P_t Q_{save}}\right)}{\ln(1+i)} \quad (5)$$

سودآوری سیستم (SP) می‌تواند عملکرد سیستم را به‌طور جامع ارزیابی کرده و تأثیر پارامترهای کلیدی همچون هزینه‌های بهره‌برداری و استهلاک، کاهش هزینه‌های انرژی و میانگین طول عمر اجزای سیستم را مشخص کند. مقدار بالاتر SP نشان‌دهنده سودآوری بیشتر سیستم در مقایسه با هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری است SP. به‌صورت زیر بیان می‌شود (Hakemzadeh et al., 2022):

$$SP = \left(\frac{Q_{save} P_t}{C_{inv} i} \right) \left[(1+i)^{L_f - PBP} - 1 \right] - (L_f - PBP) [(mn+r)] \quad (6)$$

بهینه‌سازی

نرم‌افزار PVsyst با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته شبیه‌سازی، پارامترهای مختلفی از جمله شرایط اقلیمی (مانند تابش خورشیدی، دما، رطوبت و سرعت باد)، مشخصات فنی ماژول‌ها و اینورترها و همچنین تأثیرات سایه‌اندازی و تلفات سیستم را تحلیل می‌کند. این نرم‌افزار با استفاده از مدل‌های ریاضی دقیق و بانک‌های اطلاعاتی گسترده، قادر است میزان انرژی تولیدی سالانه، بازدهی سیستم و سایر شاخص‌های عملکردی نیروگاه‌های فتوولتائیک را به‌طور جامع ارزیابی کند. این قابلیت‌ها، PVsyst را به ابزاری ضروری در طراحی، بهینه‌سازی و تحلیل اقتصادی پروژه‌های خورشیدی تبدیل کرده است. در این مطالعه، از ماژول بهینه‌سازی (Optimization Tool) نرم‌افزار PVsyst برای تعیین زاویه شیب و جهت بهینه نصب پنل‌های خورشیدی در نیروگاه‌های فتوولتائیک استفاده شده است. این ماژول با اجرای تحلیل پارامتری و شبیه‌سازی عددی، عملکرد سیستم را در زوایای مختلف بررسی کرده و مقدار بهینه را بر اساس حداکثرسازی دریافت انرژی خورشیدی و تولید انرژی سالانه تعیین می‌کند. تمامی این محاسبات با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی محل نصب سیستم فتوولتائیک انجام شده است، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. در ابتدا، نرم‌افزار با استفاده از مدل‌های تابش خورشیدی و داده‌های هواشناسی منطقه، میزان انرژی دریافتی



شکل (۱) روندمای بهینه سازی زاویه و جهت پنل خورشیدی

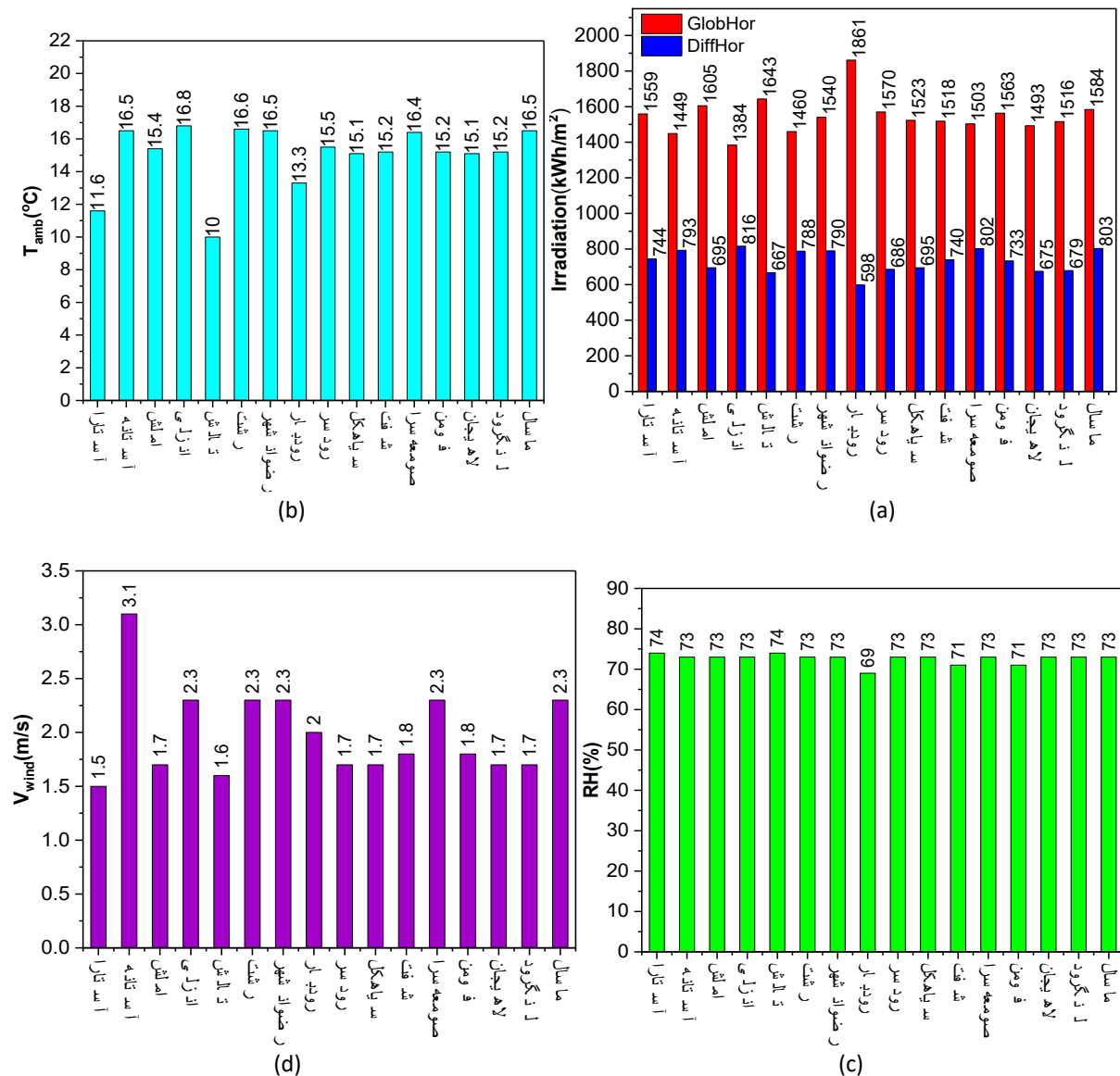
پنل‌ها را در زوایای مختلف محاسبه می‌کند. سپس، یک تحلیل حساسیت برای تغییر مقادیر زاویه شیب و جهت نصب اجرا شده و خروجی سیستم در هر حالت ارزیابی می‌شود. PVsyst این تحلیل را به صورت یک جستجوی عددی گام‌به‌گام انجام داده و مقدار بهینه زاویه شیب را که بیشترین میزان تولید انرژی را فراهم می‌کند، تعیین می‌نماید.

یافته‌های پژوهش

شرایط اقلیمی استان گیلان

تنوع اقلیمی و جغرافیایی استان گیلان موجب تفاوت در کارایی نیروگاه‌های خورشیدی در مناطق مختلف این استان شده است. در این پژوهش، میزان تابش خورشیدی، دمای محیط، رطوبت نسبی و سرعت باد به عنوان پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل (2a) میزان تابش کل خورشیدی و تابش خورشیدی پراکنده را در ۱۶ شهرستان استان گیلان بر حسب کیلووات‌ساعت بر مترمربع (kWh/m^2) در سال نشان می‌دهد. تابش کل، مجموع تابش مستقیم و پراکنده است، در حالی که تابش پراکنده به بخشی از تابش خورشیدی اشاره دارد که در اثر پراکندگی در جو (ناشی از ابرها، ذرات معلق و رطوبت) به سطح زمین می‌رسد. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که میزان تابش خورشیدی کل و پراکنده در شهرستان‌های مختلف استان بسته به موقعیت جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و شرایط آب‌وهوایی متفاوت است. نتایج نشان می‌دهد که رودبار با میزان تابش کل $1861 (\text{kWh/m}^2)$ و تابش پراکنده $598 (\text{kWh/m}^2)$ ، به دلیل موقعیت جغرافیایی و پوشش ابری کمتر، بالاترین میزان تابش کلی و کمترین تابش پراکنده را دارد. در مقابل، بندر انزلی با میزان تابش کل $1384 (\text{kWh/m}^2)$ و تابش پراکنده $816 (\text{kWh/m}^2)$ ، کمترین و بیشترین میزان تابش کل و پراکنده را ثبت کرده است که به رطوبت بالا و پوشش ابری بیشتر در این منطقه مرتبط است. داده‌ها نشان می‌دهند که به جز رودبار، سایر شهرستان‌های استان تابش پراکنده بالایی دارند (بین ۴۰٪ تا ۶۰٪ در سال). بنابراین، طراحی نیروگاه‌ها باید به گونه‌ای باشد که بتوان از این میزان تابش خورشیدی به طور مؤثر بهره‌برداری کرد. دمای محیط یکی از عوامل کلیدی در عملکرد پنل‌های خورشیدی است، زیرا تأثیر مستقیم بر راندمان تبدیل انرژی دارد. بر اساس شکل (2b)، دمای متوسط سالانه در شهرستان‌های گیلان بین ۱۰ درجه سانتی‌گراد (تالش) تا ۱۷ درجه سانتی‌گراد (بندر انزلی) متغیر است. شهرستان‌هایی مانند بندر انزلی، آستانه اشرفیه، رضوانشهر، صومعه‌سرا و ماسال دمای بالاتری دارند که می‌تواند تأثیر منفی بر بازده پنل‌های خورشیدی داشته باشد، زیرا دمای بالا موجب افزایش مقاومت الکتریکی سلول‌های خورشیدی و کاهش راندمان تبدیل انرژی می‌شود. در مقابل، مناطقی مانند تالش (10°C)، آستارا (11°C) و رودبار (13°C) دمای پایین‌تری دارند که شرایط مطلوب‌تری برای عملکرد بهینه پنل‌های خورشیدی فراهم می‌کند. به طور کلی، اقلیم معتدل گیلان از افزایش شدید دمای پنل جلوگیری کرده و شرایط نسبتاً مناسبی را برای عملکرد پایدار نیروگاه‌های خورشیدی فراهم می‌کند. با این حال، در ماه‌های گرم تابستان، ممکن است نیاز به روش‌های خنک‌سازی پنل‌ها وجود داشته باشد. همچنین، رطوبت نسبی یکی از چالش‌های مهم در بهره‌برداری از نیروگاه‌های خورشیدی در گیلان است. داده‌های شکل (2c) نشان می‌دهند که مقدار رطوبت نسبی در شهرستان‌های مختلف بین ۶۸٪ تا ۷۴٪ متغیر است. بیشترین میزان رطوبت در تالش و آستارا (۷۴٪) مشاهده شده که می‌تواند موجب کاهش عملکرد پنل‌های خورشیدی شود. رطوبت بالا باعث تشکیل بخار آب و شبنم بر سطح پنل‌ها شده و در بلندمدت منجر به ایجاد لایه‌ای از آلودگی و کاهش جذب نور خورشید می‌گردد. همچنین، شرایط مرطوب خطر خوردگی تجهیزات الکتریکی را افزایش داده و نیاز به نگهداری و تمیزکاری دوره‌ای را بیشتر می‌کند. در مقابل، رودبار (۶۸٪) و شفت (۷۰٪) کمترین میزان رطوبت را دارند که شرایط بهتری برای عملکرد پایدار نیروگاه‌های خورشیدی فراهم می‌کند. سرعت باد نیز از عوامل مهم در طراحی و استقرار نیروگاه‌های خورشیدی محسوب می‌شود، زیرا بر اتلاف گرما، تمیز شدن سطح پنل‌ها و استحکام سازه‌های خورشیدی تأثیرگذار است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سرعت باد در شهرستان‌های گیلان بین $1/51$ تا $3/14 (\text{m/s})$ متغیر است. همانطور که در شکل (2d) نشان داده شده است، مناطقی مانند آستانه اشرفیه $3/14 (\text{m/s})$ ، بندر انزلی $2/30 (\text{m/s})$ و رودبار $2/03 (\text{m/s})$ ، سرعت باد بالاتری دارند که می‌تواند به خنک‌سازی طبیعی پنل‌ها و افزایش

راندمان آن‌ها کمک کند. باین‌حال، سرعت باد بالا ممکن است نیاز به طراحی مقاوم‌تر سازه‌های پنل‌ها را افزایش دهد. از سوی دیگر، شهرستان‌های آستارا (m/s) ۱/۵۱، تالش (m/s) ۱/۶۱ و املش (m/s) ۱/۷۱، کمترین میزان سرعت باد را دارند که می‌تواند موجب کاهش خنک‌سازی طبیعی پنل‌ها و افزایش دمای آن‌ها در روزهای گرم شود. در این مناطق، استفاده از سیستم‌های تهویه مناسب می‌تواند به حفظ راندمان پنل‌های خورشیدی کمک کند.



شکل (۲) شرایط آب و هوایی شهرستان‌های استان گیلان

عملکرد نیروگاه‌های خورشیدی در استان گیلان

جدول ۱ نشان‌دهنده زاویه بهینه پنل‌های خورشیدی، بیشینه تابش خورشیدی و عملکرد نیروگاه‌های خورشیدی با ظرفیت‌های متفاوت را برحسب مگاوات ساعت در سال (MWh/year) در ۱۶ شهرستان استان گیلان می‌باشد که برای طراحی و بهینه‌سازی نیروگاه‌های خورشیدی در این منطقه حیاتی است. در این جدول، زاویه بهینه پنل برای دریافت حداکثر تابش خورشیدی در شهرستان‌های استان گیلان بین ۳۰ تا ۳۴ درجه قرار دارد که با عرض جغرافیایی گیلان (حدود ۳۷ درجه شمالی) سازگار است، اما به دلیل شرایط اقلیمی، الگوهای فصلی تابش خورشید، زاویه تابش خورشید در طول سال، الگوهای ابری و توپوگرافی منطقه

کمی کمتر از مقدار تئوریک است. بیشینه تابش خورشیدی نیز بر حسب کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال ارائه شده و نشان‌دهنده حداکثر انرژی قابل دریافت در صورت تنظیم پنل‌ها در زاویه بهینه است. رودبار با $2166 \text{ (kWh/m}^2\text{)}$ بالاترین تابش بهینه و بندر انزلی با $1515 \text{ (kWh/m}^2\text{)}$ کمترین مقدار را دارد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد رودبار، تالش و آستارا بهترین گزینه‌ها برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی در استان گیلان هستند، زیرا تولید انرژی در آن‌ها بالاتر از سایر شهرستان‌ها است. مناطقی مانند بندر انزلی و آستانه اشرفیه دارای کمترین میزان تولید انرژی هستند که به دلیل شرایط اقلیمی و پوشش ابری بیشتر است. شهرستان‌های رشت، لاهیجان، لنگرود و فومن عملکردی متوسط در مقایسه با سایر شهرستان‌ها دارد. در این مناطق، تابش خورشیدی نسبت به نواحی غربی گیلان کمتر است، اما همچنان برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی مناسب محسوب می‌شود. روند تولید انرژی در ظرفیت‌های مختلف نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت نیروگاه باعث افزایش تولید انرژی به صورت تقریباً خطی می‌شود.

ارزیابی افت توان نیروگاه‌های خورشیدی در استان گیلان

جدول ۲ عوامل اصلی افت توان نیروگاه‌های خورشیدی در ۱۶ شهرستان استان گیلان، یعنی افت توان، یعنی دمای ماژول، سطح تابش و موانع طبیعی (افق دید)، را بررسی می‌کند. این داده‌ها نشان‌دهنده وجود تفاوت‌های قابل توجه در بین شرایط اقلیمی، محیطی و جغرافیایی هر منطقه و تأثیر آن‌ها بر راندمان سیستم‌های خورشیدی است. به طور کلی، افت توان به دلیل دمای ماژول بالاترین مقادیر را در بین سه عامل دارد که نشان‌دهنده نقش حیاتی دمای ماژول در کاهش کارایی پنل‌های خورشیدی است. افت توان ناشی از دمای ماژول در تمام شهرستان‌ها بیش از ۴٪ است که نشان‌دهنده چالش مشترک دمای بالا در عملکرد پنل‌های خورشیدی در این استان است. در این بین، شهرستان رودبار با $6/75\%$ بیشترین افت توان ناشی از دما را ثبت کرده، در حالی که آستارا با $4/48\%$ کمترین مقدار را دارد. این تفاوت مربوط به شرایط اقلیمی خاص هر منطقه، میزان تابش خورشیدی، رطوبت بالا و دمای محیطی متفاوت، می‌باشد. افت توان ناشی از سطح تابش و موانع طبیعی نیز به ترتیب در بازه‌های $0/46\%$ تا $95/0\%$ و $37/0\%$ تا $87/1\%$ قرار دارند که نشان‌دهنده تأثیر کمتر این عوامل نسبت به دمای ماژول است. افت توان ناشی از سطح تابش، که به شدت تابش خورشید بستگی دارد، در رودبار با $0/46\%$ کمترین و در بندر انزلی با $95/0\%$ بیشترین مقدار را دارد. این تفاوت ممکن است به پوشش ابری بیشتر در مناطق ساحلی مانند انزلی مرتبط باشد که تابش مستقیم را کاهش می‌دهد. موانع طبیعی نیز در املش و رودبار با $87/1\%$ بیشترین تأثیر را دارند که به دلیل وجود مناطق کوهستانی در این شهرستان‌ها قابل انتظار است، در حالی که بندر انزلی با $0/37\%$ کمترین افت را نشان می‌دهد که با توپوگرافی هموار آن سازگار است.

جدول (۱) عملکرد نیروگاه‌های خورشیدی در شهرستان‌های استان گیلان

ردیف	شهرستان	زاویه بهینه پنل (درجه)	CF (%)	PR (%)	تابش خورشیدی بهینه (kWh/m^2)	ظرفیت نیروگاه خورشیدی			
						۱۰۰ (kW)	۲۵۰ (kW)	۵۰۰ (kW)	۱ (MW)
۱	آستارا	۳۴	۱۷/۷	۸۶/۲	۱۷۹۳	۱۵۳	۳۹۱	۷۷۵	۱۵۴۹
۲	آستانه اشرفیه	۳۰	۱۵/۵	۴۸/۸	۱۶۰۱	۱۳۵	۳۴۳	۶۸۱	۱۳۶۱
۳	املش	۳۲	۱۷/۳	۸۳/۳	۱۸۱۶	۱۵۰	۳۸۳	۷۵۹	۱۵۱۶
۴	بندر انزلی	۳۲	۱۴/۸	۸۵/۲	۱۵۱۵	۱۲۸	۳۲۷	۶۴۷	۱۲۹۴
۵	تالش	۳۴	۱۸/۴	۸۵/۱	۱۸۸۷	۱۵۹	۴۰۶	۸۰۵	۱۶۱۰
۶	رشت	۳۰	۱۵/۷	۸۴/۹	۱۶۲۰	۱۳۶	۳۴۷	۶۸۸	۱۳۷۵
۷	رضوانشهر	۳۱	۱۶/۸	۸۴/۸	۱۷۲۸	۱۴۵	۳۷۱	۷۳۵	۱۴۶۹
۸	رودبار	۳۴	۲۰/۶	۸۳/۲	۲۶۱۶	۱۷۹	۴۵۶	۹۰۴	۱۸۰۶
۹	رودسر	۳۲	۱۷/۱	۸۴/۰	۱۷۷۶	۱۴۸	۳۷۷	۷۴۸	۱۴۹۵
۱۰	سیاهکل	۳۲	۱۶/۵	۸۴/۱	۱۷۱۴	۱۴۳	۳۶۵	۷۲۳	۱۴۴۵

۱۱	شفت	۳۱	۱۶/۵	۸۴/۴	۱۷۷۰	۱۴۳	۳۶۴	۷۲۱	۱۴۴۲
۱۲	صومعه‌سرا	۳۰	۱۶/۲	۸۴/۷	۱۶۷۶	۱۴۱	۳۵۹	۷۱۲	۱۴۲۴
۱۳	فومن	۳۲	۱۶/۴	۸۴/۳	۱۷۷۱	۱۴۲	۳۶۳	۷۲۰	۱۴۴۰
۱۴	لاهیجان	۳۲	۱۶/۲	۸۴/۴	۱۶۷۴	۱۴۰	۳۵۷	۷۰۸	۱۴۱۶
۱۵	لنگرود	۳۲	۱۶/۴	۸۳/۸	۱۷۰۸	۱۴۲	۳۶۲	۷۱۸	۱۴۳۶
۱۶	ماسال	۳۱	۱۷/۳	۸۴/۵	۱۷۸۶	۱۵۰	۳۸۲	۷۵۸	۱۵۱۴

جدول (۲) عوامل اصلی افت توان نیروگاه‌های خورشیدی

ردیف	شهرستان	افت توان به دلیل موانع طبیعی(%)	افت توان به دلیل سطح تابش(%)	افت توان به دلیل دما ماژول(%)
۱	آستارا	۰/۶۴	۰/۶۹	۴/۴۸
۲	آستانه اشرفیه	۰/۴۷	۰/۸۷	۵/۷۴
۳	املش	۱/۸۷	۰/۶۹	۶/۳۴
۴	بندر انزلی	۰/۳۷	۰/۹۵	۵/۲۵
۵	تالش	۱/۶۴	۰/۶۲	۴/۶۸
۶	رشت	۰/۶۴	۰/۸۴	۵/۸۰
۷	رضوانشهر	۰/۵۸	۰/۷۴	۵/۸۹
۸	رودبار	۱/۸۷	۰/۴۶	۶/۷۵
۹	رودسر	۰/۸۵	۰/۷۰	۶/۳۳
۱۰	سیاهکل	۱/۰۸	۰/۷۶	۶/۰۵
۱۱	شفت	۰/۸۵	۰/۷۶	۵/۹۱
۱۲	صومعه‌سرا	۰/۷۱	۰/۷۹	۵/۷۲
۱۳	فومن	۰/۷۹	۰/۷۱	۵/۹۴
۱۴	لاهیجان	۰/۵۰	۰/۷۹	۶/۰۶
۱۵	لنگرود	۱/۰۴	۰/۷۱	۶/۱۸
۱۶	ماسال	۱/۰۴	۰/۶۹	۵/۸۶

ارزیابی تأثیرات محیط زیستی نیروگاه‌های خورشیدی در استان گیلان

جدول ۳ اطلاعات مربوط به میزان صرفه‌جویی در مصرف زغال‌سنگ (به کیلوگرم)، گاز طبیعی (به مترمکعب) و گازوئیل (به لیتر) را با استفاده از نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی در ظرفیت‌های مختلف برای ۱۶ شهرستان استان گیلان نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در هر سه سوخت، با افزایش ظرفیت نیروگاه، صرفه‌جویی به صورت خطی و متناسب افزایش می‌یابد، اما این کاهش در همه شهرستان‌ها روند یکنواختی ندارد. شهرستان رودبار بیشترین و بندر انزلی کمترین میزان صرفه‌جویی را ثبت کرده است که متناسب با عملکرد نیروگاه خورشیدی در این دو شهر می‌باشد. این داده‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در استان گیلان است که در ظرفیت‌های بالاتر صرفه‌جویی چشمگیری را ایجاد می‌کند.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که متناسب با کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی به صورت خطی با افزایش ظرفیت نیروگاه خورشیدی کاهش می‌یابد. در بین سوخت‌های فسیلی، گاز طبیعی بیشترین سهم را در تولید انرژی با انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر دارد، در حالی که زغال‌سنگ بالاترین میزان انتشار را دارد. این

داده‌ها نشان می‌دهند که توسعه نیروگاه‌های خورشیدی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود کیفیت محیط زیست داشته باشد.

ارزیابی شاخص‌های اقتصادی احداث نیروگاه‌های خورشیدی در استان گیلان

جدول ۵ بر اساس رابطه متقابل عملکرد سیستم، کاهش مصرف انرژی اولیه و اقتصاد، بخش‌هایی این تحقیق پتانسیل فنی-اقتصادی نیروگاه‌های خورشیدی را در آب و هوای استان گیلان ارزیابی و مقایسه می‌کند. در این مطالعه نرخ تنزیل و تورم به ترتیب ۲۳٪ و ۴۰٪ و هزینه نگهداری، هزینه تعمیر و جایگزینی قطعات و هزینه اسقاط به ترتیب ۱٪، ۰.۵٪ و ۲.۵٪ هزینه سرمایه گذاری اولیه نیروگاه در نظر گرفته شده است. جدول ۷ قیمت تجهیزات مورد نیاز احداث نیروگاه خورشیدی برای محاسبه هزینه سرمایه گذاری اولیه را نشان می‌دهد. شاخص‌های دوره بازپرداخت (PBP) و سود اوری سیستم (SPR) برای ظرفیت‌های مختلف نیروگاه‌های خورشیدی با در نظر گرفتن مولفه‌ها و متغیرهای بهینه، هزینه‌های اولیه و عملیاتی و طول عمر سیستم مقایسه شدند.

شکل ۳ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی با ظرفیت‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی، هزینه به ازای هر واحد ظرفیت (هزینه به ازای هر کیلووات) کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده صرفه‌جویی‌های مقیاس، کاهش هزینه‌های نصب به ازای هر کیلووات و بهره‌وری بالاتر نیروگاه‌های بزرگ‌تر است. نتایج نشان می‌دهد هزینه هر کیلووات برای نیروگاه ۱۰۰ کیلوواتی حدود ۱۲۶۶۰ ریال، ۲۵۰ کیلوواتی حدود ۱۱۲۰۰ ریال، ۵۰۰ کیلوواتی حدود ۱۱۰۰۰ ریال برای ۱ مگاواتی حدود ۱۰۵۰۰ ریال است. این کاهش هزینه نسبی در مقیاس‌های بزرگ‌تر می‌تواند سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های مگاواتی را جذاب‌تر کند.

جدول (۳) کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی

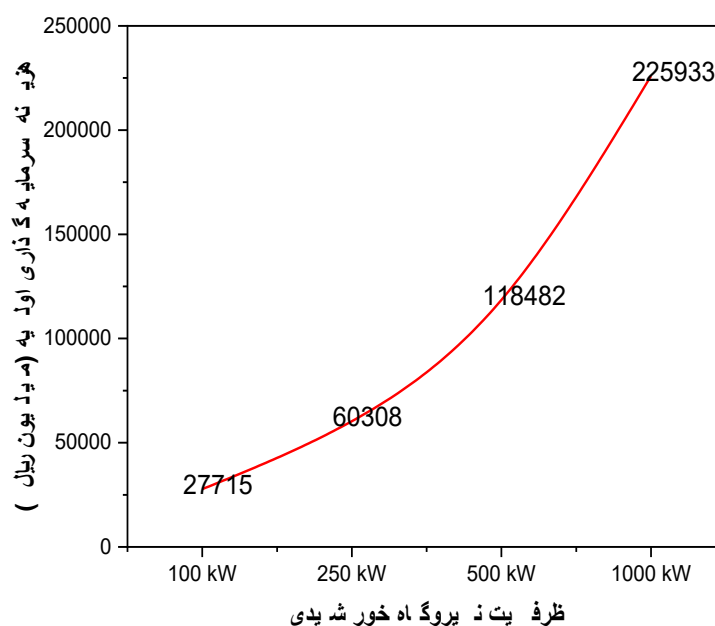
ردیف	شهرستان	گازوئیل (لیتر)				گاز طبیعی (مترمکعب)				زغال سنگ (تن)			
		۱ MW	۵۰۰kW	۲۵۰kW	۱۰۰kW	۱ MW	۵۰۰kW	۲۵۰kW	۱۰۰kW	۱ MW	۵۰۰kW	۲۵۰kW	۱۰۰kW
۱	آستارا	۱۵۴۸۶۰	۷۷۴۷۳	۳۹۰۷۸	۱۵۳۲۰	۴۰۳۱۶	۲۰۳۸۷۶	۱۰۲۸۳۷	۴۰۷۵۲۶	۱۱۸	۳۰۱	۵۹۶	۱۱۹۱
۲	آستانه اشرفیه	۱۳۶۱۱۰	۶۸۰۹۳	۳۴۳۴۸	۱۳۴۶۲	۳۵۴۲۶	۱۷۹۱۹۲	۹۰۳۸۹	۳۵۸۱۸۴	۱۰۴	۲۶۴	۵۲۴	۱۰۴۷
۳	املش	۱۵۱۶۲۰	۷۵۸۵۰	۳۸۲۶۰	۱۴۹۹۶	۳۹۴۶۳	۱۹۹۶۰۵	۱۰۰۶۸۴	۳۹۹۰۰۰	۱۱۵	۲۹۴	۵۸۳	۱۱۶۶
۴	بندر انزلی	۱۲۹۳۹۰	۶۴۷۳۲	۳۲۶۵۳	۱۲۷۹۷	۳۳۶۷۶	۱۷۰۳۷۴	۸۵۹۲۹	۳۴۰۵۰۰	۹۸	۲۵۱	۴۹۸	۹۹۵
۵	تالش	۱۶۰۹۸۰	۸۰۵۳۲	۴۰۶۲۱	۱۵۹۲۳	۴۱۹۰۳	۲۱۱۹۲۶	۱۰۶۸۹۷	۴۲۶۶۳۲	۱۲۲	۳۱۲	۶۱۹	۱۲۳۸
۶	رشت	۱۳۷۴۶۰	۶۸۷۶۷	۳۴۶۶۸	۱۳۵۹۶	۳۵۷۷۹	۱۸۰۹۶۶	۹۱۲۸۴	۳۶۱۷۳۷	۱۰۵	۲۶۷	۵۲۹	۱۰۵۷
۷	رضوانشهر	۱۴۶۹۳۰	۷۳۵۰۵	۳۷۰۷۷	۱۴۵۳۴	۳۸۲۴۷	۱۹۳۴۳۴	۹۷۵۷۱	۳۸۶۶۵۸	۱۱۲	۲۸۵	۵۶۵	۱۱۳۰
۸	رودبار	۱۸۰۶۴۰	۹۰۳۷۲	۴۵۵۸۳	۱۷۸۷۱	۴۷۰۲۹	۲۳۷۸۲۱	۱۱۹۹۵۵	۴۷۵۳۶۸	۱۳۷	۳۵۱	۶۹۵	۱۳۹۰
۹	رودسر	۱۴۹۵۲۰	۷۴۸۰۱	۳۷۷۳۱	۱۴۷۸۷	۳۸۹۱۳	۱۹۶۸۴۵	۹۹۲۹۲	۳۹۳۴۷۴	۱۱۴	۲۹۰	۵۷۵	۱۱۵۰
۱۰	سیاهکل	۱۴۴۴۵۰	۷۲۲۶۵	۳۶۴۵۲	۱۴۲۸۵	۳۷۵۹۲	۱۹۰۱۷۱	۹۵۹۲۶	۳۸۰۱۳۲	۱۱۰	۲۸۰	۵۵۶	۱۱۱۱
۱۱	شفت	۱۴۴۱۵۰	۷۲۱۱۲	۳۶۳۷۵	۱۴۲۵۷	۳۷۵۱۸	۱۸۹۷۶۸	۹۵۷۲۴	۳۷۹۳۴۲	۱۱۰	۲۸۰	۵۵۵	۱۱۰۹
۱۲	صومعه‌سرا	۱۴۲۳۶۰	۷۱۲۲۱	۳۵۹۲۵	۱۴۰۸۲	۳۷۰۵۸	۱۸۷۴۲۴	۹۴۵۳۹	۳۷۴۶۳۲	۱۰۸	۲۷۶	۵۴۸	۱۰۹۵
۱۳	فومن	۱۴۳۹۵۰	۷۲۰۱۳	۳۶۳۲۵	۱۴۲۳۷	۳۷۴۶۶	۱۸۹۵۰۸	۹۵۵۹۲	۳۷۸۸۱۶	۱۱۰	۲۷۹	۵۵۴	۱۱۰۷
۱۴	لاهیجان	۱۴۱۶۰۰	۷۰۸۴۶	۳۵۷۳۶	۱۴۰۰۵	۳۶۸۵۵	۱۸۶۴۲۷	۹۴۰۴۲	۳۷۲۶۵۸	۱۰۸	۲۷۵	۵۴۵	۱۰۸۹
۱۵	لنگرود	۱۴۳۶۰۰	۷۱۸۴۰	۳۶۲۳۷	۱۴۲۰۱	۳۷۳۷۱	۱۸۹۰۵۳	۹۵۳۶۱	۳۷۷۸۹۵	۱۰۹	۲۷۹	۵۵۳	۱۱۰۵
۱۶	ماسال	۱۵۱۴۲۰	۷۵۷۵۱	۳۸۲۱۰	۱۴۹۸۰	۳۹۴۲۱	۱۹۹۳۴۵	۱۰۰۵۵۳	۳۹۸۴۷۴	۱۱۵	۲۹۴	۵۸۳	۱۱۶۵

جدول (۴) کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

ردیف	شهرستان	گازوئیل (لیتر)				گاز طبیعی (مترمکعب)				زغال سنگ (تن)			
		۱ MW	۵۰۰kW	۲۵۰kW	۱۰۰kW	۱ MW	۵۰۰kW	۲۵۰kW	۱۰۰kW	۱ MW	۵۰۰kW	۲۵۰kW	۱۰۰kW
۱	آستارا	۱۳۹۴	۶۹۷	۳۵۲	۱۳۸	۹۲	۴۶۵	۲۳۴	۹۲۹	۱۸۴	۴۶۹	۹۳۰	۱۸۵۸
۲	آستانه اشرفیه	۱۲۲۵	۶۱۳	۳۰۹	۱۲۱	۸۱	۴۰۹	۲۰۶	۸۱۷	۱۶۲	۴۱۲	۸۱۷	۱۶۳۳
۳	املش	۱۳۶۵	۶۸۳	۳۴۴	۱۳۵	۹۰	۴۵۵	۲۳۰	۹۱۰	۱۸۰	۴۵۹	۹۱۰	۱۸۱۹
۴	بندر انزلی	۱۱۶۵	۵۸۳	۲۹۴	۱۱۵	۷۷	۳۸۸	۱۹۶	۷۷۶	۱۵۴	۳۹۲	۷۷۷	۱۵۵۳
۵	تالش	۱۴۴۹	۷۲۵	۳۶۶	۱۴۳	۹۶	۴۸۳	۲۴۴	۹۶۶	۱۹۱	۴۸۷	۹۶۶	۱۹۳۲
۶	رشت	۱۲۳۷	۶۱۹	۳۱۲	۱۲۲	۸۲	۴۱۳	۲۰۸	۸۲۵	۱۶۳	۴۱۶	۸۲۵	۱۶۵۰
۷	رضوانشهر	۱۳۲۲	۶۶۲	۳۳۴	۱۳۱	۸۷	۴۴۱	۲۲۲	۸۸۲	۱۷۴	۴۴۵	۸۸۲	۱۷۶۳
۸	رودبار	۱۶۲۶	۸۱۳	۴۱۰	۱۶۱	۱۰۷	۵۴۲	۲۷۳	۱۰۸۴	۲۱۴	۵۴۷	۱۰۸۴	۲۱۶۸
۹	رودسر	۱۳۴۶	۶۷۳	۳۴۰	۱۳۳	۸۹	۴۴۹	۲۲۶	۸۹۷	۱۷۷	۴۵۳	۸۹۸	۱۷۹۴
۱۰	سیاهکل	۱۳۰۰	۶۵۰	۳۲۸	۱۲۹	۸۶	۴۳۴	۲۱۹	۸۶۷	۱۷۱	۴۳۷	۸۶۷	۱۷۳۳
۱۱	شفت	۱۲۹۷	۶۴۹	۳۲۷	۱۲۸	۸۶	۴۳۳	۲۱۸	۸۶۵	۱۷۱	۴۳۷	۸۶۵	۱۷۳۰
۱۲	صومعه‌سرا	۱۲۸۱	۶۴۱	۳۲۳	۱۲۷	۸۴	۴۲۷	۲۱۶	۸۵۴	۱۶۹	۴۳۱	۸۵۵	۱۷۰۸
۱۳	فومن	۱۲۹۶	۶۴۸	۳۲۷	۱۲۸	۸۵	۴۳۲	۲۱۸	۸۶۴	۱۷۱	۴۳۶	۸۶۴	۱۷۲۷
۱۴	لاهیجان	۱۲۷۴	۶۳۸	۳۲۲	۱۲۶	۸۴	۴۲۵	۲۱۴	۸۵۰	۱۶۸	۴۲۹	۸۵۰	۱۶۹۹
۱۵	لنگرود	۱۲۹۲	۶۴۷	۳۲۶	۱۲۸	۸۵	۴۳۱	۲۱۷	۸۶۲	۱۷۰	۴۳۵	۸۶۲	۱۷۲۳
۱۶	ماسال	۱۳۶۳	۶۸۲	۳۴۴	۱۳۵	۹۰	۴۵۵	۲۲۹	۹۰۹	۱۸۰	۴۵۹	۹۰۹	۱۸۱۷

جدول (۵) قیمت تجهیزات نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی

ردیف	شرح کالا	واحد	قیمت (میلیون ریال)
۱	پنل خورشیدی ۵۵۰ وات	عدد	۶۸
۲	اینورتر ۵۰ کیلو واتی	عدد	۳۰۰۰
۳	اینورتر ۲۵۰ کیلو واتی	عدد	۵۰۰۰
۴	تابلو حفاظتی DC کوچک	عدد	۸۰
۵	تابلوهای DC اصلی	عدد	۳۰۰
۶	تابلوی AC کوچک	عدد	۷۰۰
۷	تابلو اصلی AC	عدد	۸۰۰
۸	استراکچر مخصوص	مجموعه	۲۷۵
۹	کابل DC مسی با مقطع 6 mm^2	متر	۰/۳۲
۱۰	کابل AC مسی با مقطع 25 mm^2	متر	۱/۲۴
۱۱	کابل AC اصلی مسی با مقطع 240 mm^2	متر	۲۳
۱۲	کانکتور دو به یک	عدد	۱/۹۵
۱۳	کانکتور یک به یک	عدد	۰/۵۲۵



شکل (۳) هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای ظرفیت‌های مختلف نیروگاه‌های خورشیدی

جدول ۶ دوره بازگشت سرمایه را برای نیروگاه‌های خورشیدی با ظرفیت‌های مختلف (۱۰۰ کیلووات، ۲۵۰ کیلووات، ۵۰۰ کیلووات و ۱ مگاوات) را در ۱۶ شهرستان استان گیلان نشان می‌دهد. این محاسبات بر اساس دو سناریوی اقتصادی انجام شده است: سناریوی اول مربوط به فروش برق تولیدشده به قیمت ۲۲۰۰۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت و سناریوی دوم مربوط به خرید برق از تابلوسبز بورس انرژی به عنوان جریمه با قیمت ۲۰ درصد بالاتر از قیمت فروش برق تجدیدپذیر با توجه به ماده ۱۶ قانون جهش توسعه دانش بنیان تجدیدپذیر در ارتباط با تامین ۵ درصد برق مورد نیاز صنایع از نیروگاه‌های تجدیدپذیر برای مشترکین با دیمانند بالای ۱ مگاوات تا سال ۱۴۰۵، می‌باشد. هدف از این تحلیل، بررسی اقتصادی بودن سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های خورشیدی در مناطق مختلف و در ظرفیت‌های متفاوت است. در هر دو سناریو، دوره بازگشت سرمایه برای نیروگاه‌ها بسته به ظرفیت و منطقه متفاوت است. به‌طور کلی، در تمامی مناطق، با افزایش ظرفیت نیروگاه خورشیدی، زمان بازگشت سرمایه کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در سناریوی دوم، دوره بازگشت سرمایه به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل اختلاف قیمت بین برق تولیدشده توسط نیروگاه خورشیدی و برق سبز خریداری‌شده از بورس است که سودآوری بیشتری را برای سرمایه‌گذار به همراه دارد. داده‌ها نشان می‌دهد که برخی مناطق مانند رودبار بهترین بازگشت سرمایه را دارند، به‌طوری که یک نیروگاه ۱ مگاواتی در آنجا تنها ۷.۴۵ سال (در مدل فروش به شبکه) و ۳.۷۲ سال (در مدل جایگزینی) نیاز دارد. در مقابل، مناطق مانند بندر انزلی بالاترین دوره بازگشت سرمایه را دارند (۱۰.۴۰ سال در مدل فروش و ۵.۲۰ سال در مدل جایگزینی). این تفاوت‌ها به دلیل شرایط اقلیمی به خصوص میزان تابش خورشیدی در مناطق مختلف است.

مقادیر ارائه شده در جدول ۷، شاخص سودآوری سیستم (SP) را نشان می‌دهد که هر چه این شاخص بیشتر باشد، سودآوری پروژه بالاتر است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در هر دو سناریو، با افزایش ظرفیت نیروگاه، نرخ سودآوری نیز افزایش می‌یابد، در حالی که در سناریوی دوم، نرخ سودآوری به دلیل نرخ فروش بالاتر برق سبز به صنایع به‌طور قابل‌توجهی بالاتر است. نتایج نشان می‌دهد که دلیل میزان تابش خورشیدی متفاوت در بین مناطق مختلف استان گیلان، تفاوت قابل‌توجهی در شاخص سودآوری سیستم نیروگاه‌های خورشیدی در شهرستان‌های این استان وجود دارد به‌طوری که این شاخص در مناطق جنوبی‌تر استان گیلان از جمله رودبار به دلیل میزان تابش بیشتر خورشید بیشتر، بالاتر است. در مقابل، شاخص سودآوری سیستم در مناطقی مانند بندر انزلی به دلیل میزان تابش خورشیدی کمتر و سطح تابش خورشیدی پراکنده بیشتر، پایین‌ترین مقدار خود را دارد.

جدول (۶) دوره بازگشت سرمایه

ردیف	شهرستان	صنایع				نیروگاه		
		kW۱۰۰	kW۲۵۰	kW۵۰۰	MW۱	kW۱۰۰	kW۲۵۰	kW۵۰۰
۱	آستارا	۵/۲۹	۴/۵۹	۴/۵۵	۴/۳۴	۱۰/۵۸	۹/۱۸	۹/۱۰
۲	آستانه اشرفیه	۶/۰۲	۵/۲۲	۵/۱۸	۴/۹۴	۱۲/۰۴	۱۰/۴۴	۱۰/۳۵
۳	املش	۵/۴۱	۴/۶۹	۴/۶۵	۴/۴۴	۱۰/۸۱	۹/۳۷	۹/۲۹
۴	بندر انزلی	۶/۳۳	۵/۴۹	۵/۴۴	۵/۲۰	۱۲/۶۷	۱۰/۹۸	۱۰/۸۹
۵	تالش	۵/۰۹	۴/۴۱	۴/۳۸	۴/۱۸	۱۰/۱۸	۸/۸۳	۸/۷۵
۶	رشت	۵/۹۶	۵/۱۷	۵/۱۲	۴/۸۹	۱۱/۹۲	۱۰/۳۴	۱۰/۲۵
۷	رضوانشهر	۵/۵۸	۴/۸۴	۴/۷۹	۴/۵۸	۱۱/۱۶	۹/۶۷	۹/۵۹
۸	رودبار	۴/۵۴	۳/۹۳	۳/۹۰	۳/۷۲	۹/۰۷	۷/۸۷	۷/۸۰
۹	رودسر	۵/۴۸	۴/۷۵	۴/۷۱	۴/۵۰	۱۰/۹۶	۹/۵۱	۹/۴۲
۱۰	سیاهکل	۵/۶۷	۴/۹۲	۴/۸۸	۴/۶۶	۱۱/۳۵	۹/۸۴	۹/۷۵
۱۱	شفق	۵/۶۹	۴/۹۳	۴/۸۹	۴/۶۷	۱۱/۳۷	۹/۸۶	۹/۷۷
۱۲	صومعه‌سرا	۵/۷۶	۴/۹۹	۴/۹۵	۴/۷۲	۱۱/۵۱	۹/۹۸	۹/۹۰
۱۳	فومن	۵/۶۹	۴/۹۴	۴/۸۹	۴/۶۷	۱۱/۳۹	۹/۸۷	۹/۷۹
۱۴	لاهیجان	۵/۷۹	۵/۰۲	۴/۹۷	۴/۷۵	۱۱/۵۸	۱۰/۰۴	۹/۹۵
۱۵	لنگرود	۵/۷۱	۴/۹۵	۴/۹۱	۴/۶۸	۱۱/۴۲	۹/۹۰	۹/۸۱
۱۶	ماسال	۵/۴۱	۴/۶۹	۴/۶۵	۴/۴۴	۱۰/۸۲	۹/۳۹	۹/۳۰

جدول (۷) شاخص سودآوری سیستم

ردیف	شهرستان	صنایع				نیروگاه		
		kW۱۰۰	kW۲۵۰	kW۵۰۰	MW۱	kW۱۰۰	kW۲۵۰	kW۵۰۰
۱	آستارا	۱/۵۲	۱/۹۴	۱/۹۷	۲/۱۲	۰/۳۰	۰/۵۳	۰/۵۴
۲	آستانه اشرفیه	۱/۱۹	۱/۵۶	۱/۵۸	۱/۷۱	۰/۱۲	۰/۳۲	۰/۳۳
۳	املش	۱/۴۶	۱/۸۷	۱/۹۰	۲/۰۵	۰/۲۷	۰/۴۹	۰/۵۹
۴	بندر انزلی	۱/۰۷	۱/۴۲	۱/۴۵	۱/۵۷	۰/۰۵	۰/۲۴	۰/۲۵
۵	تالش	۱/۶۳	۲/۰۶	۲/۰۹	۲/۲۵	۰/۳۶	۰/۵۹	۰/۶۱
۶	رشت	۱/۲۲	۱/۵۹	۱/۶۱	۱/۷۴	۰/۱۳	۰/۳۳	۰/۳۵
۷	رضوانشهر	۱/۳۸	۱/۷۸	۱/۸۰	۱/۹۵	۰/۲۲	۰/۴۴	۰/۴۵
۸	رودبار	۱/۹۷	۲/۴۶	۲/۴۹	۲/۶۷	۰/۵۵	۰/۸۱	۰/۸۳
۹	رودسر	۱/۴۳	۱/۸۳	۱/۸۶	۲/۰۰	۰/۲۴	۰/۴۷	۰/۴۸
۱۰	سیاهکل	۱/۳۴	۱/۷۳	۱/۷۵	۱/۸۹	۰/۲۰	۰/۴۱	۰/۴۲
۱۱	شفق	۱/۳۳	۱/۷۲	۱/۷۵	۱/۸۹	۰/۱۹	۰/۴۱	۰/۴۲
۱۲	صومعه‌سرا	۱/۳۰	۱/۶۸	۱/۷۱	۱/۸۵	۰/۱۸	۰/۳۹	۰/۴۰
۱۳	فومن	۱/۳۳	۱/۷۲	۱/۷۴	۱/۸۸	۰/۱۹	۰/۴۰	۰/۴۲
۱۴	لاهیجان	۱/۲۹	۱/۶۷	۱/۶۹	۱/۸۳	۰/۱۷	۰/۳۸	۰/۳۹
۱۵	لنگرود	۱/۳۲	۱/۷۱	۱/۷۴	۱/۸۷	۰/۱۹	۰/۴۰	۰/۴۱
۱۶	ماسال	۱/۴۶	۱/۸۷	۱/۹۰	۲/۰۴	۰/۲۶	۰/۴۹	۰/۵۰

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک ارزیابی جامع بر روی پتانسیل فنی-اقتصادی نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی و تاثیر آن‌ها در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در شرایط اقلیمی استان گیلان انجام شد. در این تحقیق از نرم افزار PVsyst و داده‌های آب و هوای پایگاه داده اقلیمی ناسا برای تحلیل پارامتری، شبیه سازی عملکرد و بهینه‌سازی این نیروگاه‌ها استفاده شد. سپس، پتانسیل فنی-اقتصادی-محیط زیستی نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی از طریق جزیه و تحلیل حساسیت، ارزیابی انرژی، و تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد:

تنوع اقلیمی استان گیلان بر کارایی نیروگاه‌های خورشیدی تأثیرگذار است. در این تحقیق، تابش خورشیدی، دمای محیط، رطوبت نسبی و سرعت باد بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد رودبار با 1861 kWh/m^2 بالاترین تابش کلی را دارد، در حالی که بندر انزلی با 1384 kWh/m^2 کمترین میزان را ثبت کرده است. همچنین، تابش پراکنده در بیشتر مناطق بین 40% تا 60% است که باید در طراحی نیروگاه‌ها لحاظ شود. دمای متوسط سالانه بین 10°C (تالش) تا 17°C (بندر انزلی) متغیر است. و دمای بالا می‌تواند راندمان پنل‌ها را کاهش دهد. رطوبت نسبی بین 68% (رودبار) تا 74% (تالش و آستارا) و سرعت باد بین 1.51 متر بر ثانیه (آستارا) تا 3.14 متر بر ثانیه (آستانه اشرفیه) متغیر است. باد در آستانه اشرفیه و بندر انزلی به خنک‌سازی کمک می‌کند، اما نیاز به سازه‌های مقاوم‌تر دارد.

زاویه بهینه پنل‌های خورشیدی در استان گیلان بین 30 تا 34 درجه است که با عرض جغرافیایی منطقه سازگار بوده اما به دلیل شرایط اقلیمی کمی کمتر از مقدار تئوریک است. بیشینه تابش خورشیدی در رودبار با 2166 kWh/m^2 بالاترین و در بندر انزلی با 1515 kWh/m^2 کمترین مقدار را دارد. رودبار، تالش و آستارا بهترین گزینه‌ها برای نیروگاه‌های خورشیدی هستند، در حالی که بندر انزلی و آستانه اشرفیه به دلیل پوشش ابری کمتر مناسب‌اند. شهرستان‌های رشت، لاهیجان، لنگرود و فومن عملکردی متوسط دارند. افزایش ظرفیت نیروگاه‌ها به‌طور خطی تولید انرژی را افزایش می‌دهد.

عوامل اصلی افت توان نیروگاه‌های خورشیدی در گیلان شامل دمای مازول، سطح تابش و موانع طبیعی است. افت توان ناشی از دمای مازول بیشترین تأثیر را دارد و در تمام شهرستان‌ها بالای 4% است. رودبار با 6.75% بیشترین و آستارا با 4.48% کمترین افت توان ناشی از دما را دارد. افت توان ناشی از سطح تابش بین 46% (رودبار) تا $95/0\%$ (بندر انزلی) و افت توان ناشی از موانع طبیعی بین 37% (بندر انزلی) تا $1/87\%$ (املش و رودبار) متغیر است. این داده‌ها نشان‌دهنده تأثیر بیشتر دما نسبت به سایر عوامل در کاهش کارایی نیروگاه‌های خورشیدی هستند.

استفاده از نیروگاه‌های خورشیدی در گیلان موجب صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های حرارتی و ژنراتورها مانند زغال‌سنگ، گاز طبیعی و گازوئیل شده و با افزایش ظرفیت نیروگاه، این صرفه‌جویی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. رودبار بیشترین و بندر انزلی کمترین میزان صرفه‌جویی را دارد. همچنین، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. گاز طبیعی کمترین و زغال‌سنگ بیشترین میزان انتشار را دارد. افزایش ظرفیت نیروگاه‌ها به‌صورت خطی انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد. گاز طبیعی کمترین و زغال‌سنگ بیشترین انتشار را دارد. توسعه نیروگاه‌های خورشیدی می‌تواند وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کم کرده و به بهبود محیط زیست کمک کند.

با افزایش ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی، هزینه تولید برق به ازای هر کیلووات کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده صرفه‌جویی مقیاس و بهره‌وری بیشتر نیروگاه‌های بزرگ‌تر است. شاخص‌های اقتصادی دوره بازگشت سرمایه و سودآوری سیستم در دو سناریو (فروش برق به قیمت 22000 ریال/کیلووات‌ساعت و جایگزینی با برق سبز بورس با 20% قیمت بالاتر) محاسبه شده است. دوره

بازگشت سرمایه بسته به ظرفیت و منطقه متفاوت است. با افزایش ظرفیت، دوره بازگشت کاهش می‌یابد که این کاهش در سناریوی دوم به میزان قابل توجهی بیشتر می‌باشد. رودبار کمترین دوره بازگشت سرمایه را دارد (۷/۴۵ سال در سناریو اول و ۳/۷۲ سال در سناریو دوم)، در حالی که بندر انزلی بیشترین زمان بازگشت را ثبت کرده است (۱۰.۴۰ و ۵.۲۰ سال). شاخص سودآوری سیستم نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت نیروگاه، سودآوری نیز افزایش می‌یابد، در حالی که در سناریوی دوم، این شاخص به دلیل نرخ فروش بالاتر برق سبز به صنایع به طور قابل توجهی بیشتر است. این شاخص در مناطق جنوبی گیلان مانند رودبار، به دلیل تابش خورشیدی بیشتر، بالاترین مقدار را دارد، در حالی که در بندر انزلی، به دلیل تابش کمتر و پراکندگی بیشتر، پایین‌ترین مقدار ثبت شده است.

فهرست علائم

طول عمر سیستم	Lf	مساحت پنل	Ac
شاخص نگهداری	mn	ضریب عملکرد	CF
قیمت انرژی اولیه	Pt	ضریب تبدیل مخصوص سوخت	Cfuel
دوره بازگشت سرمایه	PBP	هزینه سرمایه گذاری	Cinv
انرژی اولیه ذخیره شده	Qsave	انرژی تولید شده در نیروگاه	Egrid
نسبت عملکرد	PR	ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای	EFgrid
شاخص تعمیرات	r	ظرفیت اسمی نیروگاه	Enom
سودآوری سیستم	SP	مقدار انرژی اولیه ذخیره شده	Fsaved
زمان	T	تابش خورشیدی رو سطح شیبدار	GT
بازده پنل خورشیدی	η module	شاخص کاهش گازهای گلخانه ای	GHGReduced
		نرخ بهره واقعی	i

منابع

اسلامی اندارگلی، مجید و روازدرژ، فردانه (۱۳۹۳). واکاوی موانع اقتصادی عدم توسعه نیروگاههای فتوولتاییک در کشور، اولین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی انرژی خورشیدی، تهران، حافظی، رضا و رحیمی راد، زهره . (۱۴۰۳). مشارکت اجتماعی و نقش آن در حل چالش ناترازی انرژی. مطالعات راهبردی سیاستگذاری عمومی، ۱۴(۵۲)، ۸۲-۱۰۲. doi: 10.22034/sspp.2024.2036820.3688

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 قالهری، غلامعباس واسدی، مهدی وانتظاری، علیرضا (۱۳۹۴). ناحیه بندی آب و هوایی استان گیلان با روش های چند متغیره، نشریه: جغرافیا و برنامه ریزی، دوره: ۱۹، شماره ۵۴، صفحات ۲۳۵-۲۵۱

Ahmadi, M., & Hadi, K. (2018). Assessment of solar radiation potential in Iran for photovoltaic applications. Proceedings of the International Renewable Energy Conference. Civilica. Retrieved from <https://civilica.com/doc/697376>.

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.

- Dong, C., Zhong, Q. (2025). Evaluating solar photovoltaic potential of buildings based on the installation parameters of photovoltaic modules, *Solar Energy*, Volume 288, 113304.
- Global Solar Atlas, 2025. [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map>.
- 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.
- Hakemzadeh, M. H., Sopian, K., Kazem, H. A., Al-Waeli, A. (2024). 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, 112304.
- Hakemzadeh, M.H., Ibrahim, A., Sopian, K., Abd Hamid, A.S., Jarimi, H. (2023). Incorporating theoretical and practical approaches to assess the amount of sunlight captured by a tilted surface in a tropical climate, *Heliyon*, Volume 9, Issue 3, e14661,
- 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/>
- 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. Retrieved from <https://jgst.issgeac.ir/article-1-842-fa.html>
- Kumar Sahoo, S. (2016). Renewable and sustainable energy reviews solar photovoltaic energy progress in India: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 59, Pages 927-939.
- NASA. (n.d.). Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER). NASA Langley Research Center. Retrieved Jan 4, 2025, from <https://power.larc.nasa.gov>
- 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.
- 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>
- 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.
- 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