



Solar power plants feasibility study and evaluating technical, environmental and economic issues in PVsyst software (case of Guilan province)

Ali Ahmadi Orkomi^{1✉} | Golnoush Shafieiyoun²

1. Corresponding Author, Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Someh Sara, Guilan, Iran. E-mail: orkomi@guilan.ac.ir
2. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Someh Sara, Guilan, Iran. E-mail: golnooshsh4@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 13 December 2024

Received in revised form 25 January 2025

Accepted 28 January 2025

Published online 01 July 2025

Keywords:

*Environmental assessment,
Guilan province,
Prioritization,
PVsyst software,
Solar energy.*

ABSTRACT

The limited resources of fossil fuels and their environmental impacts have increased solar energy's role in electricity generation. This study analyzes climatic data from the past twenty years to rank cities in Guilan province for solar power plant development. Using PVsyst software, technical, economic, and environmental assessments were conducted. The TOPSIS and SAW methodologies identified Jirandeh, Manjil, and Bandar Anzali as the top candidates, with estimated electricity production capacities of 1427, 1196, and 1156 Kwh/Kw, and efficiencies of 16%, 14%, and 13%, respectively. Each location requires a capital investment of approximately 2.34 million dollars, with projected CO₂ emissions reductions of 65.5, 53.3, and 51.4 thousand tons over 20 years. Although solar power plant efficiency in Guilan is lower than in central regions of the country, the province's tourism potential and distance from oil and gas refineries highlight the need for solar energy development. This research offers valuable insights for authorities on capital investments and site selection in Guilan province.

Cite this article: Ahmadi Orkomi, A., & Shafieiyoun, G. (2025). Solar power plants feasibility study and evaluating technical, environmental and economic issues in PVsyst software (case of Guilan province). *Journal of Natural Environment*, 78 (Monitoring and Management of Natural Environmental Pollutants), 169-183.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.386835.2736>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.386835.2736>

امکان سنجی تأسیس نیروگاه‌های خورشیدی و ارزیابی فنی، محیط‌زیستی و اقتصادی نیروگاه در نرم‌افزار PVsyst (مطالعه استان گیلان)

علی احمدی ارکمی^۱ | گلنوش شفیعپور^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، گیلان، ایران. رایانامه: orkomi@guilan.ac.ir

۲. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، گیلان، ایران. رایانامه: golnooshsh4@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	محدود بودن منابع سوخت فسیلی، عدم دسترسی آسان به آن و اثرات مخرب محیط‌زیستی سبب افزایش سهم انرژی خورشیدی در تولید برق در دهه‌های اخیر شده است. مطالعه حاضر با بهره‌گیری از آرشیو پارامترهای اقلیمی در طول دو دهه اخیر، شهرهای استان گیلان را از منظر پتانسیل تأسیس نیروگاه خورشیدی رتبه‌بندی کرده و ارزیابی‌های فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی را در نرم‌افزار PVsyst انجام داده است. نتایج اولویت‌بندی با روش‌های TOPSIS و SAW نشان داد که شهرهای جیرنده، منجیل و بندر انزلی دارای بیشترین پتانسیل تأسیس نیروگاه هستند. به علاوه، نتایج نرم‌افزار PVsyst نشان داد که میزان تولید برق در ایستگاه‌های جیرنده، منجیل و بندر انزلی به ترتیب برابر با ۱۴۲۷، ۱۱۹۶ و ۱۱۵۶ Kwh/Kw است. بازده کلی تأسیس نیروگاه در این ایستگاه‌ها نیز به ترتیب برابر با ۱۶، ۱۴ و ۱۳ درصد است. سرمایه اولیه مورد نیاز برابر با ۲/۳۴ میلیون دلار است و در مدت ۲۰ سال عمر پروژه نیز به ترتیب سبب کاهش انتشار ۶۵/۵، ۵۳/۳ و ۵۱/۴ هزار تن CO ₂ معادل می‌شوند. هر چند بازده تأسیس نیروگاه خورشیدی در استان گیلان اندکی کمتر از مناطق مرکزی کشور است، اما با توجه به ماهیت گردشگرپذیر بودن استان گیلان و دوری از پالایشگاه‌های نفت و گاز، تأسیس نیروگاه‌های خورشیدی در آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. نتایج این پژوهش می‌تواند مسئولین امر را در خصوص میزان سرمایه مورد نیاز و بهترین محل‌های اجزای پروژه در استان گیلان یاری رساند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۹	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰	
کلیدواژه‌ها: انرژی خورشیدی، ارزیابی محیط‌زیستی، استان گیلان، اولویت‌بندی، نرم‌افزار PVsyst.	

استناد: احمدی ارکمی، علی؛ و شفیعپور، گلنوش (۱۴۰۴). امکان سنجی تأسیس نیروگاه‌های خورشیدی و ارزیابی فنی، محیط‌زیستی و اقتصادی نیروگاه در نرم‌افزار

PVsyst (مطالعه استان گیلان). محیط زیست طبیعی، ۷۸ (ویژه‌نامه پایش و مدیریت آلاینده‌های محیط‌زیست طبیعی)، ۱۶۹-۱۸۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.386835.2736>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

امروزه، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، به‌عنوان راهکاری مؤثر در کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی و کاهش اثرات منفی بر محیط‌زیست مورد توجه محققین، سرمایه‌گذاران و سیاستمداران قرار گرفته است. انرژی‌های تجدیدپذیر در حال حاضر تنها ۱۱ درصد از مجموع انرژی اولیه جهان را تشکیل می‌دهند و پیش‌بینی می‌شود این نسبت تا سال ۲۰۷۰ به ۶۰ درصد افزایش یابد (Hossain and Badr, 2007). نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد حتی در منطقه خاورمیانه، که به‌عنوان قلب منابع سوخت‌های فسیلی جهان شناخته می‌شود، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق از یک درصد در سال ۲۰۰۸ به ۱۶ درصد در سال ۲۰۳۵ خواهد رسید (Li et al., 2012). با توجه به محدودیت منابع سوخت فسیلی و نگرانی‌های جهانی در خصوص کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش بازده جذب انرژی تجدیدپذیر بسیار حائز اهمیت است. رشد نامتعادل فعالیت‌های صنعتی و گسترش تمدن‌ها باعث افزایش استفاده از منابع فسیلی و در نتیجه افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو شده است، به‌طوری‌که غلظت گازهای گلخانه‌ای در دنیا و در طول قرن اخیر به بیش از ۴۰۰ پی‌پی‌ام افزایش یافته است. این افزایش سبب شیب مثبت تغییرات دمای زمین در چند دهه گذشته شده، که تقریباً دو برابر تغییرات دما در دوره‌های قبلی است (Orkomi, 2022). در بخش اثرات تغییر اقلیم بر انرژی مصرفی، Abbasizadeh و همکاران (۲۰۲۰) میزان نیاز انرژی گرمایشی و سرمایشی در کل ایران را تحت سناریوی A2 اقلیمی تا سال ۲۰۳۵ ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که انرژی گرمایشی حدود ۱۵-۸ درصد کاهش و انرژی سرمایشی در فصول گرم حدود ۲۶-۲۳ درصد افزایش خواهد یافت. نیروگاه‌های برق بزرگ‌ترین عامل انتشار گاز گلخانه‌ای هستند. برای نمونه، انتشار کربن مرتبط با بخش انرژی ایران با افزایش ۴۵۲ درصدی در ۳۰ سال گذشته پیوسته در حال افزایش بوده است (Zahedi et al., 2023). همچنین میزان کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در استان گیلان برابر با ۱۸/۵ میلیون تن معادل CO₂ در سال ۱۳۹۸ برآورد شد که بخش انرژی و مصرف سوخت‌های فسیلی بیشترین سهم (۹۴/۹ درصد جرمی) را در انتشار گازهای گلخانه‌ای استان داشت (Orkomi, 2022). از آنجا که انرژی خورشیدی به‌عنوان بزرگ‌ترین و پاک‌ترین منبع در میان انرژی‌های تجدیدپذیر شناخته می‌شود، نقش حیاتی در تأمین امنیت انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی در کشورها دارد. افزایش سرمایه‌گذاری در انرژی خورشیدی و تدوین سیاست‌های مناسب، نقش مهمی در بهبود امنیت انرژی و پایداری محیط‌زیست در ایران دارد (Badri et al., 2016). امروزه با کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بازدهی سیستم‌های برق خورشیدی، این سیستم‌ها به‌عنوان جایگزینی منحصر به‌فرد برای دیگر روش‌های تأمین انرژی شناخته می‌شوند (Kumar et al., 2017). فناوری‌های تولید برق از انرژی خورشیدی به سه دسته فتوولتائیک (PV)، سیستم‌های متمرکز کننده گرمایش خورشیدی و فناوری‌های نوظهور که شامل حوضچه‌ها و توربین‌های خورشیدی هستند، تقسیم می‌شوند. از بین این سه دسته، فناوری فتوولتائیک به‌دلایلی همچون عملکرد بی‌صدا و عدم نیاز به نگهداری طولانی‌مدت، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Agnolucci, 2007; Ruiz et al, 2008; Shams et al., 2013). براساس آمارهای جهانی، ظرفیت فتوولتائیک نصب‌شده در سراسر جهان در سال ۲۰۲۰ حدود ۷۰۰ گیگاوات بود که نسبت به سال ۲۰۱۹ با افزایش ۱۷ درصدی همراه بوده است (Zahedi et al., 2023).

اکثر نواحی ایران دارای میانگین انرژی تابشی بالاتر از ۳/۵ کیلووات در متر مربع هستند که نشان از موقعیت مناسب ایران در استفاده از انرژی خورشیدی است (Kazemi and MostafaeiPour, 2015). اگرچه به‌دلایلی همچون وجود منابع متعدد نفت و گاز در ایران و دسترسی به سوخت ارزان جهت تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی، تأسیس نیروگاه‌های خورشیدی در کشور رونق چندانی نداشته است. به‌طوری‌که در حال حاضر ظرفیت ثبت شده برق تجدیدپذیر در کشور حدود ۹۰۳ مگاوات است که از این میزان ۴۵۵ مگاوات به نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک اختصاص دارد که در حدود ۰/۵ درصد از برق تولیدی کشور را شامل می‌شود (Zahedi et al., 2023). اما تحقیقات زیادی در زمینه امکان‌سنجی استفاده از پنل‌های خورشیدی، تأسیس نیروگاه‌های خورشیدی و اثر آنها بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کشور انجام شده است. به‌عنوان نمونه، Vafaeipour و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از معیارهایی مانند تابش خورشید، ویژگی‌های زمین، فاصله تا شبکه انتقال، تقاضا برای مصرف و هزینه عملیات نگهداری، مناطق دارای بیشترین ظرفیت انرژی خورشیدی را شناسایی و اولویت‌بندی کردند و نشان دادند که مناطق مرکزی و جنوبی ایران، به‌ویژه استان‌هایی مانند یزد، کرمان و فارس، دارای بالاترین پتانسیل برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی هستند.

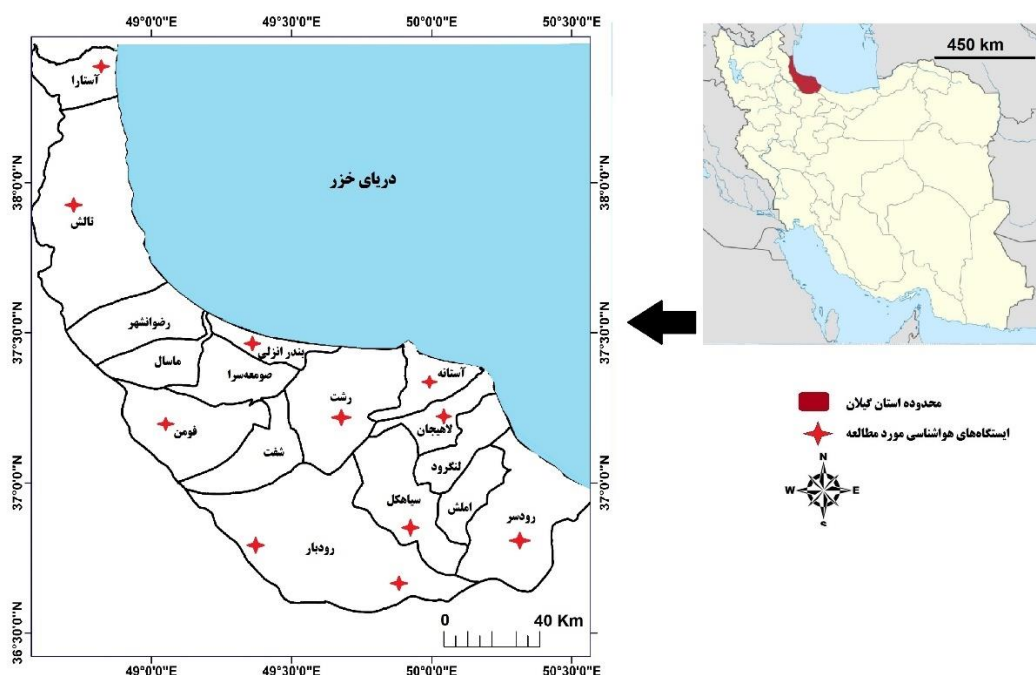
Zoghi و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان دادند که مناطق جنوبی و مرکزی ایران به دلیل دارا بودن بالاترین میزان تابش خورشیدی و زمین های مسطح، مناسب ترین مکان ها برای احداث نیروگاه های خورشیدی هستند. در پژوهشی دیگر، Salehi و Farhadi (۲۰۲۲) مزایای محیط زیستی تولید برق خورشیدی در مناطق خشک و نیمه خشک ایران را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که توسعه نیروگاه های خورشیدی می تواند به کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه ای منجر شود. همچنین، Rahimi و Ebrahimi (۲۰۲۴) امکان سنجی استفاده از سیستم های فتوولتائیک خورشیدی را در مناطق مرطوب شمال ایران مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که علی رغم میزان بالای رطوبت، استفاده از فناوری های جدید می تواند کارایی سیستم ها را افزایش دهد. نرم افزار PVsyst به دلیل ارائه نتایج سریع و دقیق، در بسیاری از مطالعات داخل و خارج کشور استفاده شده است (Shams *et al.*, 2013; Srivastava and Giri, 2017; Badri *et al.*, 2016). پروژه نیروگاه خورشیدی ۳۰۰ مگاواتی پارک خورشیدی قائد اعظم در پاکستان، پروژه نیروگاه خورشیدی ۱۰ مگاواتی در هند، نیروگاه خورشیدی ۱۱۵/۲ کیلوواتی در نپال، نیروگاه خورشیدی ۲۵۰ کیلوواتی در سوریه و نیروگاه خورشیدی یک مگاواتی در عراق، از جمله پروژه هایی در سراسر جهان و در شرایط آب و هوایی متفاوت هستند که با استفاده از نرم افزار PVsyst طراحی و به بهره برداری رسیده اند (Rawat *et al.*, 2020). همچنین Tur و همکاران (۲۰۱۸) تأثیرات شرایط اقلیمی و پارامترهای فنی بر عملکرد سیستم های فتوولتائیک را با استفاده از این نرم افزار مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهش دیگری، شبیه سازی نیروگاه خورشیدی شناور بر روی حوضچه های تصفیه فاضلاب توسط Arjmand و Tashakor (۲۰۲۳) در نرم افزار PVsyst انجام شده است. مطالعات متعددی نیز در خصوص بررسی اثر پارامترهای هواشناسی از جمله دمای هوا، سرعت باد، تعداد روزهای همراه با گرد و غبار، ساعات آفتابی، روزهای ابرناکی و مقدار تابش خورشیدی بر عملکرد پنل های خورشیدی انجام شده است (Phinikarides *et al.*, 2015; Tur *et al.*, 2018; Halwachs *et al.*, 2019; Memiche *et al.*, 2020).

استان گیلان به ویژه در بخش جنوبی، از پتانسیل تابش خورشیدی قابل توجهی برخوردار است. اکوسیستم حساس، دور بودن از پالایشگاه های نفت و گاز و وجود جنگل های هیرکانی در این منطقه، نیازمند رویکردی پایدار و متعهدانه برای افزایش ظرفیت تولید برق است؛ چرا که اثرات سوء انتشار کربن در چنین اکوسیستمی، نسبت به شهرهای صنعتی، بیشتر احساس می شود. ظرفیت های گردشگری استان و اکوسیستم حساس، لزوم حرکت به سمت انرژی های تجدیدپذیر را برجسته می سازد. به علاوه، میزان تابش عملی خورشید در استان گیلان از ۲۰۰۰ ساعت در سال فراتر می رود (Nourbakhsh, 2018; GPSIS, 2022; Roostanet, 2024). مطالعات موجود در زمینه تأسیس نیروگاه های خورشیدی، غالباً مناطق مرکزی کشور را مورد ارزیابی قرار داده اند که بیشترین میزان تابش های خورشیدی را دریافت می کنند. با این حال، پژوهش های محدودی به بررسی استان های شمالی، از منظر امکان سنجی و اولویت بندی برای تأسیس نیروگاه های خورشیدی پرداخته اند. علاوه بر این، در بسیاری از این مطالعات، تحلیل های فنی، اقتصادی و محیط زیستی به صورت جامع مورد توجه قرار نگرفته و یا صرفاً به شناسایی مناطق پتانسیل دار بسنده شده است. در این راستا، هدف از انجام پژوهش حاضر در وهله اول رتبه بندی شهرهای مختلف استان گیلان از منظر پتانسیل تأسیس نیروگاه های خورشیدی است و سپس به طراحی فنی، محیط زیستی و اقتصادی نیروگاه های ۵ مگاواتی در شهرهای دارای اولویت توسط نرم افزار PVsyst می پردازد تا عملاً بتواند هزینه های سرمایه گذاری ثابت و جاری در حوزه تولید برق خورشیدی در بهترین مکان های پیشنهادی استان گیلان را مشخص سازد.

روش شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه: استان گیلان دارای مساحت تقریبی ۱۴۰۴۴ کیلومتر مربع، از شمال به دریای خزر و از جنوب به رشته کوه های البرز محدود می شود. استان گیلان دارای آب و هوای هیرکانی است که به طور خاص مرطوب و سبز است. میانگین بارندگی سالانه در طول خط ساحلی بین ۱۲۰۰ تا ۱۸۰۰ میلی متر متغیر است. در طول دره سفیدرود، بادهای شدید تابستانی باعث کاهش بارندگی شده و مناطقی مانند رودبار و منجیل را به مناطقی شبه خشک تبدیل می کند (Bazin, 2012). طبق سرشماری سال ۱۳۹۵، با جمعیتی بالغ بر ۲۵۳۰۶۹۶ نفر، گیلان دهمین استان پرجمعیت کشور اعلام شد. تراکم جمعیت در این استان ۱۷۷ نفر در هر کیلومتر

مربع است و سومین استان از منظر شاخص تراکم جمعیت هست. ظرفیت اسمی تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی استان برابر با ۲۸۵۵ مگاوات است (Statistical Center of Iran, 2016). در شکل ۱ ایستگاه‌های مورد بررسی در استان گیلان جهت احداث نیروگاه خورشیدی با نمادهای قرمز علامت‌گذاری شده‌اند.



شکل ۱- شماتیک منطقه مورد مطالعه به انضمام ایستگاه‌های مورد بررسی جهت تعیین پتانسیل نیروگاه خورشیدی

جمع‌آوری داده‌ها: در این پژوهش پارامترهای دمای متوسط ماهانه و مجموع ساعات آفتابی و گرد و غبار در ماه در بازه ده سال اخیر از سالنامه آماری استان گیلان (GPSIS, 2022)، پارامترهای سرعت باد و ابرناکی به‌صورت میانگین ماهانه در طول بیست سال اخیر از سازمان هواشناسی استان گیلان (IMO, 2024) و سامانه شبکه روستایی ایران (Roostanet, 2024) و در نهایت میزان تابش آفتاب در گیلان به‌صورت میانگین ماهانه در پانزده سال گذشته با بهره‌گیری از نرم‌افزار PVGIS (PVGis, 2024) دریافت شدند. با توجه به حجم بالای داده‌ها برای هر ایستگاه، این داده‌ها در قالب فایل اکسل پیوست (پیوست ۱) ارائه شده است. پارامترهای هواشناسی و اقلیمی مؤثر بر میزان دریافت انرژی خورشیدی در یک محل و تأثیرگذار بر عملکرد پنل‌های خورشیدی، براساس مطالعات انجام شده در این زمینه تعیین شدند. در این راستا شاخص‌های دما، تعداد ساعات آفتابی، سرعت باد، ابرناکی، مقدار تابش خورشیدی و تعداد روزهای همراه با گرد و غبار انتخاب و نقش مثبت یا منفی بودن این شاخص‌ها بر بازده سیستم‌های خورشیدی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- شاخص‌های مؤثر بر عملکرد پنل‌های خورشیدی

ردیف	نام شاخص	نوع اثر
۱	تابش خورشیدی	مثبت
۲	دما	منفی
۳	تعداد روزهای آفتابی	مثبت
۴	سرعت باد	مثبت
۵	ابرناکی	منفی
۶	تعداد روزهای همراه با گرد و غبار	منفی

در سیستم‌های فتوولتائیک (PV)، یک رابطه معکوس بین دمای ماژول و توان خروجی آن وجود دارد (Liu et al, 2016); به این معنا که با افزایش دمای ماژول، توان خروجی کاهش می‌یابد (جدول ۱). با افزایش دمای محیط، دمای سلول‌ها نیز افزایش یافته و میزان رسانایی کریستال‌ها کاهش یافته و بازده آنها تا حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد (Koirala et al., 2009). همچنین، مقدار

گرد و غبار تجمع یافته روی سطح ماژول ها تأثیر منفی قابل توجهی بر انرژی تولید شده توسط سیستم های PV دارد. بررسی های انجام شده نشان می دهد که افت توان ناشی از گرد و غبار به نوع گرد و غبار، مدت زمان سپری شده از آخرین بارش و برنامه تمیزکاری ماژول ها وابسته است (Tur et al., 2018). علاوه بر این، با افزایش سرعت باد، پنل ها سریع تر خنک شده و کدر نتیجه کارایی و انرژی تولیدی آنها افزایش می یابد. در مقابل، روزهای ابری تأثیر منفی بر عملکرد پنل ها دارند و به تبع آن تولید انرژی نیز کاهش پیدا می کند. برخلاف روزهای ابری، تعداد روزهای آفتابی تأثیر مثبت و مستقیمی بر بازدهی سیستم های PV دارند (Kazemi and Mostafaeipour, 2015).

ارزیابی و وزن دهی شاخص ها: یک مسئله تصمیم گیری با m گزینه و n معیار می تواند در ماتریسی به صورت $m \times n$ بیان می شود. هر یک از شاخص های کمی دارای مقیاس اندازه گیری خاص خود هستند. بنابراین، لازم است به طریقی آنها را بی بعد نمود. پس از بی مقیاس سازی مقادیر مربوط به هر شاخص، بایستی اهمیت نسبی شاخص ها نسبت به یکدیگر مشخص شود. به منظور امتیازدهی و یا اولویت بندی شاخص ها، از روش آنتروپی شانون استفاده شده است. در این روش هرچه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است (Momeni, 2010). محاسبه وزن شاخص ها در این روش در روابط (۱) تا (۴) ارائه شده است.

$$p_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (1)$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m [p_{ij} \ln p_{ij}] \quad (2)$$

$$d_j = 1 - E_j \quad (3)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (4)$$

که در آن a_{ij}, p, k, E, d, w به ترتیب مقدار شاخص j برای گزینه i ، مقدار نرمال شده از روش ساعتی، مقدار ثابت $1/\ln(m)$ ، مقدار آنتروپی، درجه انحراف آنتروپی شانون و وزن شاخص مورد نظر است.

مدل های تصمیم گیری: در مطالعه حاضر جهت اولویت بندی گزینه های مورد نظر در تعیین محل های دارای پتانسیل تأسیس نیروگاه خورشیدی، از روش های Simple Additive Weighting (SAW) استفاده شده است (Asgharpour, 2023). روش TOPSIS یکی از روش های تصمیم گیری چند معیاره است که براساس مقایسه گزینه ها با راه حل های ایده آل و غیر ایده آل عمل می کند. در این روش، گزینه ای که کمترین فاصله را با راه حل ایده آل و بیشترین فاصله را با راه حل غیر ایده آل دارد، به عنوان بهترین گزینه انتخاب می شود. در این روش، ابتدا ماتریس بی مقیاس به روش نرم^۱، از طریق نسبت مقدار a_{ij} به جذر مجموع مربعات مقادیر a_{ij} برای همه گزینه ها تهیه می شود و سپس ماتریس قطری اوزان شاخص ها تهیه می شود. در مرحله سوم، از حاصل ضرب ماتریس بی مقیاس به روش نرم در ماتریس قطری وزن ها، ماتریس بی مقیاس موزون به دست می آید. پس از تعیین ماتریس بی مقیاس موزون، راه حل های ایده آل مثبت و ایده آل منفی با استفاده از رابطه (۵) تعیین می شوند.

$$\begin{aligned} d_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} & d_j^+ &: \text{فاصله تا ایده آل مثبت} \\ d_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} & d_j^- &: \text{فاصله تا ایده آل منفی} \end{aligned} \quad (5)$$

محاسبه نزدیکی گزینه ها به صورت $CL_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}$ مشخص می شود. هرچه CL_i^* برای یک گزینه بیشتر باشد، آن گزینه در اولویت انتخاب برای تأسیس نیروگاه خورشیدی قرار می گیرد. روش SAW که یکی دیگر از روش های تصمیم گیری چندمعیاره است، با جمع کردن امتیازهای وزن دهی شده به هر شاخص، گزینه ها را اولویت بندی می کند (Kazemi and MostafaeiPour, 2015). پس از محاسبه وزن شاخص ها و ماتریس نرمال شده به روش خطی، انتخاب بهترین گزینه انجام می شود. جزئیات کامل تر از روش های تصمیم گیری مذکور، در مقالات مرتبط (Mohammad Moradi and Akhtarkavan, 2009; Momeni, 2010) قابل مشاهده است.

^۱Norm

نرم‌افزار PVsyst: این نرم‌افزار می‌تواند برای محاسبات فنی، محیط‌زیستی و اقتصادی مربوط به کاربردهای فتوولتائیک استفاده شود. مواردی همچون پارامترهای اقلیمی منطقه مورد مطالعه، هزینه‌ها و اعتبارات اولیه پروژه، هزینه‌های جاری، درآمد فروش برق، مالیات بر تجهیزات و درآمد و آثار محیط‌زیستی در این نرم‌افزار در نظر گرفته می‌شود. در نهایت مقادیر انرژی تولید شده و تزریق شده به شبکه، اتلاف انرژی در بخش‌های مختلف و زمان برگشت سرمایه را محاسبه می‌کند. در مطالعه حاضر از نرم‌افزار PVsyst (V7.1.0) استفاده شده است. پارامترهای اقلیمی وارد شده به نرم‌افزار شامل شدت تابش خورشیدی، دمای محیط، سرعت باد و رطوبت نسبی است که مستقیماً بر عملکرد و بهره‌وری سیستم‌های خورشیدی تأثیر می‌گذارند. نرم‌افزار PVsyst از منابع مختلفی برای دستیابی به داده‌های اقلیمی استفاده می‌کند. این منابع شامل بانک‌های اطلاعاتی معتبر و گسترده‌ای هستند که اطلاعات دقیق و به‌روزی از پارامترهای اقلیمی ارائه می‌دهند. برخی از مهم‌ترین این منابع عبارتند از: NASA-Meteonorm، PVGIS (Photovoltaic Geographical و SolarGIS، SSE (Surface meteorology and Solar Energy Information System (PVsyst.com). به دلیل استفاده از نسخه PVsyst (V7.1.0) برخی از منابع مذکور داده‌های به‌روز را در اختیار قرار نمی‌دهند. از طرفی منابعی مانند Meteonorm فاقد اطلاعات دقیق و به‌روز برای مناطقی مانند ایران است. بنابراین در این مطالعه، پارامترهای اقلیمی مورد نیاز در نرم‌افزار PVsyst، به‌صورت دستی و با بهره‌گیری از آمار اخذ شده از سازمان‌های مرتبط به فرمت مد نظر نرم‌افزار ایجاد و در بخش Database نرم‌افزار (databases/Synthetic Data generation) وارد شد.

اجزای سیستم فتوولتائیک: در این تحقیق برند سلول‌های خورشیدی از یک شرکت ایرانی انتخاب شده است (جدول ۳). در انتخاب توان سلول‌ها باید به مواردی مانند قیمت هر وات، مساحت اشغال‌شده، سهولت تعمیر و نگهداری، کاهش اتصالات سلول‌ها، کاهش وزن پنل و روند انتخاب نیروگاه‌های جهان توجه داشت (Shams et al., 2013). برای نیروگاه پنج مگاواتی مورد نظر، اینورترهای شرکت Fronius International در کشور جمهوری چک انتخاب گردید. پارامترهای قیمت، قابلیت دسترسی در بازار ایران و محدودیت‌های ولتاژی در انتخاب نوع و توان اینورترها در این پژوهش مؤثر بود. زاویه بهینه نصب پنل‌ها، شیبی است که در طول سال بیشترین انرژی ممکن را تولید می‌کند (Awasthi et al., 2018). این زاویه توسط نرم‌افزار PVsyst برای شهرهای مختلف استان گیلان در محدوده ۳۰ تا ۳۳ درجه محاسبه شده است. برخی تلفات در نظر گرفته شده سیستم فتوولتائیک در پژوهش حاضر، به‌صورت پیش‌فرض وارد شد. تلفات سایه‌زنی ناشی از گرد و غبار برابر با دو درصد در نظر گرفته شده است که براساس درصد روزهای غبارآلود در شهرهای مورد مطالعه در نرم‌افزار PVsyst تعیین شد. مقدار محاسبه‌شده برای همه ایستگاه‌های مورد مطالعه کمتر از دو درصد بود. همچنین افت عملکرد سالانه سیستم فتوولتائیک و در دسترس نبودن آن به‌ترتیب برابر با یک و ۱/۷ درصد فرض شد (Shams et al., 2013; Badri et al., 2016).

مشخصه‌های اقتصادی: در روش‌های تحلیل مالی، تغییر ارزش زمانی پول در قالب درصدهایی نمایش داده می‌شود که ارزش یک سال را نسبت به سال دیگر مقایسه می‌کند. این درصد به‌عنوان نرخ تنزیل یا بازده مورد انتظار سرمایه‌گذار شناخته می‌شود (Zahedi et al., 2023). ارزش حال خالص پروژه، که اختلاف بین منافع و هزینه‌های پروژه با در نظر گرفتن توزیع زمانی آنها و براساس نرخ تنزیل موردنظر است، به‌عنوان معیاری برای توجیه‌پذیری طرح مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zahedi et al., 2023). در این مطالعه، با توجه به مبنای محاسبات دلاری، نرخ تورم ناچیز، نرخ تنزیل سالانه پنج درصد و مدت زمان بهره‌برداری از پروژه نیز ۲۰ سال فرض شد. طبق مصوبه سال ۱۴۰۱ سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، هزینه اجاره زمین برای نیروگاه‌های بالای یک مگاوات رایگان و واگذاری زمین از منابع طبیعی در نظر گرفته شده است (REEEO, 2024). تأمین نیمی از سرمایه‌گذاری اولیه از طریق تسهیلات بانکی با بازپرداخت ۷ سال و نرخ سود ۵ درصد (حساب ارزی) فرض شد. سایر مشخصه‌ها و تنظیمات، متناسب با سایت مورد نظر در نرم‌افزار وارد شده و نتایج آنها در ادامه ارائه شده است. هزینه هر عدد اینورتر ۵۲۵۰ دلار و هر ماژول برند تابان ۱۵۰ دلار است (Taban Energy, 2024). هزینه‌های تحقیقات و متخصصان معادل ۳۹۰۰ دلار و هزینه احداث و نصب پنل‌ها و تجهیزات ۲۰۳۴۱۸۵۰ دلار برآورد شده است. همچنین، حقوق سالانه کارکنان ۱۲۰۰۰ دلار و هزینه نگهداری و تمیز کردن پنل‌ها ۸۳ دلار در سال تعیین شده است. قیمت فروش برق به‌ازای تولید هر کیلووات ساعت برق با توجه به مصوبه شورای اقتصاد در تاریخ ۱۴۰۰/۱۲/۰۸ برابر با ۰/۰۶۸ دلار فرض شد (LRPI, 2022).

یافته های پژوهش

پارامترهای اقلیمی تأثیرگذار بر عملکرد پنل های خورشیدی در ۱۱ ایستگاه استان گیلان، پس از جمع آوری و تحلیل آماری، در جدول ۲ ارائه شده است. همان گونه که در روش کار گفته شد، در این تحقیق از روش آنتروپی شاتون جهت وزن دهی به معیارها استفاده شد. بر این اساس تعداد ۱۱ گزینه (m) و پنج معیار (n) در مطالعه حاضر وجود داشت. لازم به ذکر است که پارامتر تعداد روزهای همراه با گرد و غبار به دلیل تعداد روزهای ناچیز دارای گرد و غبار در استان گیلان، از فرآیند وزن دهی حذف شد. با استفاده از داده های جدول ۲، وزن دهی پارامترهای مؤثر بر عملکرد نیروگاه خورشیدی براساس ماتریس $m \times n$ انجام شد. وزن پارامترهای مؤثر در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- پارامترهای اقلیمی مربوطه به ایستگاه های هواشناسی استان گیلان

شهر	دما (°C) (متوسط ماهانه)	ساعات آفتابی (متوسط مجموع سالانه)	روزهای همراه با گرد و غبار (متوسط مجموع ماهانه)	تابش خورشیدی (kwh/m ²) (متوسط ماهانه)	سرعت باد (متوسط ماهانه)	ابرناکی (متوسط ماهانه)
آستارا	۱۶/۲۳۸	۱۹۴۵/۵۷	۱/۳	۱۱۲/۰۰۴	۱/۴	۴/۵
کیاشهر	۱۷/۵۴۷	۱۸۹۰/۳۶	۰/۸	۱۱۸/۳۰۹	۱/۸	۴/۴
انزلی	۱۷/۵۶۱	۱۹۶۸/۵۱	۰/۹	۱۱۶/۳۵۵	۲/۸	۴/۶
دیلمان	۱۲/۳۲۲	۲۱۶۶/۸	۰/۰	۱۲۲/۰۰۶	۲/۱	۴/۰
لاهیجان	۱۶/۷۶۵	۱۸۶۸/۵۲	۱/۶	۱۰۱/۹۵۳	۱/۵	۴/۲
رشت	۱۷/۱۴۵	۱۸۶۵/۰۵	۰/۷	۱۱۱/۳۷۱	۱/۶	۴/۷
منجیل	۱۷/۸۶۱	۲۷۰۰	۶/۰	۱۴۱/۵۴۲	۵/۱	۳/۲
جیرنده	۱۲/۷۶	۲۸۰۷/۵۶	۶/۵	۱۴۳/۷۰۲	۵/۴	۳/۱
رودسر	۱۷/۳۲۴	۱۹۲۱/۶۵	۰/۳	۱۲۰/۲۶۵	۱/۹	۴/۱
تالش	۱۷/۰۷	۱۶۵۹/۱۸	۰/۸	۱۰۰/۷۷۴	۱/۸	۴/۸
ماسوله	۱۲/۵۲۸	۱۴۱۸/۹۷	۰/۳	۱۳۴/۰۱۷	۱/۵	۴/۴

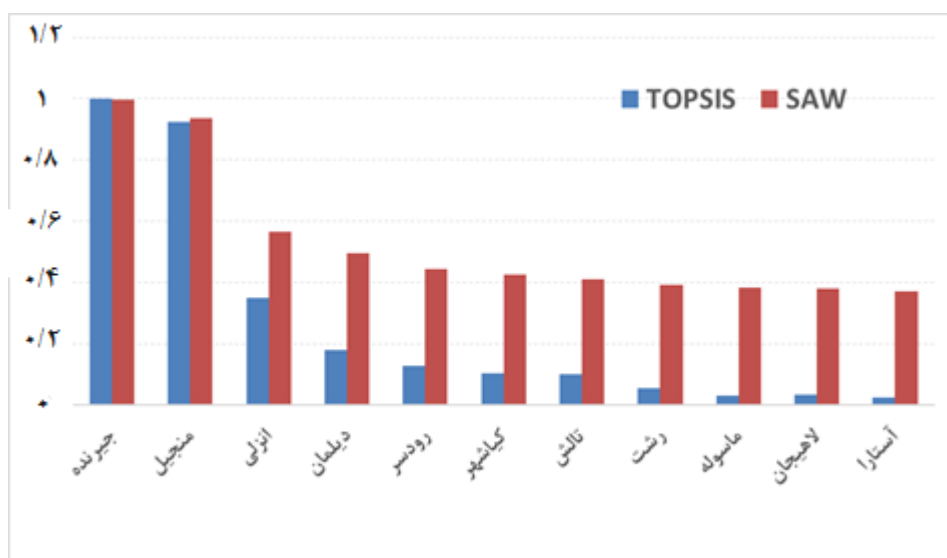
جدول ۳- نتایج وزن دهی پارامترهای مؤثر بر عملکرد نیروگاه خورشیدی در استان گیلان

پارامتر	سرعت باد	ساعات آفتابی	دما	ابرناکی	تابش خورشیدی
وزن	۰/۷۵۷۹	۰/۱۰۲۸	۰/۰۵۲۶	۰/۰۴۹۸	۰/۰۳۶۹

همان طور که قابل مشاهده است، معیار سرعت باد، دارای وزن بیشتری نسبت به دیگر شاخص ها است این امر نشان دهنده این است که سرعت باد و ساعات آفتابی نسبت به سایر پارامترها دارای پراکندگی بیشتری در شهرهای استان گیلان هستند. بنابراین به عنوان مؤثرترین پارامترهای تصمیم گیری در روش آنتروپی شانون انتخاب شدند. پس از محاسبه وزن نسبی معیارها، اولویت بندی ایستگاه های دارای پتانسیل جهت احداث نیروگاه خورشیدی از طریق دو روش Topsis و Saw، انجام شد و نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۲ مشخص است، نتایج اولویت بندی ها توسط دو روش مورد استفاده، تقریباً یکسان است. به طوری که در هر دو روش تصمیم گیری مورد استفاده، شهرهای جیرنده، منجیل و انزلی به ترتیب بالاترین پتانسیل تاسیس نیروگاه خورشیدی در استان گیلان را دارا هستند. در ادامه، نتایج طراحی فنی، اقتصادی و محیط زیستی نیروگاه پنج مگاواتی خورشیدی در هر یک از سه اولویت تعیین شده، ارائه شده است.

نتایج طراحی فنی، اقتصادی و محیط زیستی نیروگاه خورشیدی

بررسی فنی: اطلاعات مربوط به ماژول های فتوولتائیک انتخابی در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به اینکه ظرفیت نیروگاه خورشیدی در هر سه شهر دارای اولویت برابر ۵ مگاوات است بنابراین تعداد ماژول های مورد نیاز نیز برای شهرهای مختلف، یکسان است (جدول ۳). با توجه به جدول ۳، عملاً تعداد ۱۲۸۱۸ ماژول ۳۹۰ واتی توانایی تولید اسمی ۵ مگاوات برق را دارا است. مساحت زمین مورد نیاز برای نصب پنل خورشیدی نیز با توجه به ویژگی و تعداد ماژول ها، در نرم افزار PVSyst محاسبه می شود که این پارامتر برای هر سه ایستگاه مورد بررسی برابر با مقدار ۲۴۸۷۱ متر مربع مشخص شده است.



شکل ۲- اولویت‌بندی ایستگاه‌های دارای پتانسیل احداث نیروگاه خورشیدی از دو روش SAW و TOPSIS

جدول ۳- اطلاعات مربوط به ماژول‌های فتوولتائیک

واحد	مونو کریستال	نوع ماژول
-	تابان	شرکت تولید کننده
W	۳۹۰	توان نامی هر پنل
	۱۲۸۱۸	تعداد ماژول
v	۶۳۱	U mpp
A	۷۳۴۲	I mpp
-	JAM72-S10-390-PR	مدل ماژول
دلار	۱۵۰	قیمت هر ماژول الف

الف: قیمت هر ماژول بر مبنای تماس تلفنی با کارشناس فروش شرکت تابان در خرداد ماه ۱۴۰۳ و نرخ دلار ۶۰ هزار تومان محاسبه شد.

پس از تعیین تعداد ماژول‌های فتوولتائیک، مشخصات اینورترهای مورد نظر در نرم‌افزار PVSyst انتخاب شد و تعداد اینورترهای مورد نیاز در نرم‌افزار تعیین شد. با توجه به ظرفیت ثابت نیروگاه در سه ایستگاه مورد بررسی، تعداد اینورترها برای همه ایستگاه‌ها مقدار یکسانی به دست آمد. مشخصات اینورترهای نیروگاه ۵ مگاواتی در جدول ۴ ارائه شده است.

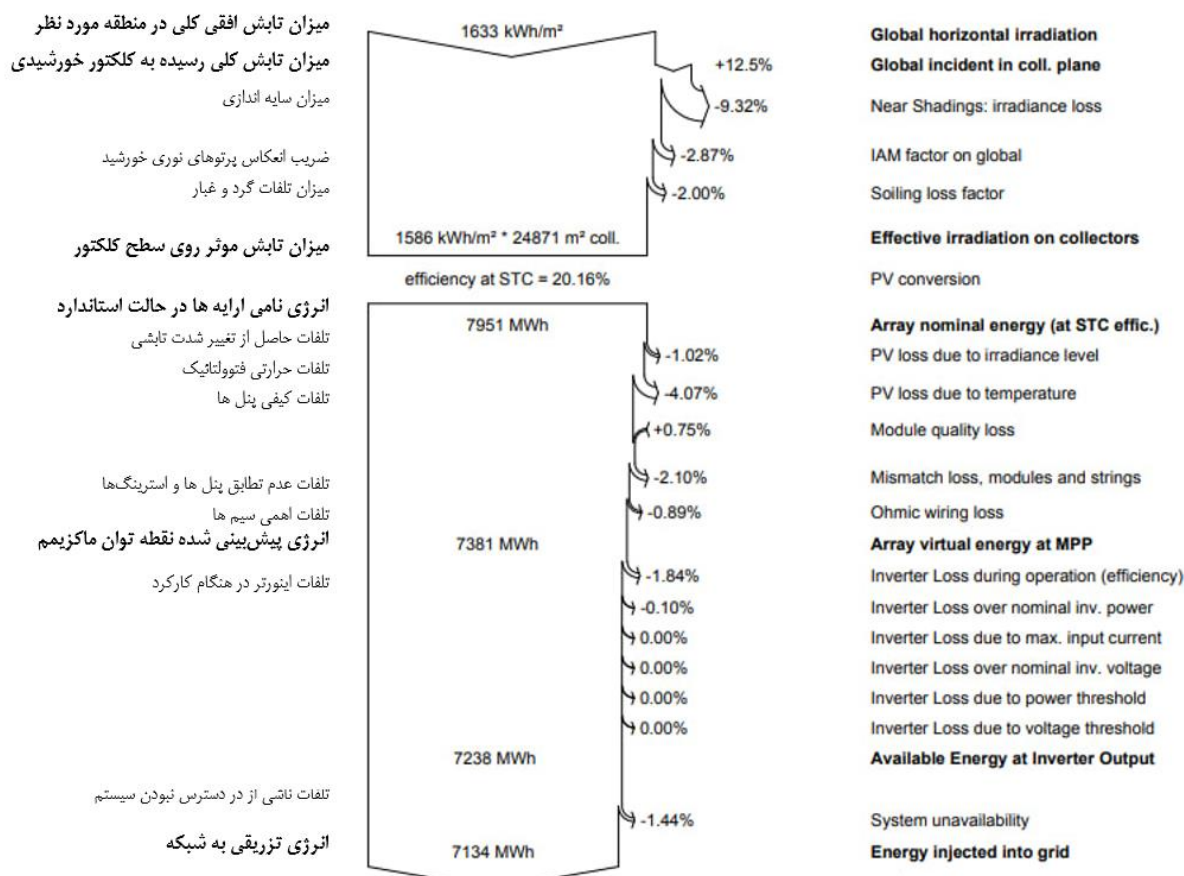
جدول ۴- مشخصات اینورترها

واحد	مقدار	پارامتر
-	Fronius International	برند اینورتر
-	Tauro Eco 100-3-P preliminary	مدل اینورتر
kWac	۱۰۰	توان نامی هر اینورتر
عدد	۴۱	تعداد اینورترها
kWac	۴۱۰۰	توان کل
V	۹۳۰-۵۸۰	محدوده ولتاژ کاری
درصد	۱/۲۲	Pnom ratio (DC:AC)
دلار	۵۲۵۰	قیمت هر اینورتر الف

الف: براساس استعلام آنلاین از وبسایت مانا سازان (Manasazan, 2024) در خرداد ماه ۱۴۰۳ و نرخ دلار ۶۰ هزار تومان محاسبه شد.

بررسی اقتصادی: در پژوهش حاصل عمر مفید نیروگاه خورشیدی برابر با ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه روند بررسی اقتصادی سه شهر دارای اولویت در این پژوهش تقریباً یکسان است، نتایج اقتصادی و محیط‌زیستی ایستگاه چیرنده به عنوان نمونه آورده شده است و خلاصه نتایج مربوط به سایر گزینه‌ها در باب مقایسه در جدول ۷ گزارش شده است. شکل ۳، جریان ورودی انرژی به سایت چیرنده، انرژی تحویلی به شبکه و جریان‌های اتلاف انرژی را به طور کامل و مجزا نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، مجموع شدت تابش افقی بر روی سلول‌های فتوولتائیک برای چیرنده برابر ۱۶۳۳ کیلووات ساعت بر

متر مربع و تابش مؤثر برابر ۱۵۸۶ کیلووات ساعت بر متر مربع است. بنابراین میزان تلفات انرژی برای منطقه جیرنده تقریباً برابر ۲/۸۸ درصد است که شامل تلفات مربوط به گرد و غبار، سایه اندازی و ضریب انعکاس پرتوهای نوری خورشید (IAM)^۲ است. سلول فتوولتائیک انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. بعد از تبدیل انرژی توسط سلول، انرژی نامی آرایه ها برابر با ۷۹۵۱ مگاوات ساعت در سال است. بازدهی آرایه های فتوولتائیک برابر ۲۰/۱۶ درصد در شرایط استاندارد (STC) تعیین شد (شکل ۳). انرژی سالانه پیش بینی شده آرایه ها نیز برابر با ۷۳۸۱ مگاوات ساعت است که پس از کسر تلفات اینورتر، میزان انرژی سالانه در دسترس در خروجی اینورتر برابر ۷۲۳۸ مگاوات ساعت خواهد شد و در نهایت، میزان انرژی تزریقی به شبکه (پس از اعمال ضریب در دسترس نبودن نیروگاه) برابر با ۷۱۳۴ مگاوات ساعت خواهد بود.



شکل ۳- دیاگرام جریان انرژی نیروگاه پیشنهادی در ایستگاه جیرنده

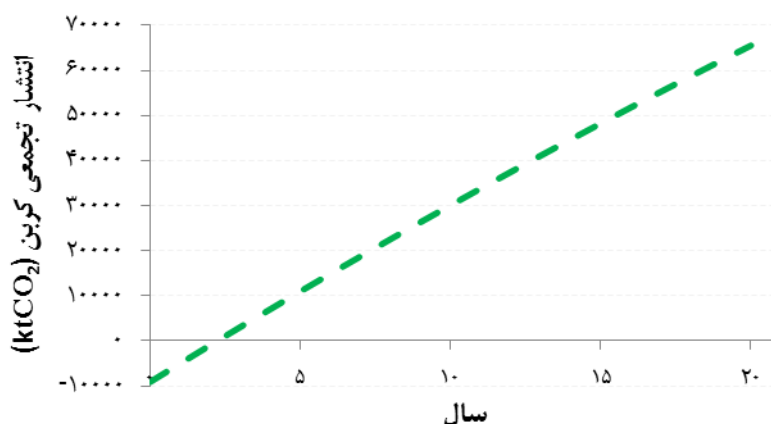
با توجه به مفروضات انجام شده در بخش روش تحقیق، سرمایه اولیه مورد نیاز، هزینه های سالانه و ارزش حال خالص پروژه برای ایستگاه جیرنده در نرم افزار PVSyst تعیین و در جدول ۵ ارائه شده است. سرمایه اولیه شامل مجموع هزینه های طراحی فنی و اقتصادی، مطالعات اثرات محیط زیستی، خرید و نصب تجهیزات است. هزینه های جاری نیز شامل حقوق، بیمه، مالیات و تعمیرات و نگهداری است.

جدول ۵- نتایج اقتصادی ایستگاه جیرنده

پارامتر	مقدار	واحد
سرمایه اولیه	۲۳۴۱۸۵۰	دلار
هزینه جاری	۱۲۰۸۳	دلار در سال
سرمایه اولیه ناشی از تسهیلات بانکی	۱۱۷۰۰۰	دلار
سرمایه گذاری مجری	۱۱۷۸۵۰	دلار
نرخ تنزیل	۵	درصد در سال
ارزش حال خالص	۶۹۶۵۳۷۹۸۸	دلار

²Incident Angle Modifier

بررسی محیط‌زیستی: از آنجا که تأسیس نیروگاه خورشیدی سبب کاهش مصرف سوخت‌های رایج فسیلی می‌شود، انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کاهش می‌یابد. میزان کاهش مستقیماً با ظرفیت برق تزریقی به شبکه مرتبط است. در ادامه، عملکرد نیروگاه پیشنهادی ۵ مگاواتی سایت جیرنده در مدیریت انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول ۲۰ سال در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴- CO_2 معادل ذخیره شده در چرخه عمر نیروگاه

در جدول ۶ میزان کربنی که در فرآیند ساخت مازول‌های خورشیدی، اینورترها و سایر تجهیزات منتشر شده است (کربن منتشره در فرآیند چرخه حیات نیروگاه) برابر با ۹۱۴۳ تن CO_2 معادل در نرم‌افزار PVsyst تخمین زده شده است. لازم به توضیح است که جهت محاسبه کربن منتشر شده از یک نیروگاه حرارتی با ظرفیت معادل نیروگاه خورشیدی در طول ۲۰ سال، برق تزریقی به شبکه با لحاظ کردن افت عملکرد سالانه، در ضریب انتشار کربن ضرب شده و حاصل آن در جدول ۶ گزارش شده است. نمودار تجمعی کربن ذخیره شده در نیروگاه خورشیدی جیرنده در شکل ۴ ارائه شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل انتشار کربن در فرآیند ساخت تجهیزات نیروگاه خورشیدی، عملاً ۲/۵ سال طول می‌کشد تا عملکرد نیروگاه از منظر محیط‌زیستی توجیه‌پذیر شود. مقایسه کلی سه ایستگاه دارای اولویت از منظر فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی در جدول ۷ گزارش شده است. در جدول ۷، ضریب عملکرد (PR) سیستم فتوولتائیک است که برابر با نسبت انرژی تولید شده در خروجی جریان متناوب به انرژی تولید شده توسط پنل‌های فتوولتائیک در سیستم تحت شرایط آزمون استاندارد (STC) است (Tur et al., 2018).

جدول ۶- عملکرد محیط‌زیستی پروژه ۵ مگاواتی جیرنده

واحد	مقدار	پارامتر
۷۱۳۴/۱۹	مگاوات ساعت	برق تزریقی به شبکه در اولین سال بهره‌برداری
۱	درصد	افت عملکرد سالانه نیروگاه
۹۱۴۳	تن CO_2 معادل	کربن منتشر شده ناشی از تولید تأسیسات نیروگاه
۵۷۵	گرم CO_2 بر هر کیلووات ساعت	ضریب انتشار کربن یک نیروگاه حرارتی
۷۴۶۹۷	تن CO_2 معادل	کربن منتشر شده از یک نیروگاه حرارتی با ظرفیت معادل نیروگاه خورشیدی در طول ۲۰ سال
۶۵۵۵۴	تن CO_2 معادل	خالص عملکرد نیروگاه خورشیدی در انتشار کربن

جدول ۷- پارامترهای فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی در سه ایستگاه دارای بیشترین پتانسیل در استان گیلان

ایستگاه			واحد	پارامتر
جیرنده	منجیل	انزلی		
۱۴۲۷	۱۱۹۶	۱۱۵۶	(kWh/kWp/year)	تولید ویژه
۷۷/۶۶%	۷۵/۰۲%	۷۷/۸۶%	(PR ratio%)	نسبت عملکرد
۷۱۳۴	۵۹۷۸	۵۷۷۸	MWh/year	انرژی تزریقی به شبکه
۱۶	۱۴	۱۳	درصد	بازده کل
۲۰/۱۶	۲۰/۱۱	۲۰/۱۶	درصد	بازدهی در شرایط استاندارد
۶۵۵۵۳/۸	۵۳۳۱۲/۶	۵۱۳۵۸/۱	tCO_2	کاهش در انتشار کربن
۵/۴	۶/۵	۶/۸	سال	دوره بازگشت سرمایه
۷۳۷۳/۸	۶۱۵۶/۱	۵۹۹۷/۵	(MWh)	انرژی مؤثر در خروجی آرایه
۱۶۳۳/۲	۱۳۲۹/۳	۱۳۵۲/۳	(kWh/m ²)	میزان تابش افقی کلی در منطقه

پارامتر	واحد	ایستگاه	
		انزلی	منجیل
تابش پراکنده افقی	(kWh/m ²)	۷۴۰/۰۳	۵۵۲/۷
ارزش حال خالص	هزار دلار	۵۱۰۴	۵۳۷۷
گذاری اولیه سرمایه	دلار	۲۳۴۱۸۵۰/۰	۲۳۴۱۸۵۰/۰
ارزش انرژی تولید شده	(USD/KWh)	۰/۰۳۴	۰/۰۳۲
جیرنده		۶۶۲/۲۷	۶۹۶۵

بحث و نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف آینده پژوهی تولید برق پایدار و سبز در استان گیلان انجام گرفت. با استفاده از روند تغییرات پارامترهای اقلیمی مؤثر بر عملکرد نیروگاه خورشیدی در بازه بیست ساله اخیر در نقاط مختلف استان (۱۱ نقطه محل)، محل های با بیشترین پتانسیل تأسیس نیروگاه خورشیدی تعیین شد. در این راستا، ایستگاه های جیرنده، منجیل و بندر انزلی در هر دو روش تصمیم گیری چندمعیاره TOPSIS و SAW دارای رتبه های اول از منظر پتانسیل نصب نیروگاه های خورشیدی شناخته شدند. از آنجا که هر دو روش به کار رفته، اولویت های یکسانی را پیشنهاد دادند، بنابراین می توان با اطمینان بالایی این نقاط را به عنوان بهترین نقاط موجود در استان گیلان جهت تأسیس نیروگاه های خورشیدی در نظر گرفت. به منظور بررسی عینی عملکرد فنی، اقتصادی و محیط زیستی نیروگاه های خورشیدی در مکان های دارای اولویت، طراحی نیروگاه های پنج مگاواتی براساس دستورالعمل ساتبا در نرم افزار PVsyst انجام شد. تمامی جزئیات طراحی فنی و اقتصادی بر مبنای تجهیزات داخلی و تجهیزات وارداتی موجود در بازار کشور و دستورالعمل های ساتبا صورت گرفت. از میان سه ایستگاه بندر انزلی، منجیل و جیرنده، ایستگاه جیرنده در تمام پارامترهای مورد بررسی دارای بالاترین امتیاز است و در رتبه اول قرار دارد (جدول ۷). با توجه به جدول ۷ که خلاصه ای از شاخص های فنی، اقتصادی و محیط زیستی ایستگاه های مورد بررسی را گزارش می دهد، ایستگاه منجیل با وجود جذب تابش خورشیدی کمتر نسبت به ایستگاه بندر انزلی، دارای ارزش بالاتری از منظر شاخص های اقتصادی و محیط زیستی است و در رتبه دوم اولویت قرار گرفته است. به طور کلی بازده تأسیس نیروگاه خورشیدی در سه ایستگاه منجیل، جیرنده و بندر انزلی به ترتیب برابر با ۱۶،۱۴ و ۱۳ درصد است. با مقایسه این مقادیر با بازده کل در سایر پژوهش ها که غالباً در بخش های مرکزی و جنوب کشور توسط محققانی مانند Kazemi و Mostafaeipour (۲۰۱۵)، Badri و همکاران (۲۰۱۶) و همچنین Shams و همکاران (۲۰۱۳) انجام شده است، می توان گفت که بازده تأسیس نیروگاه خورشیدی در استان گیلان به میزان تقریبی ۳ درصد از شهری مانند تهران کمتر است (Badri et al., 2016) و نسبت به شهرهای مرکزی، حدود ۵ درصد کمتر است که این امر غالباً به دلیل تابش مؤثر خورشید در آن مناطق است. زمان بازگشت سرمایه اولیه در ایستگاه های منجیل، جیرنده و بندر انزلی نیز به ترتیب برابر با ۶/۵، ۵/۴ و ۶/۸ سال است. از آنجا که طبق قانون فعلی، حداکثر شش سال برق نیروگاه به صورت تضمینی توسط دولت خریداری می شود، ایستگاه جیرنده حتی زودتر از شش سال به نقطه سر به سری اقتصادی می رسد و نسبت به دو ایستگاه دیگر اقتصادی تر است. از منظر محیط زیستی، نقطه سر به سر انتشار کربن در ایستگاه های مورد بررسی، تقریباً ۲/۵ سال است. هرچند برای ایستگاه های منجیل و بندر انزلی این عدد مقداری بیشتر است.

به طور کلی میزان تولید برق ویژه در ایستگاه های پیشنهادی در محدوده ۱۱۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلووات ساعت به ازای کیلووات پنل نصب شده است که این مقدار هرچند نسبت به مناطق مرکزی ایران که کیفیت جذب تابشی بهتری دارند، مقدار کمتری است (بین ۱۶۰۰ تا ۱۹۶۰ برای مناطقی در اصفهان، کرمان و مرکزی (Roustapour et al., 2023) و ۲۱۶۰ برای اهواز (Taki and Mardani Najafabadi, 2019)) اما باعث کاهش انتشار کربن به مقدار بالغ بر شش مگاتن در طول ۲۰ سال عمر پروژه خواهد شد. به دلیل اکوسیستم حساس و ماهیت گردشگر پذیر بودن استان، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و حفظ اکوسیستم آن نسبت به مناطق صنعتی بسیار حائز اهمیت است. بنابراین تحقیق حاضر با رتبه بندی دقیق مکان های با اولویت تأسیس نیروگاه خورشیدی در استان گیلان و طراحی جزئی تمام ادوات نیروگاه، عملاً برای تصمیم سازان در امر تولید برق پایدار این امکان را فراهم کرده تا بتوانند با صرف هزینه های کمتر نسبت به معرفی ظرفیت های استان به سرمایه گذار، نسبت به تولید برق پایدار اقدام کنند. در حال حاضر در استان گیلان، توربین های بادی و غالباً در بخش هایی از منجیل و رودبار در ظرفیت اسمی ۶۰ مگاوات نصب شده اند

(Orkomi, 2022). هرچند بادهایی با میانگین سالانه بالاتر از ۵ متر بر ثانیه در این مناطق جریان دارد، اما توسعه نیروگاه‌های بادی در استان بسیار اندک بوده است. پراکندگی زیاد توربین‌های بادی عملاً شرایط نگهداری و تعمیرات آنها را با مشکل جدی مواجه می‌کند، در حالی که نیروگاه‌های متمرکز خورشیدی به راحتی قابلیت محافظت و تعمیرات دارند و هزینه‌های کمتری از این حیث نیاز دارند. به کارگیری نیروگاه‌های خورشیدی در استان گیلان، نه تنها کم اهمیت نیست، بلکه در کنار توسعه نیروگاه‌های بادی، می‌تواند سهم برق تجدیدپذیر استان را از مقدار ناچیز کنونی به مقدار قابل توجهی ارتقاء بخشد.

از جمله محدودیت‌های تحقیق حاضر عدم بررسی پارامترهای عواض سطحی، کاربری اراضی و سهولت دسترسی در اولویت‌بندی محل‌های پیشنهادی است. هرچند این امر از طریق تهیه نقشه‌های راه‌ها و عوارض سطحی در هر یک از سه اولویت پیشنهادی این تحقیق قابل انجام است تا محل‌های مشخص از شهرستان‌های پیشنهادی، برای تأسیس نیروگاه خورشیدی مشخص شوند. همچنین پیشنهاد می‌شود تا میزان افزایش نیاز برق استان در یک افق آینده پیش‌بینی شود و سپس با استفاده از نتایج تحقیق حاضر، بودجه سرمایه‌گذاری مورد نیاز جهت تأمین آن از طریق نیروگاه خورشیدی در شهرهای اولویت‌دار را تخمین زد. این امر برای وزارت نیرو از منظر تعیین میزان اعتبار لازم جهت معرفی به سرمایه‌گذار بخش خصوصی بسیار حائز اهمیت است. آینده‌پژوهی انرژی استان و امکان‌سنجی تأمین آن از منبع خورشیدی، نه تنها به بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی خورشیدی کمک می‌کند، بلکه به حفظ و نگهداری اکوسیستم حساس منطقه و نیل به اهداف توسعه پایدار نیز کمک خواهد کرد.

References

- Abbasizadeh, F., Abbaspour, M., Soltaniyeh, M., Haji Mollaali Kani, A., 2020. Investigating the impacts of climate change on the building's cooling and heating energy demand in Iran. 24th National Conference of the Association of Environmental Specialists and the 14th Green Development Festival, Tehran, Iran. 23 February 2020, pp. 19-35. (In Persian)
- Agnolucci, P. و 2007. Renewable electricity policies in The Netherlands. *Renewable Energy* 32(5), 868-883.
- Arjmand, E., Tashakor, S., 2023. Simulation of a floating solar power plant on the wastewater treatment Case of study: Wastewater treatment No. 1 in Shiraz. *Journal of Energy Planning and Policy Research* 8(4), 30-54. (In Persian)
- Asgharpour, M.J., 2023. Multiple criteria decision making. University of Tehran press, Tehran, 412 p. (In Persian)
- Awasthi, A., Al Garni, H.Z., Wright, D.N., 2018. Optimal orientation angles for maximizing energy yield for solar PV in Saudi Arabia. *Renewable Energy* 133, 538-550.
- Badri, A., Emadifar, R., Eldoromi, M., 2016. Simulation and evaluation of solar potential in Tehran, Kerman and Yazd for a 500 kW photovoltaic power plant using PVsyst software. *Iranian Journal of Energy* 19(1), 153-166. (In Persian)
- Bazin, M., 2012. Guilan i. Geography and Ethnography. *Encyclopædia Iranica* Archived from the original on 2012.
- Ebrahimi, H., Rahimi, M., 2024. Feasibility study of photovoltaic systems in humid regions of northern Iran. *Energy for Sustainable Development* 77, 23-32.
- Farhadi, F., Salehi, S., 2022. Environmental benefits of solar power generation in arid and semi-arid regions of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150, 111457.
- GPSIS., 2022. Management and planning organization of Guilan Province. Statistical information system of Guilan province. Guilan Province Statistical Information System. <https://sdimpogl.ir/>. (Accessed 7th March 2024). (In Persian)
- Halwachs, M., Neumaier, L., Vollert, N., Maul, L., Dimitriadis, S., Voronko, Y., Eder, G.C., Omazic, A., Mühleisen, W., Hirschl, C. and Schwark, M., 2019. Statistical evaluation of PV system performance and failure data among different climate zones. *Renewable Energy* 139, 1040-1060.
- Hossain, A.K., Badr, O., 2007. Prospects of renewable energy utilisation for electricity generation in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11(8), 1617-1649.
- IMO, Iran meteorological organization, 2024. Available at <https://data.irimo.ir>. (Accessed March 10th 2024). (In Persian)

- Kazemi Khafari, A., MostafaiePour, A., 2015. Prioritization of Counties in Isfahan Province for Electricity Generation Using Solar Energy. Proceeding of the first International Conference on Modern Research in Management and Industrial Engineering, Tehran, Iran. pp. 1-20. (In Persian)
- Koirala, B.P., Sahan, B., Henze, N., 2009. Study on MPP Mismatch Losses in Photovoltaic Applications. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany. 21-25 September 2009, pp. 3727-3733.
- Kumar, C.M.S., Singh, S., Gupta, M.K., Nimdeo, Y.M., Raushan, R., Deorankar, A.V., Nannaware, A.D., 2023. Solar energy: A promising renewable source for meeting energy demand in Indian agriculture applications. Sustainable Energy Technologies and Assessments 55, 102905.
- Li, Y., Wang, X., Jin, Y., Ding, Y., 2012. An integrated solar-cryogen hybrid power system. Renewable Energy 37(1), 76-81.
- Liu, M., Tay, N.S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., Saman, W. and Bruno, F., 2016. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 53, 1411-1432.
- LRPI, Laws and Regulations Portal of Iran. Available at <https://dotic.ir/news/11797>. (Accessed 24th December 2024). (In Persian)
- Manasazan. Available at <https://manasazan.ir/>. (Accessed 14th June 2024). (In Persian)
- Memiche, M., Bouzian, C., Benzahia, A., Moussi, A., 2020. Effects of dust, soiling, aging, and weather conditions on photovoltaic system performances in a Saharan environment—Case study in Algeria. Global Energy Interconnection 3(1), 60-67.
- Mohammad Moradi, A., Akhtarkavan, M., 2009. Multi-criteria decision analysis methods' methodology. Armanshahr 2(2), 113-125.
- Momeni, M., 2010. New Topics in Operation Research. Self-publishing 2010 (In Persian)
- Nourbakhsh, S., 2018. The feasibility of developing solar power plants in Guilan province in line with energy security. Journal of Social Geography Research 7(27), 53-68. (In Persian)
- Orkomi, A.A., 2022. Greenhouse gas emission inventory and quantifying regional compatible mitigation plans-horizon 2030 (case study: Guilan province, Iran). Iranian Journal of Health and Environment 15(1), 121-136. (In Persian)
- Phinikarides, A., Makrides, G., Zinsser, B., Schubert, M. and Georghiou, G.E., 2015. Analysis of photovoltaic system performance time series: Seasonality and performance loss. Renewable Energy 77, 51-63.
- Photovoltaic Software. Available at <https://www.pvsyst.com/>. (Accessed 17th June 2024).
- PVGis, Photovoltaic Geographical Information System. Available at <https://pvgis.com>. (Accessed 25th May 2024).
- Rawat, R., Chaudhary, V., Dubey, H.M., Pandit, M., 2020. Performance Evaluation of 30.5 kWp On-Grid Solar System Using PVsyst. In: Pandit, M., Srivastava, L., Venkata Rao, R., Bansal, J. (eds) Intelligent Computing Applications for Sustainable Real-World Systems. ICSISCET 2019. Proceedings in Adaptation, Learning and Optimization, vol 13. Springer, Cham.
- REEEO, Renewable Energy and Energy Efficiency Organization. Available at <https://www.satba.gov.ir>. (Accessed 5th May 2024). (In Persian)
- Roostanet. Available at <https://stat.roostanet.com/list.php?id=111>. (Accessed 30th April 2024).
- Roustapour, O.R., Nikouei, A., Sharifi Malvajerdi, A., 2023. Techno-Economic Assessment of Photovoltaic Powerhouse Developments (Case Study in Selected Agricultural Research Stations). Environmental Researches 14(27), 97-114.
- Ruiz, B.J., Rodríguez-Padilla, V., Martínez, J.H., 2008. Renewable energy sources in the Mexican electricity sector. Renewable Energy 33(6), 1346-1353.
- Shams, M.H., Kia, M., Mahdavi, B., 2013. Optimal Design of a 100kw Grid Connected Photovoltaic Power Plant in Tehran Using Pvsyst Software. Iranian Journal of Energy 16(2), 15-30. (In Persian)
- Shrivastava, A., Sharma, R., Saxena, M. K., Shanmugasundaram, V., Rinawa, M. L., 2023. Solar energy capacity assessment and performance evaluation of a standalone PV system using PVSYST. Materials Today: Proceedings 80, 3385-3392.
- Srivastava, R., Giri, V.K., 2017. Design of grid connected PV system using PVsyst. African Journal of Basic & Applied Sciences 9(2), 92-96.
- Statistical Center of Iran. Available at <https://amar.org.ir>. (17th April 2024). (In Persian)

- Taban Energy. Available at <https://tabanenergy.ir/>. (Accessed 25th June 2024). (In Persian)
- Taki, M., Mardani Najafabadi, M., 2019. Technical and economic evaluation of solar power plant (photovoltaic) grid-connected (Case study: 1 MW power plant in Ahvaz city). *Journal of Renewable and New Energy* 6(1), 91-102.
- Tur, M.R., Colak, İ., Bayindir, R., 2018. Effect of faults in solar panels on production rate and efficiency. In 2018 International Conference on Smart Grid (icSmartGrid) (pp. 287-293), IEEE.
- Vafaeipour, M., Zolfani, S.H., Varzandeh, M.H.M., Derakhti, A., Eshkalag, M.K., 2014. Assessment of regions priority for implementation of solar projects in Iran: New application of a hybrid multi-criteria decision-making approach. *Energy Conversion and Management* 86, 653-663. (In Persian)
- Zahedi, R., Gitifar, S., Ahmadi, A., 2023. Technical-economic feasibility of designing a 10 MW solar power plant of KavirTire Company in Birjand city of South Khorasan province using RET Screen software. *Journal of Renewable and New Energy* 10(2), 134-148. (In Persian)
- Zoghi, M., Ehsani, A.H., Sadat, M., javad Amiri, M., Karimi, S., 2017. Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68, 986-996. (In Persian)