



Analysis of the Impact of Panel-to-Inverter Capacity Ratio on Energy Production and Economics of Solar Power Plants: A Case Study of Iran

Ali Askari¹ | Ali Farhadi² | Amirhossein Fathi³ | Hossein Yousefi^{4*}

1. BSc Candidate, National University of Skills, Shiraz, Iran. Email: 1380aliaskari@gmail.com

2. Assistant Professor, Mechanical Engineering Faculty, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran. Email: a.farhadi@sru.ac.ir

3. Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: afathi@shirazu.ac.ir

4. Corresponding Author, Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: hosseinyousefi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 22 May 2025

Revised: 21 July 2025

Accepted: 22 September 2025

Published Online: 15 January 2025

Keywords:

Electricity generation,
Increasing the efficiency/productivity
of solar power plants,
Investment and operational costs of
solar power plants,
Optimal panel capacity to inverter
capacity ratio,
Technical-economic analysis.

ABSTRACT

This study investigates the impact of selecting an optimal panel-to-inverter capacity ratio on the electricity generation of photovoltaic (PV) power plants. To quantify the influence of this ratio on monthly energy yield across different climatic regions, PVsyst simulation software was employed. The energy output was assessed for five different ratios ranging from 0.90 to 1.14 across 100 locations throughout Iran. The percentage change in electricity production closely mirrors the percentage change in panel capacity, although this relationship varies by month and climate. Generally, for the months of May, June, July, and August, the variability in output across the studied locations is minimal. The predicted ranges of energy output variation due to changes in the panel-to-inverter capacity ratio are as follows: 1) For a ratio of 0.90, the output change ranges from -11.81% to -11.64% (mean: -11.76%). 2) For a ratio of 0.96, the range is -5.91% to -5.77% (mean: -5.87%). 3) For a ratio of 1.08, the output increase ranges from +5.32% to +5.90% (mean: +5.77%). 4) For a ratio of 1.14, the output increase is between +10.12% and +11.78% (mean: +11.27%). Furthermore, if the increase in capital investment per percentage increase in panel capacity remains within the range of 90.5% to 100.3% and 86.1% to 100.2% for ratios of 1.08 and 1.14 respectively, the increase in the panel-to-inverter ratio would be considered economically justified. Among the scenarios analyzed, a ratio of 1.08 demonstrates the highest economic feasibility.

Cite this article: Askari, A.; Farhadi, A.; Fathi, A. & Yousefi, H. (2026). Analysis of the Impact of Panel-to-Inverter Capacity Ratio on Energy Production and Economics of Solar Power Plants: A Case Study of Iran. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (1), 39-55. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.393686.1134>



© Ali Askari, Ali Farhadi, Amirhossein Fathi, Hossein Yousefi

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.393686.1134>

Various approaches have been proposed in order to improve the efficiency and performance of solar power plants. These approaches can generally be classified into at least five main categories: (1) the application of solar tracking systems to increase the amount of sunlight received by photovoltaic modules, (2) the cooling of solar module cells to reduce temperature-related losses, (3) the use of equipment with higher conversion efficiency, (4) the application of solar concentrators to intensify solar radiation on the modules, and (5) the determination of the optimal ratio of panel capacity to inverter capacity. Among these five categories, the issue of defining and applying an optimal panel-to-inverter capacity ratio has received less attention in both research and practice, despite its significant influence on the overall output of photovoltaic systems.

The determination of the optimal capacity ratio between solar panels and inverters is not a straightforward task. This ratio is influenced by several variables, including the technical characteristics of both the panels and the inverters, as well as local climatic conditions. These climatic factors cover a wide range, such as the intensity of solar radiation, wind speed, ambient temperature, and the degree of atmospheric pollution or dust accumulation. In addition, economic factors—such as electricity purchase tariffs and the level of available initial investment capital—alongside technical constraints like the availability of suitable land, play a major role in shaping the final choice of this ratio. To facilitate the analysis of these complex and interrelated factors, a number of technical and engineering software packages have been developed. Among them, PVsyst has emerged as one of the most widely adopted tools for modeling and assessing the performance of photovoltaic systems under varying technical and climatic conditions.

In this study, 100 cities across Iran were selected, including provincial capitals as well as the most populated cities in each province. The purpose was to examine the impact of different climatic conditions on the panel-to-inverter capacity ratio. PVsyst software was employed to analyze the effect of climate on this ratio. Five scenarios were considered for each city, covering ratios in the range of 0.90 to 1.14. A ratio of 1.02 was defined as the reference scenario, serving as the baseline against which all other ratios were compared. The higher or lower ratios may cause technical issues with the inverter(s). Moreover, in the case of an oversized ratio, some of the solar energy incident on the PV panels may not be fully converted into electrical energy.

The results demonstrated that variations in production caused by changing the panel-to-inverter ratio could be substantial. Specifically, for a ratio of 0.90 (representing an 11.78% decrease in panel capacity), production was predicted to vary between −11.81% and −11.64%, with an average of −11.76%. For a ratio of 0.96 (5.88% reduction in capacity), the variation ranged from −5.91% to −5.77% (mean −5.87%). For a ratio of 1.08 (5.88% increase in capacity), production varied from +5.32% to +5.90% (mean +5.77%). Finally, for a ratio of 1.14 (11.78% increase in capacity), the variation was between +10.12% and +11.78% (mean +11.27%).

An additional economic assessment showed that if the percentage increase in investment cost per percentage increase in photovoltaic panel capacity remains within 90.5% to 100.3% for a ratio of 1.08, and within 86.1% to 100.2% for a ratio of 1.14, then the increase in the panel-to-inverter ratio can be considered economically justified. It should be considered that as the PV-to-inverter ratio increases, although most of the investment cost components—such as photovoltaic panels, mounting structures, and connectors—increase proportionally, some cost components do not change. These include soft costs, protection systems, transformers, and, in some cases, land and power plant walls. Moreover, certain operating costs, such as routine inspections and security, remain unchanged. Therefore, even a ratio of 1.14 may be economically justified. However, among all the scenarios examined, a ratio of 1.08 was found to provide the most favorable balance between energy yield and economic feasibility.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیک: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

تحلیل تأثیر نسبت ظرفیت پنل به اینورتر بر تولید انرژی و اقتصاد نیروگاه‌های خورشیدی (نمونه مورد مطالعه: کشور ایران)

علی عسکری^۱ | علی فرهادی^۲ | امیرحسین فتحی^۳ | حسین یوسفی^{۴*}

۱. دانشجوی کارشناسی، دانشکده فنی شهید رجایی شیراز، دانشگاه ملی مهارت، شیراز، ایران. رایانامه: 1380aliaskari@gmail.com
۲. استادیار بخش مکانیک خودرو، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران. رایانامه: a.farhadi@srut.ac.ir
۳. استادیار بخش انرژی - هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: afathi@shirazu.ac.ir
۴. نویسنده مسئول، استاد تمام مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hosseinyousefi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۵ کلیدواژه: افزایش بهره‌وری نیروگاه‌های خورشیدی، تحلیل فنی - اقتصادی، نسبت بهینه ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر، تولید انرژی الکتریکی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی نیروگاه‌های خورشیدی.	این مطالعه به بررسی تأثیر انتخاب نسبت بهینه ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر بر میزان تولید انرژی الکتریکی نیروگاه خورشیدی می‌پردازد. به منظور کمی‌سازی تأثیر این نسبت در ماه‌های مختلف در هر اقلیم بر میزان تولید، از نرم‌افزار PVSyst استفاده شده است. ارزیابی تولید در پنج نسبت در بازه ۰/۹ تا ۱/۱۴ برای ۱۰۰ نقطه کشور صورت پذیرفت. براساس نتایج به‌دست‌آمده، درصد تغییر میزان تولید در محدوده درصد تغییر ظرفیت پنل قرار می‌گیرد و در ماه‌های مختلف برای هر اقلیم متفاوت است، اما به طور کلی در چهار ماه می، جون، جولای و آگوست کران تغییر برای نقاط مورد بررسی بسیار محدود است. محدوده تغییرات تولید ناشی از تغییر نسبت ظرفیت پنل به اینورتر، برای نسبت‌های ۰/۹ (کاهش ۱۱/۷۸ درصد ظرفیت پنل)، ۰/۹۶ (کاهش ۵/۸۸ درصد ظرفیت پنل)، ۱/۰۸ (افزایش ۵/۸۸ درصد ظرفیت پنل) و ۱/۱۴ (افزایش ۱۱/۷۸ درصد ظرفیت پنل)، به ترتیب در بازه‌های ۱۱/۸۱- درصد تا ۱۱/۶۴- درصد (میانگین ۱۱/۷۶- درصد)، ۵/۹۱- درصد تا ۵/۷۷- درصد (میانگین ۵/۸۷- درصد)، ۵/۳۲- درصد تا ۵/۹۰- درصد (میانگین ۵/۷۷- درصد) و ۱۰/۱۲- درصد تا ۱۱/۷۸- درصد (میانگین ۱۱/۲۷- درصد) پیش‌بینی می‌شود. همچنین، در صورتی که افزایش درصد افزایش هزینه سرمایه‌گذاری به ازای هر درصد افزایش ظرفیت پنل فتوولتائیک در محدوده ۹۰/۵ درصد تا ۱۰۰/۳ درصد و ۸۶/۱ درصد تا ۱۰۰/۲ درصد به ترتیب برای دو نسبت ۱/۰۸ و ۱/۱۴ باشد، این افزایش نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر صرفه اقتصادی خواهد داشت. در میان سناریوهای مورد بررسی نسبت ۱/۰۸ از توجیه‌پذیری بالاتر برخوردار است.

استناد: عسکری، علی؛ فرهادی، علی؛ فتحی، امیرحسین و یوسفی، حسین (۱۴۰۴). تحلیل تأثیر نسبت ظرفیت پنل به اینورتر بر تولید انرژی و اقتصاد نیروگاه‌های خورشیدی (نمونه مورد مطالعه: کشور ایران). *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۵ (۱)، ۳۹-۵۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.393686.1134>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© علی عسکری، علی فرهادی، امیرحسین فتحی، حسین یوسفی
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.393686.1134>



۱. مقدمه

بررسی آمار منتشر شده نشان از افزایش قابل توجه سهم انرژی الکتریسته تولید شده از انرژی اولیه خورشیدی از نزدیک به صفر تا ۵/۴ درصد در سال ۲۰۲۳ است [۱] و در حال حاضر برق تولیدی از پیل فتوولتائیک را می‌توان ارزان‌ترین الکتریسته برشمرد [۲]. بر اساس گزارشی از آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر^۱، هزینه متوسط جهانی تولید برق از نیروگاه‌های خورشیدی در سال ۲۰۲۳ به میزان ۰/۰۴۴ دلار به ازای هر کیلووات ساعت پیش‌بینی شده است [۳]. به منظور بالا بردن کارایی و کاهش هزینه‌ها، راهکارها در جدول ۱ طبقه‌بندی شده‌اند.

جدول ۱. راهکارهای مرسوم به منظور افزایش بهره‌وری نیروگاه‌های خورشیدی

راهکارها	موضوعات مورد مطالعه	مرجع	موضوع مورد مطالعه	نتایج
ردیاب‌های خورشیدی تک‌محور	بررسی عملکرد ردیاب‌های خورشیدی تک‌محور به منظور بهینه‌سازی تابش خورشیدی	[۴]	افزایش تولید انرژی سالیانه به میزان ۵۲/۰۶ وات در نیروگاه دارای ردیاب تک‌محور در مقایسه با نیروگاه بدون ردیاب خورشیدی	
ردیاب خورشیدی تک‌محوره دستی	تعداد محدود تغییر زاویه استقرار پیل در زمان بهینه	[۵]	افزایش سطح تابش خورشیدی بر پیل نسبت به حالت یکسان بودن زمان استقرار بر هر زاویه	
ردیاب‌های خورشیدی دو محور	بررسی تفاوت کارایی سیستم با ردیاب دو محور با سیستم ثابت خورشیدی	[۶]	مشاهده بالا رفتن عملکرد سیستم به مقدار ۷/۷ درصد و بالاتر تا درصد ۱۲/۵	
ردیاب خورشیدی	سادگی و کاهش هزینه سیستم کنترل	[۷]	افزایش تابش خورشید بر سطح پیل حدود ۳۴ درصد و افزایش انرژی الکتریکی تولیدی حدود ۲۴ درصد نسبت به پیل بر سازه با زاویه ثابت در روزهای آفتابی	
ردیاب‌های خورشیدی هوشمند	بررسی عملکرد سیستم ردیاب خورشیدی در روزهای ابری کامل و نیمه‌ابری نسبت به نصب پیل روی سازه با زاویه ثابت	[۸]	افزایش میزان انرژی الکتریکی در روزهای نیمه‌ابری به میزان تقریباً ۱۸ درصد و روزهای تمام ابری تقریباً برابر با نصب پیل روی سازه ثابت	
ردیاب‌های خورشیدی هوشمند	استفاده از سیستم‌های هوشمند SATS و DATS برای افزایش عملکرد سیستم خورشیدی	[۹]	افزایش بازده و همچنین، قابل ارتقا بودن این نوع سیستم	
ردیاب‌های خورشیدی با استفاده از فناوری‌های نوین	استفاده از فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا با به‌کارگیری نرم‌افزار Thing Speak، به منظور مدل‌سازی	[۱۰]	به حداقل رساندن تلفات و صرفه‌جویی در مصرف انرژی و قابل استفاده در سیستم‌های خورشیدی هیبریدی	
ردیاب‌های خورشیدی و اقتصاد انرژی	تحلیل تأثیر ردیاب خورشیدی بر موارد اقتصادی و محیط زیستی با بیان چهار سناریو در کشور اسپانیا	[۱۱]	شناسایی عوامل تأثیرگذار شرایط محیطی و محدودیت‌های حرکت ردیاب خورشیدی در تولید انرژی	
بررسی نسبت ظرفیت پیل خورشیدی به اینورتر	تأثیر انتخاب ظرفیت اینورتر بر منافع اقتصادی و تولید انرژی سالانه نیروگاه خورشیدی	[۱۲]	بررسی شرایط آب‌وهوایی و تابع کارکرد اینورتر و دستیابی به اختلاف نسبی ۱۳/۷۸ درصد بین ظرفیت پیل و اینورتر در تولید توان خروجی	
بررسی نسبت ظرفیت پیل خورشیدی به عوامل اقتصادی	طراحی سیستم با بازده بالا و هزینه سرمایه‌گذاری اندک به منظور خنک‌کاری پیل	[۱۳]	افزایش بازده الکتریکی پیل فتوولتائیک از ۱۰/۳ درصد به ۱۲/۳ درصد و همچنین تحقق بازده سیستم PV/T به میزان ۴۹/۴ درصد	
بررسی نسبت بهینه ظرفیت یک اینورتر خورشیدی و تأثیر آن بر شرایط یک منطقه خاص	بررسی شرایط نوردیک ^۲ به منظور افزایش نسبت بهینه به منظور بهروری بیشتر در کشور فنلاند	[۱۴]	پیدا کردن نسبت دقیق اندازه آرایه خورشیدی به اینورتر بین ۱/۶ تا ۲/۱۷ و افزایش این نسبت در سیستم‌های با ابعاد کوچک‌تر	
خنک‌کاری با استفاده از تبخیر	بررسی تأثیر خنک‌کاری تبخیری و تأثیر آن بر بازده پیل و نیروگاه خورشیدی	[۱۵]	کاهش دما بیش از ۲۰ درجه سانتی‌گراد در پیل و افزایش کارایی حدود ۱۴ درصد در توان تولیدی	
کاهش دمای سلول خورشیدی	بررسی تأثیر خنک‌کاری با نانو سیال آلومینیوم در مقایسه با سایر روش‌های خنک‌کاری	[۱۶]	با بهره‌گیری از دیتاهای تجربی مشاهده توسعه کارایی و توان خروجی پیل‌های فتوولتائیک را به ترتیب به میزان ۱۳/۵ و ۱۲/۷ درصد نسبت به خنک‌کاری با آب	
خنک‌سازی و بهروری بهینه از نیروگاه خورشیدی	تولید هم‌زمان آب شیرین و انرژی برق	[۱۷]	افزایش ۱۴/۵۱ درصد راندمان الکتریکی و دریافت ۰/۵۵ لیتر آب شیرین	
طراحی و عملکرد سلول خورشیدی	طراحی سلول خورشیدی پروسکیت با کمک نرم‌افزار WIEN2k	[۱۸]	استفاده از اصول نظریه تابع چگالی دارای و محاسبه راندمان تبدیل به توان ۲۵/۱۳ درصد	
استفاده از TPV	برآورد میزان تولید انرژی الکتریکی در صورت به‌کارگیری TPV در کوره قوس الکتریکی	[۱۹]	تحقق ضریب ظرفیت حدود ۵۴ درصد در کوره قوس الکتریکی (در مقایسه با PV معمولی در فضای آزاد)	
افزایش شدت تابش خورشیدی	توسعه مدل برای تمرکز یکنواخت تابش روی سطح	[۲۰]	مناسب برای TPV و تحقق ضریب تمرکز ۱۰۰ تا ۱۵۰ با دمای ۱۰۵۰ °C به منظور افزایش بازده انرژی	
هیبرید کردن با سایر نیروگاه‌ها	هیبرید کردن با توربین باد	(۲۱)	اولویت‌بندی مناطق در کشور براساس پیشینه ضریب توان	

انتخاب نسبت بهینه ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر نیازمند تحلیل دقیق شرایط اقلیمی و اقتصادی است. لاند^۱ و پایپو^۲ در سال ۱۹۹۴ با روش (آنالیز عددی) به این مهم پرداختند. روش یادشده نشان‌دهنده توانمندی لازم برای طراحی سیستم‌های خورشیدی کارآمد و به‌صرفه است که می‌تواند بسیار مهم باشد. بهبود عملکرد اقتصادی به‌دست‌آمده ممکن است تا ۲۰ درصد بیشتر از ظرفیتی برابر با آرایه فتوولتائیک در مقابل بدون آرایه فتوولتائیک باشد. ناحیه بهینه کاملاً صاف بوده و انحراف‌ها تا ۲۰ درصد $\pm$ از نقطه بهینه معمولاً باعث تلفات کمتر از ۲ درصد به دست آید [۲۲]. بررسی این نسبت توسط ماندال^۳ و همکاران (۲۰۰۶) انجام شد که نسبت بهینه برای اینورترهای با کارایی پایین ۱/۵ تا ۱/۸، و برای اینورترهای با کارایی متوسط ۱/۴ تا ۱/۵ بود، بسته به سیستم ردیابی و ویژگی‌های اینورتر این بررسی جامع بوده، زیرا تقریباً همه شرایط را مورد بررسی قرار داده است [۲۳]. وایزنن^۴ و همکاران (۲۰۱۹) نیز این نسبت بهینه را ۱/۶ تا ۲/۱۷ روی سیستم‌های AISR نشان داده و همچنین بررسی کرده‌اند که این نوع نیروگاه‌ها برای موارد کوچک مناسب‌تر بوده است [۱۴]. کاظم^۵ (۲۰۱۳) در مطالعه‌اش برای تعیین اندازه نسبت ظرفیت بهینه سیستم انرژی خورشیدی به منظور تأمین بار روشنائی در آزمایشگاه انرژی تجدیدپذیر با استفاده از نرم‌افزار HOMER در صوحار^۶، عمان بهره برده است. اگرچه وی به طور مستقیم به نسبت بهینه ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر اشاره نکرده، اما ظرفیت بهینه سیستم فتوولتائیک را ۱/۲ کیلووات و ظرفیت باتری را ۱۶/۸ کیلووات ساعت پیشنهاد کرده است. این نتایج می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر مشابه مورد استفاده قرار گیرد [۲۴].

فاراند^۷ و همکاران با بررسی تأثیر استفاده از منحنی میانگین ساعتی به جای میانگین ماهانه در طراحی سیستم‌های فتوولتائیک (۲۰۱۵) نشان دادند این روش توانسته خطاهای طراحی را کاهش دهد. با استفاده از عبارت‌های جبری توسعه‌یافته، اندازه نسبت بهینه برای اینورتر معین در سیستم خورشیدی به‌دقت محاسبه شده و از نیاز به شبیه‌سازی‌های متعدد جلوگیری شده است. همچنین، اهمیت تعریف توابع مناسب برای دستیابی به نیروگاه‌های فتوولتائیک با رتبه بهینه و تأمین نیازهای مصرف برق را مورد تأکید قرار داده است [۲۵].

در مقاله مروری انجام‌شده توسط هزیم^۸ و همکاران (۲۰۲۳)، بسیاری از الگوریتم‌هایی که میزان نسبت بهینه ظرفیت پنل به اینورتر را نشان می‌دهند، از داده‌های تجربی استفاده کرده‌اند. بهره بردن از روشی مانند یادگیری عمیق می‌تواند ارزش دقیق‌تری از این نسبت بیان کند، در واقع، ارزش این نسبت را به واقعیت نزدیک‌تر کند. نسبت بهینه ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر بسته به مکان و شرایط جغرافیایی متفاوت است، مثلاً ۱/۰۶ تا ۱/۱۱ برای فناوری Thin-Film PV با استفاده از نرم‌افزار SAM برآورد شده است [۲۶].

هزیم و همکاران (۲۰۲۴) از نوعی رویکرد بهینه‌سازی تکنو - اقتصادی استفاده کردند. این رویکرد شامل ضریب عملکرد، انرژی تولیدی سالانه و تلفات سیستم بوده است. داده‌های واقعی آب‌وهوایی و منحنی‌های عملکرد اینورتر ادغام شد تا نسبت بهینه برای هزینه همتراز شده انرژی محاسبه شود [۱۲]. بهول^۹ و خادم^{۱۰} در سال ۲۰۲۴، سیستم‌های فتوولتائیک مقیاس بزرگ را با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی که یک روش بهینه‌سازی جدید برای تعیین نسبت بارگذاری اینورتر است، شبیه‌سازی کرده‌اند. استفاده از مدل‌سازی پیشرفته و تحلیل داده‌های میدانی نشان می‌دهند چگونه تنظیم دقیق می‌تواند به بهبود عملکرد کلی سیستم و کاهش هزینه‌های تولید برق منجر شود [۲۷].

اگرچه مطالعات فراوانی در خصوص بهبود عملکرد پنل‌های فتوولتائیک و نیروگاه‌های خورشیدی صورت پذیرفته است، اما تعدادی انگشت‌شمار به بررسی نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر بر عملکرد نیروگاه پرداخته‌اند. در این میان، تعداد

1. Lund
2. Peippo
3. Mondol
4. Väisänen
5. Kazem
6. Sohar
7. Faranda
8. Hazim
9. Bahloul
10. Khadem

محدودی‌تری تأثیر اقلیم بر این نسبت را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نسبت بهینه ظرفیت پنل خورشیدی به ظرفیت اینورتر یکی از عوامل کلیدی در طراحی سیستم‌های خورشیدی متصل به شبکه بوده است. این نسبت بر کارایی و هزینه‌های تولید برق و توجیه اقتصادی این موضوع تأثیرگذار است.

۲. مدل‌سازی

برای محاسبه نسبت بهینه ظرفیت پنل خورشیدی به اینورتر، لازم است مدل جامعی استفاده شود. این مدل باید امکان مطالعه عواملی همچون تابش خورشید روی سطح پنل، اقلیم و محل نصب نیروگاه، ویژگی‌های پنل فتوولتائیک و اینورتر بر میزان تولید نیروگاه داشته باشد. جدول ۲، به بررسی مدل‌های توسعه‌یافته جهت شبیه‌سازی پنل، اینورتر و تابش خورشیدی پرداخته است. در دنیای امروز، مدل‌های مطرح شبیه‌سازی نیروگاه‌های خورشیدی در نرم‌افزارهای تجاری پیاده‌سازی شده‌اند. این نرم‌افزارها امکان شبیه‌سازی شرایط واقعی را فراهم می‌کنند، از این‌رو بررسی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های انرژی خورشیدی به طور مؤثر کمک می‌شود [۲۸].

با توجه به عواملی از جمله سهولت کار با نرم‌افزار و همچنین جامعیت بالای تحلیل سیستم، نرم‌افزارهای SAM، PVSyst و PV*Sol مورد بررسی ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. این نرم‌افزارها به عنوان گزینه اول در شبیه‌سازی نیروگاه‌های خورشیدی شناخته می‌شوند. ویژگی‌های این نرم‌افزارها نه تنها در پروژه‌های تحقیقاتی، بلکه در طراحی و بهینه‌سازی نیروگاه‌های تجاری نیز به طور عمده‌ای مورد استفاده قرار گیرند [۳۳]. جدول ۳ به بررسی قابلیت‌های نرم‌افزارهای تجاری خورشیدی می‌پردازد و جدول ۴ مقایسه نرم‌افزارها بر اساس کاربرد تخصصی را بیان می‌کند.

جدول ۲. مدل‌های شبیه‌سازی اجزا و عوامل اثرگذار بر عملکرد نیروگاه خورشیدی

پنل فتوولتائیک	مدل تک دیودی [۲۹]	مدل دو دیودی [۳۰]
اینورتر	تکنیک شناسایی سیستم غیرخطی مبتنی بر مدل هم‌رستاین-وینر [۳۱]	مدل دینامیکی و تأثیر آن در عملکرد سیستم توزیع برق [۳۲]

جدول ۳. مقایسه قابلیت‌های نرم‌افزارهای تجاری شبیه‌سازی نیروگاه‌های خورشیدی [۳۴]

مدل کردن اینورتر	رابط کاربری	مدل کردن آب و هوا	تحلیل اقتصادی	عملکرد و UPS
SOLAR PRO (۳۵)	۸۰ درصد	۹۰ درصد	۷۷/۷۷ درصد	۹۰ درصد
Homer Pro (۳۶)	۴۰ درصد	۵۰ درصد	۴۴/۴۴ درصد	۶۰ درصد
Pvp lanner (۳۷)	۴۰ درصد	۶۰ درصد	۱۱/۱۱ درصد	۶۰ درصد
PVF-Chart (۳۸)	x	۲۰ درصد	۱۱/۱۱ درصد	۳۰ درصد
PVsyst (۳۹)	۸۰ درصد	۷۰ درصد	۸۸/۸۸ درصد	۸۰ درصد
RETScreen (۴۰)	۴۰ درصد	۴۰ درصد	۵۵/۵۵ درصد	۳۰ درصد
SAM (۴۱)	۶۰ درصد	۴۰ درصد	۸۸/۸۸ درصد	۷۰ درصد

جدول ۴. مقایسه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی خورشیدی بر اساس کاربرد تخصصی

آیتم	نرم‌افزار	توضیحات
طراحی سه‌بعدی و اثرات سایه	Helioscope (۴۲) PV*SOL (۴۳)	امکان مدل‌سازی سایه‌ها و تحلیل اثرات آن‌ها بر تولید انرژی
تحلیل اقتصادی	RETScreen Homer Pro SAM PVSyst	انجام محاسبات مالی، زمان بازگشت سرمایه و سناریوهای اقتصادی
پروژه‌های کوچک و سریع	OpenSolar (۴۴) Solaredge Designer (۴۵)	مناسب برای طراحی سریع، به‌ویژه در پروژه‌هایی با پیچیدگی کمتر
شبیه‌سازی کامل سیستم	PVsyst SAM PV*SOL	مدل‌سازی عملکرد فنی نیروگاه، با در نظر گرفتن تلفات، شرایط اقلیمی و تولید انرژی سالانه

در این پژوهش از نرم‌افزار PVsyst به منظور ارزیابی تأثیر تغییر نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر استفاده شده است. همان‌طور که در جدول ۲ به طور خلاصه بیان شد، به منظور شبیه‌سازی پنل خورشیدی مدل‌های مختلفی توسعه یافته است. یکی از این مدل‌ها، مدل پارامتریک است که بر اساس داده‌های تجربی بیان شده است. همچنین، مدل دمای اسمی عملکرد سلول که توان نامی خروجی پنل را به صورت تقریبی تخمین می‌زند. مدل‌های یادگیری ماشین نیز برای شرایط پیچیده به کار می‌روند. هر نرم‌افزار شبیه‌سازی بر اساس هدف خود از مدلی خاص برای شبیه‌سازی پنل خورشیدی استفاده کرده است. نرم‌افزار PVsyst از رایج‌ترین و دقیق‌ترین روش برای این مدل‌سازی پنل خورشیدی بهره می‌گیرد. نرم‌افزار PVsyst برای شبیه‌سازی پنل فتوولتائیک از مدل تک دیود استفاده می‌کند. معادله پایه با رابطه ۱ بیان شده است [۴۶].

$$I = I_{ph} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT_c}} - 1 \right) \quad (1)$$

در رابطه ۱، مقاومت موازی سلول R_{sh} بوده و I_0 جریان اشباع دیود، K ثابت بوده و I_{ph} جریان فتوالکتریک تولیدشده توسط تابش نور است. به طور دقیق‌تر، اجزای مدل شامل جریان فوتونی که تابع تابش خورشیدی و دمای سلول است، و همچنین جریان اشباع دیود که وابسته به دماست، هستند.

نرم‌افزار PVsyst به منظور ساده‌سازی محاسبات، در برخی موارد به جای حل عددی معادله کامل، از پارامترهای ساده‌شده‌ای نظیر امپدانس سری معادل و ضریب تصحیح ولتاژ استفاده کرده است. این رویکرد، تحلیل اقتصادی مبتنی بر داده‌های سالانه را با دقت و سهولت بیشتری ممکن ساخته است. در ادامه، شبیه‌سازی عملکرد اینورتر ارائه شده است که بر پایه یک مدل تجربی مبتنی بر نقاط عملکرد واقعی و بازدهی آن انجام گرفته است. این مدل با استفاده از رابطه ۲ بیان شده است [۳۹].

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_0 + K \times P} \quad (2)$$

در رابطه ۲، P_0 تلفات ثابت بیان شده و K ضریب تلفات نسبی است. مدل‌سازی تابش خورشیدی برای تخمین صحیح تولید انرژی نیروگاه خورشیدی از اهمیت بالایی برخوردار است.

تابش کل دریافتی بر سطح مایل از مجموع سه مؤلفه مستقیم، پراکنده و بازتاب زمین طبق رابطه ۳ محاسبه شده است [۴۷].

$$G_T = G_r + G_{Td} + G_{Tb} \quad (3)$$

در رابطه ۳، G_r ، G_{Td} و G_{Tb} به ترتیب عبارت‌اند از: تابش کل روی سطح مایل، مؤلفه بازتاب زمین، مؤلفه پراکنده روی سطح مایل و مؤلفه مستقیم روی سطح مایل.

با افزایش نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر، هزینه‌های سرمایه‌گذاری در بخش‌های مختلف از جمله پنل فتوولتائیک، کابل، اتصالات، زمین مورد نیاز، افزایش می‌یابد، اما تأثیری بر هزینه سرمایه‌گذاری در بخش‌هایی همچون اینورتر نخواهد داشت. به طور کلی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری نیروگاه خورشیدی را می‌توان به موارد ذیل طبقه‌بندی کرد: (۱) پنل، (۲) اینورتر، (۳) کابل DC و AC، (۴) تجهیزات اتصال به شبکه، (۵) تجهیزات حفاظتی، (۶) تملک (زمین)، (۷) حمل‌ونقل بین‌المللی، (۸) حمل‌ونقل داخلی، (۹) تسطیح زمین، (۱۰) مجوزها (لغو چرای دام و...)، (۱۱) فنی - مهندسی، (۱۲) نصب، (۱۳) فنس و دیوارکشی، (۱۴) اتاقک نگهبان (در صورت لزوم) و (۱۵) سایر هزینه‌ها از جمله بیمه، مالیات، ترخیص کالا. بخش‌هایی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری بیان‌شده ارتباط ضعیفی با ظرفیت پنل در زمان ثابت بودن ظرفیت اینورتر دارند، اما می‌توان در بدترین سناریو، فقط هزینه سرمایه‌گذاری اینورتر را بدون ارتباط با این نسبت دانست. از این‌رو در بدترین سناریو، اگر درصد افزایش هزینه سرمایه‌گذاری، سمت راست رابطه (۴)، کوچک‌تر از میزان افزایش تولید سالانه باشد، آن نسبت ظرفیت پنل به اینورتر توجیه‌پذیر است. از این‌رو اگر قید بیان‌شده با رابطه ۴ ارضا شود، این سرمایه‌گذاری به‌صرفه خواهد بود.

$$SPPC \geq SPPCIF * \alpha \quad (4)$$

در رابطه ۴، $SPPC$ نشان‌دهنده درصد افزایش تولید سالانه نیروگاه خورشیدی، $SPPCIF$ درصد افزایش ظرفیت پنل فتوولتائیک و α ضریب حداکثر افزایش هزینه سرمایه‌گذاری با افزایش ظرفیت پنل فتوولتائیک نصب شده است. ضریب α

برای هر نیروگاه متفاوت است و وابسته به عوامل مختلف از جمله قیمت اجزای نیروگاه خورشیدی، هزینه‌های نرم و سایر موارد است. به طور نمونه، اگر هزینه سرمایه‌گذاری در بخش اینورتر ۱۳ درصد کل هزینه سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شود [۴۸]، حداکثر مقدار این ضریب را می‌توان حدود ۰/۸۷ در نظر گرفت.

۳. نتایج

در این مطالعه تأثیر نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر در بازه ۰/۹ تا ۱/۱۴ در ۱۰۰ شهر ایران بر میزان تولید نیروگاه خورشیدی بررسی شده است. شهرهای انتخاب‌شده دربردارنده مراکز استان‌ها و شهرهای پرجمعیت هر استان بوده است. نظر به مزیت نصب نیروگاه‌های خورشیدی بر سقف ساختمان‌ها (از جمله کاهش تلفات خطوط انتقال و توزیع، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی)، ظرفیت اینورتر نیروگاه‌های خورشیدی مورد بررسی ۲۰ kW انتخاب شده است. مشخصات پنل فتوولتائیک و اینورتر مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۵، بیان شده است.

در این مطالعه نسبت ۱/۰۲ ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر، به عنوان نسبت پایه و طراحی مرجع برای هر نقطه مورد مطالعه در نظر گرفته شده و تغییرات میزان تولید نسبت به این مرجع محاسبه شده است. در جدول ۶ تعاریف سناریو بررسی‌شده در این مطالعه بیان شده است.

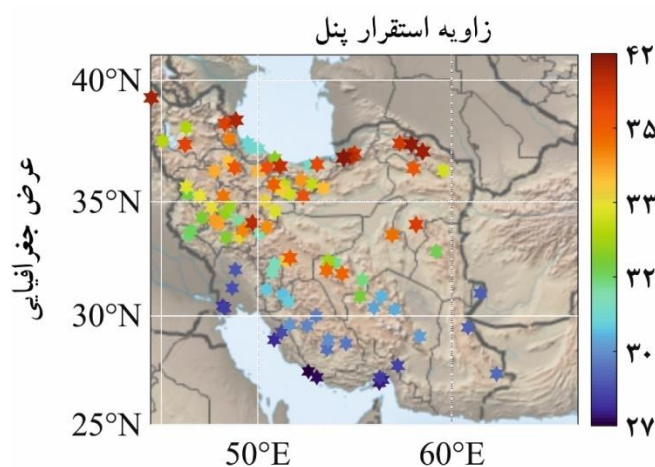
جدول ۵. مشخصات پنل فتوولتائیک و اینورتر مورد استفاده در این مطالعه

پنل فتوولتائیک		اینورتر
برند	AEG	Growatt
مدل	AS-M1443-H(G1) (49)	Growatt MID 20KTL3-X (50)
ظرفیت	۶۰۰ W	۲۰ kW

جدول ۶. سناریوهای تعریف‌شده

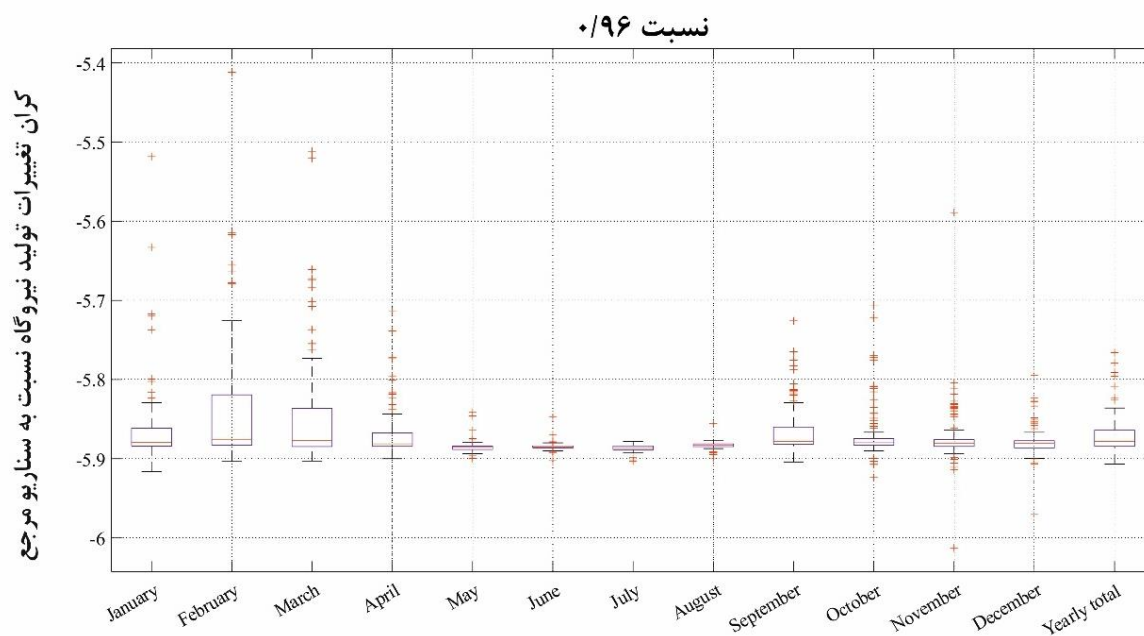
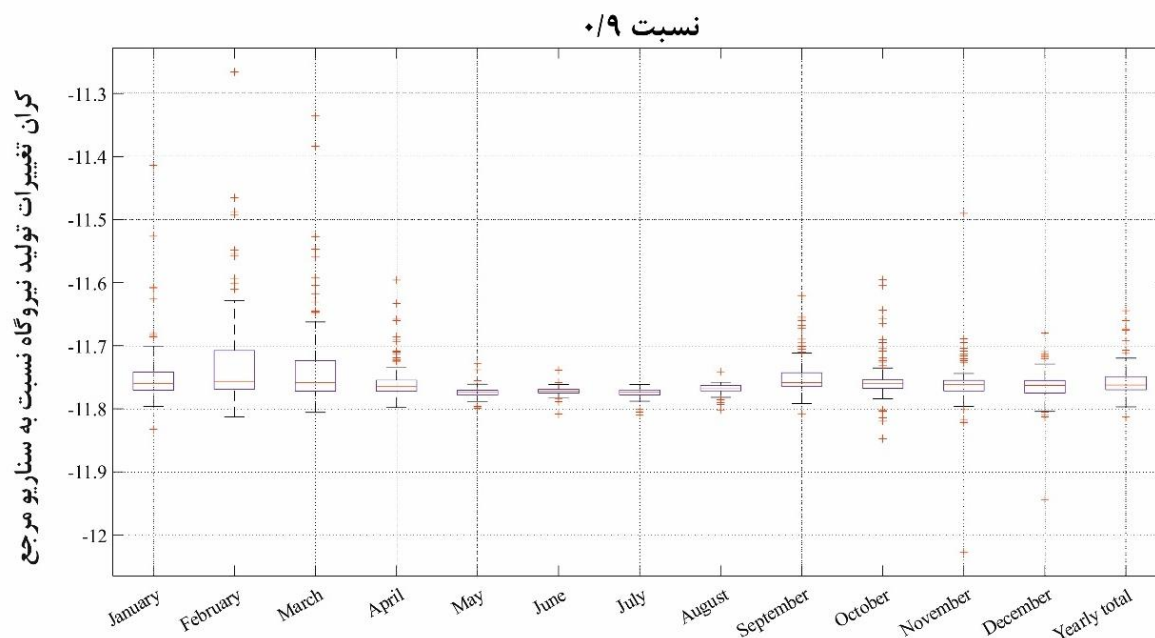
تغییر ظرفیت پنل نسبت به سناریو مرجع	نسبت ظرفیت پنل به اینورتر	سناریو
۰	۱/۰۲	سناریو مرجع
-۱۱/۷۸ درصد	۰/۹۰	سناریو نخست
-۵/۸۸ درصد	۰/۹۶	سناریو دوم
+۵/۸۸ درصد	۱/۰۸	سناریو سوم
+۱۱/۷۸ درصد	۱/۱۴	سناریو چهارم

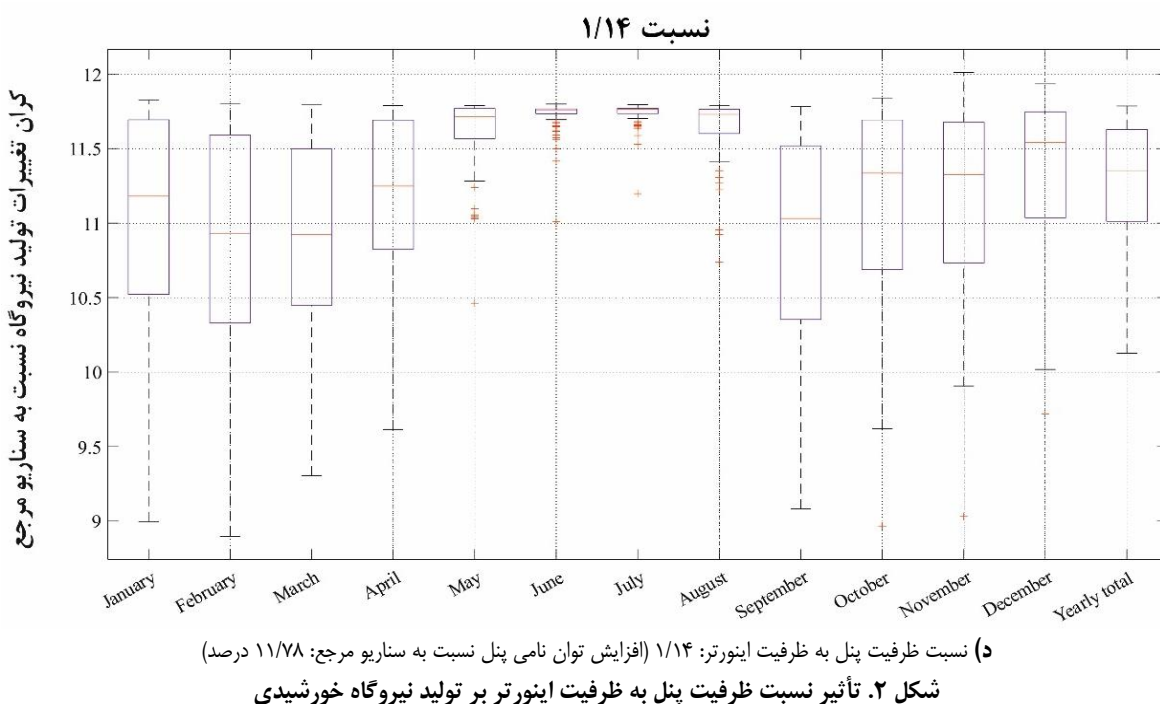
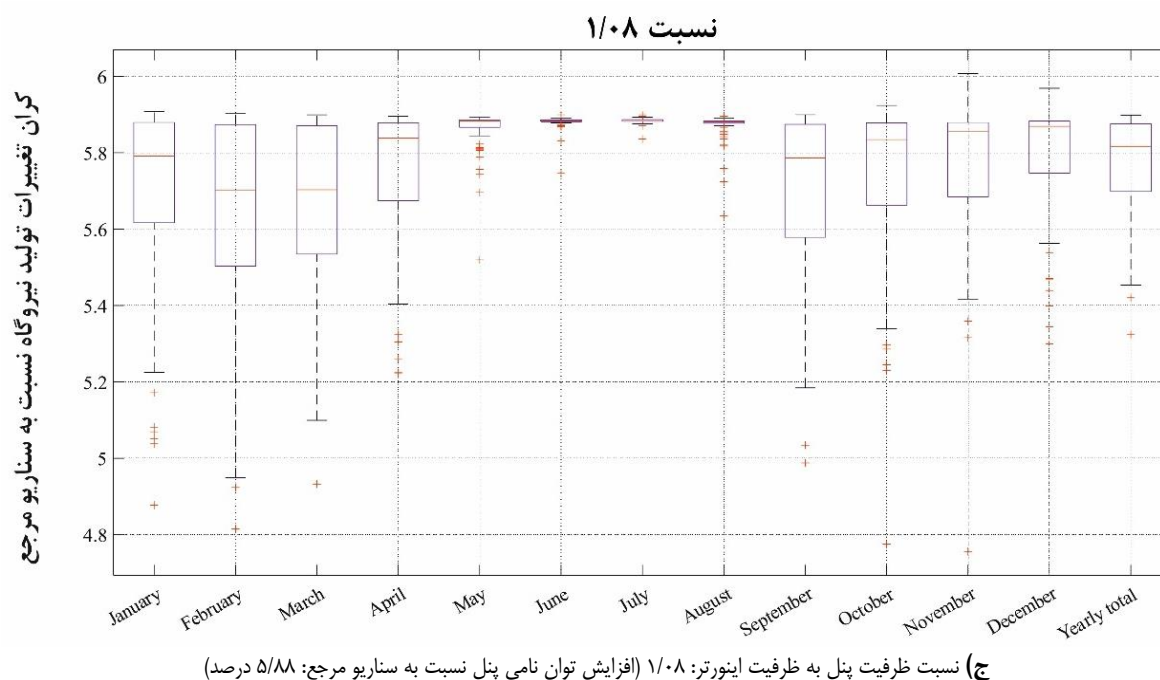
شکل ۱، مناطق مورد بررسی و زاویه استقرار پنل فتوولتائیک را نشان می‌دهد.



شکل ۱. زاویه استقرار پنل فتوولتائیک در هر منطقه

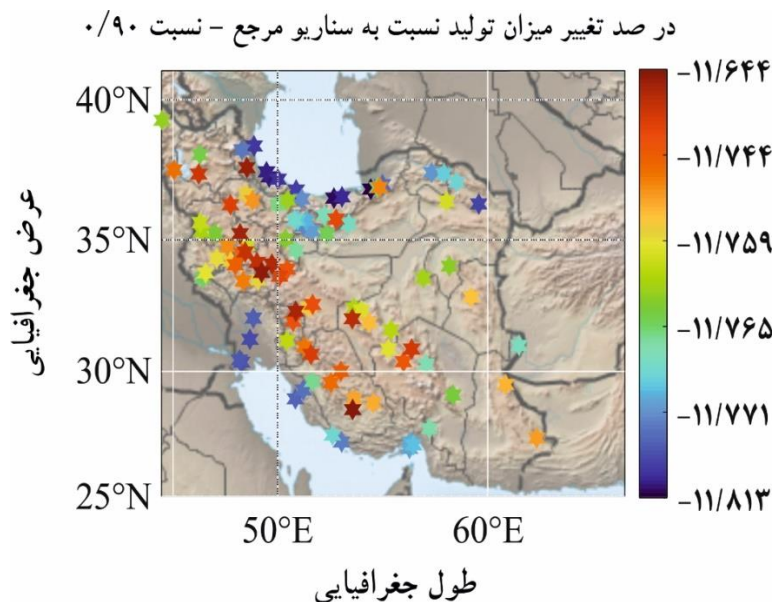
همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، زاویه استقرار پنل، در بازه ۲۷ تا ۴۲ قرار می‌گیرد و برای نزدیک به ۸۰ درصد مناطق، زاویه استقرار کمتر از ۳۵ درجه محاسبه شده است. با تغییر نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر، میزان تولید ماهانه و سالانه دستخوش تغییر می‌شود. شکل ۲، کران تغییرات تولید نیروگاه نسبت به سناریو مرجع برای چهار نسبت ۰/۹، ۰/۹۶، ۱/۰۸ و ۱/۱۴ در نقاط مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



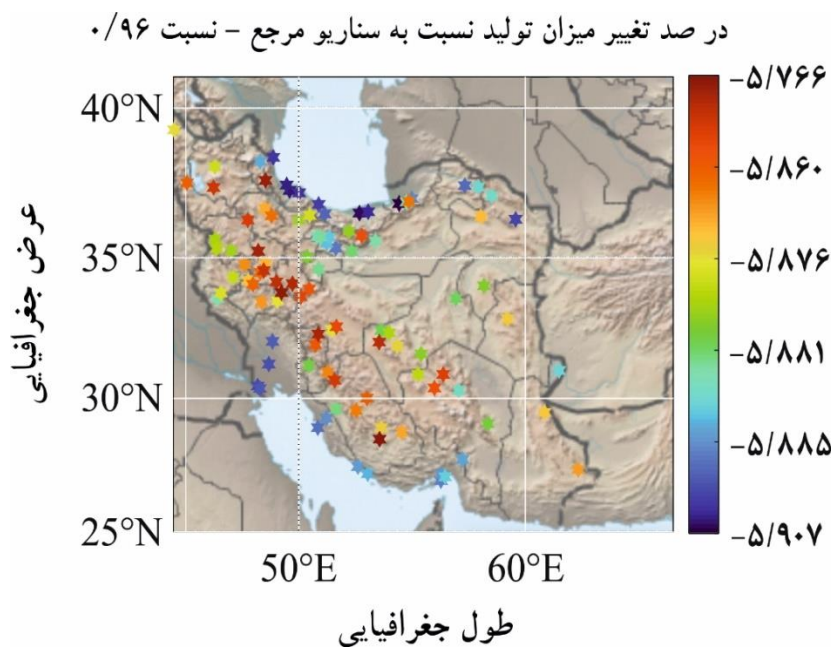


همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، محدوده تغییر میزان تولید نیروگاه خورشیدی نسبت به سناریو مرجع در حدود درصد تغییر ظرفیت پنل نسبت به سناریو مرجع است. همچنین، میزان تأثیر سهم نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر وابسته به نقطه مورد بررسی و بازه زمانی مورد مطالعه است، اما کمترین تأثیر محل احداث نیروگاه بر درصد تغییر تولید نیروگاه، در چهار ماه می، جون، جولای و آگوست است. کرن تغییر تولید به ازای تغییر نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر، از ۰/۹ (معادل کاهش ۱۱/۷۸ درصد ظرفیت پنل نسبت به سناریو مرجع)، ۰/۹۶ (معادل کاهش ۵/۸۸ درصد ظرفیت پنل نسبت به سناریو مرجع)، ۱/۱۴ (معادل افزایش ۱۱/۷۸ درصد ظرفیت پنل نسبت به سناریو مرجع)، به ترتیب از ۱۱/۸۱- درصد تا ۱۱/۶۴- درصد (به طور متوسط ۱۱/۷۶- درصد)، از ۵/۹۱-

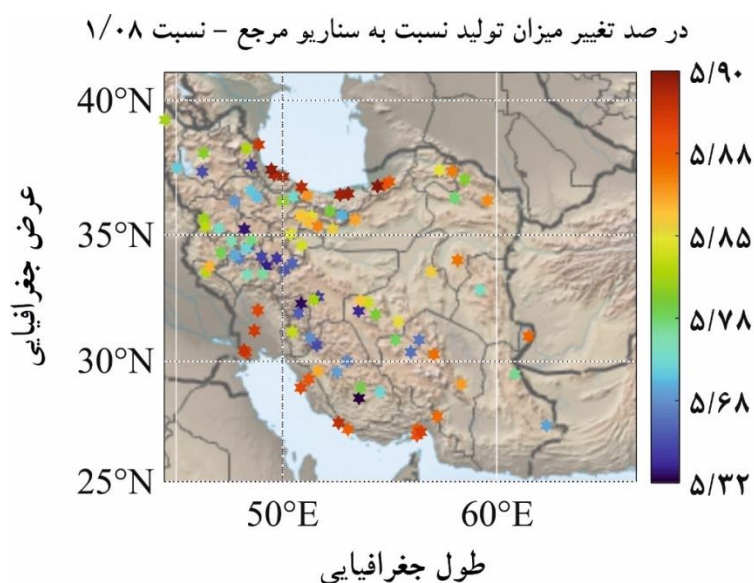
درصد تا ۵/۷۷- درصد (به طور متوسط ۵/۸۷- درصد)، از ۵/۳۲ درصد تا ۵/۹۰ درصد (به طور متوسط ۵/۷۷ درصد) و از ۱۰/۱۲ درصد تا ۱۱/۷۸ درصد (به طور متوسط ۱۱/۲۷ درصد) پیش‌بینی می‌شود. شکل ۳ به بررسی محل احداث نیروگاه در هر سناریو بر تغییر میزان تولید می‌پردازد.



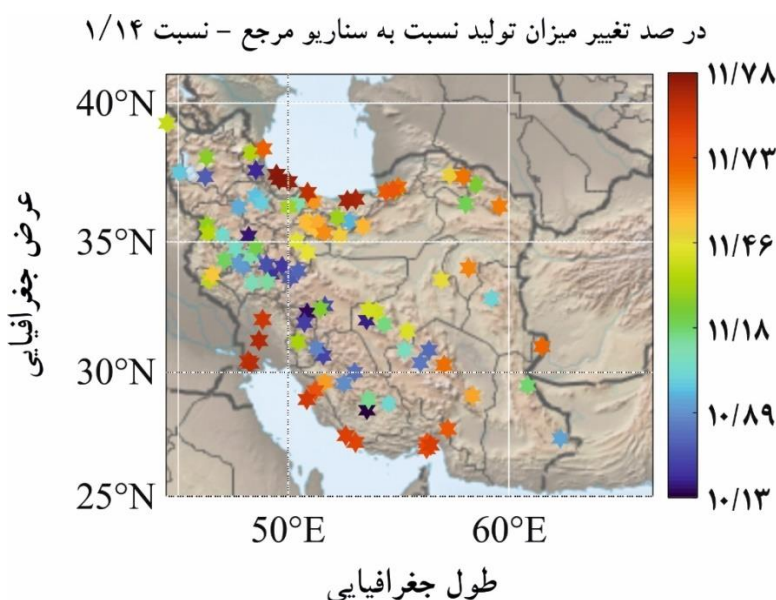
الف) نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر: ۰/۹۰ (کاهش توان نامی پنل نسبت به سناریو مرجع: ۱۱/۷۸ درصد)



ب) نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر: ۰/۹۶ (کاهش توان نامی پنل نسبت به سناریو مرجع: ۵/۸۸ درصد)



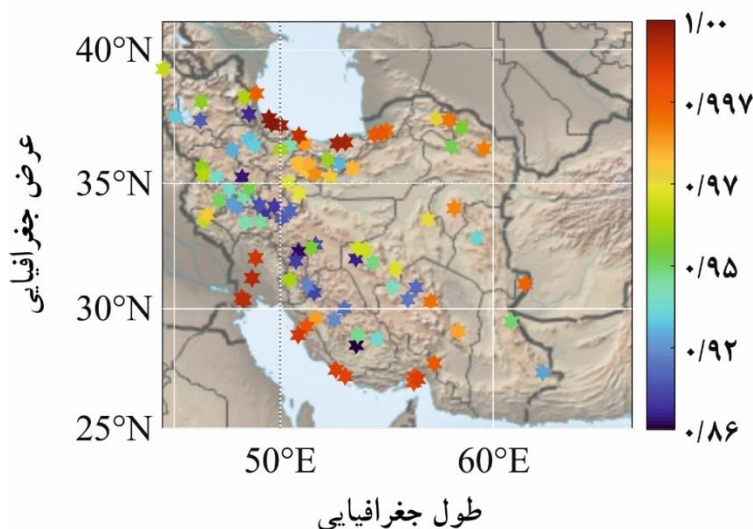
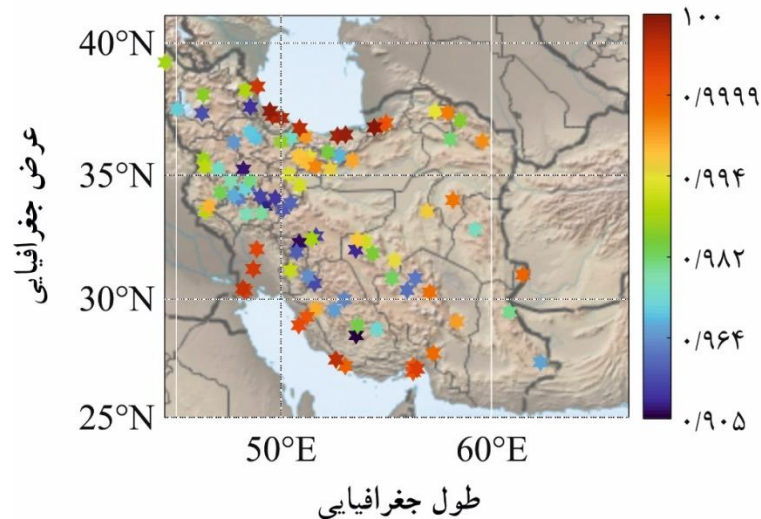
(ج) نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر: ۱/۰۸ (افزایش توان نامی پنل نسبت به سناریو مرجع: ۵/۸۸ درصد)



(د) نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر: ۱/۱۴ (افزایش توان نامی پنل نسبت به سناریو مرجع: ۱۱/۷۸ درصد)

شکل ۳. تأثیر محل احداث نیروگاه در هر سناریو بر تغییر میزان تولید

براساس نتایج به‌دست‌آمده تأثیر رعایت نسبت بهینه ظرفیت پنل به اینورتر در مناطق با شدت تابش کمتر بر سطح پنل بیشتر از سایر مناطق است. بررسی از منظر اقتصادی در نقاط مورد بررسی نشان می‌دهد استفاده از ضریب ۱/۰۸ در طراحی نیروگاه خورشیدی، در صورتی توجیه‌پذیری اقتصادی خواهد داشت که ضریب افزایش هزینه به ازای هر واحد اضافه شدن پنل در محدوده ۹۰/۵ درصد تا بیش از ۱۰۰ درصد از هزینه کل سرمایه‌گذاری قرار گیرد. همچنین، برای ضریب ۱/۱۴ درصد این مقدار در بازه ۸۶/۱ درصد تا ۱۰۰/۲ درصد قرار می‌گیرد. در صورتی که هزینه سرمایه‌گذاری اینورتر براساس مطالعه [۴۸]، ۱۳ درصد از هزینه کل سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شود، انتخاب ضریب نسبت ۱/۰۸ برای تمام مناطق و ۱/۱۴ برای تقریباً تمام مناطق مورد بررسی توجیه‌پذیر خواهد بود. شکل ۴ حداکثر ضریب توجیه‌پذیری اقتصادی افزایش هزینه سرمایه‌گذاری به ازای هر واحد افزایش ظرفیت پنل خورشیدی برای دو نسبت ۱/۰۸ و ۱/۱۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۴. حداکثر ضریب توجیه‌پذیری اقتصادی افزایش هزینه سرمایه‌گذاری به ازای هر واحد افزایش ظرفیت پنل خورشیدی

براساس نتایج گزارش‌شده با کمک شکل ۴، اگر چه از منظر اقتصادی هر دو ضریب ۱/۰۸ و ۱/۱۴ با فرض سهم ۱۳ درصد هزینه سرمایه‌گذاری اینورتر [۴۸]، برای اغلب نقاط توجیه‌پذیر است اما ضریب ۱/۰۸ از توجیه‌پذیری اندکی بالاتر نسبت به ضریب ۱/۱۴ برخوردار است.

نتیجه‌گیری

از میان پنج راهکار مرسوم افزایش کارایی نیروگاه‌های خورشیدی (استفاده از ردیاب خورشیدی، خنک کردن سلول‌های ماژول خورشیدی، تجهیزات با بازده بالاتر، متمرکزکننده خورشیدی و نسبت بهینه ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر)، کمتر به راهکار تعیین نسبت بهینه ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر پرداخته شده است. در این مطالعه ۱۰۰ شهر ایران از جمله مراکز استان‌ها و شهرهای پرجمعیت هر استان، به منظور مطالعه تأثیر اقلیم بر ضریب ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر انتخاب شد. به منظور مطالعه اثر اقلیم بر نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر از نرم‌افزار PVSyst استفاده شده است. تأثیر این نسبت در بازه ۰/۹۰ تا ۱/۱۴ در پنج سناریو مورد مطالعه قرار گرفت. از نسبت ۱/۰۲ به عنوان سناریو مرجع به منظور مقایسه با سایر نسبت‌ها (سناریوها) استفاده شد.

براساس نتایج به دست آمده زاویه استقرار بهینه پنل در محدوده ۲۷ تا ۴۲ برای نقاط مورد مطالعه محاسبه شد. مشاهده شد اگرچه درصد تغییر ظرفیت پنل بر درصد تولید نیروگاه تأثیرگذار است، اما این مقدار وابسته به هر اقلیم است و در هر ماه این مقدار متفاوت خواهد بود. با این وجود به طور کلی می‌توان ادعا کرد کمترین تأثیر محل احداث نیروگاه بر درصد تغییر تولید نیروگاه، در چهار ماه می، جون، جولای و آگوست است. کران تغییر تولید به ازای تغییر نسبت ظرفیت پنل به ظرفیت اینورتر، از ۰/۹۰ (معادل کاهش ۱۱/۷۸ درصد ظرفیت پنل نسبت به سناریو مرجع)، ۰/۹۶ (معادل کاهش ۵/۸۸ درصد ظرفیت پنل نسبت به سناریو مرجع)، ۱/۰۸ (معادل افزایش ۵/۸۸ درصد ظرفیت پنل نسبت به سناریو مرجع) و ۱/۱۴ (معادل افزایش ۱۱/۷۸ درصد ظرفیت پنل نسبت به سناریو مرجع)، به ترتیب از ۱۱/۸۱- درصد تا ۱۱/۶۴- درصد (به طور متوسط ۱۱/۷۶- درصد)، از ۵/۹۱- درصد تا ۵/۷۷- درصد (به طور متوسط ۵/۸۷- درصد)، از ۵/۳۲ درصد تا ۵/۹۰ درصد (به طور متوسط ۵/۷۷ درصد) و از ۱۰/۱۲ درصد تا ۱۱/۷۸ درصد (به طور متوسط ۱۱/۲۷ درصد) پیش‌بینی می‌شود.

در دو سناریو نسبت ۱/۰۸ و ۱/۱۴، در صورتی که درصد افزایش هزینه سرمایه‌گذاری به ازای هر واحد پنل فتوولتائیک به ترتیب در محدوده ۹۰/۵ درصد تا ۱۰۰/۳ درصد و ۸۶/۱ درصد تا ۱۰۰/۲ درصد تغییر یابد، این افزایش ظرفیت پنل صرفه اقتصادی خواهد داشت.

منابع

- [1] IEA R. Renewables 2023, Analysis and forecast to 2028. Paris: International Energy Agency. 2024.
- [2] Blakers A, Stocks M, Lu B, Cheng C. The observed cost of high penetration solar and wind electricity. *Energy*. 2021;233:121150.
- [3] Jowett P. <https://wwwpv-magazine.com/2024/09/27/global-average-solar-lcoe-stood-at-0-044-kwh-in-2023-says-irena/>. 2023.
- [4] Andria Kusuma V, Firdaus AA, Suprpto S, Yuniar R, Trimulya H, Priyanto Y. Comparative analysis of single-axis solar tracker performance with and without reflector under various weather conditions. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*. 2024;13:328.
- [5] Fathi A, Bararzadeh Ledari M, Saboohi Y. Evaluation of Optimal Occasional Tilt on Photovoltaic Power Plant Energy Efficiency and Land Use Requirements, Iran. *Sustainability*. 2021;13(18):10213.
- [6] Oli A, Sharma S, Neupane D, Khanal S, Labh SK. Comparative Study on Efficiency Analysis of Fixed and Dual-Axis Solar Tracking System. 2024;3:81-6.
- [7] Fathi A, Yousefi H, Komarizadeh A, Salehi M, Choubineh K, Ghahremani L. Cost-Effective Dual-Axis Solar Tracker with Enhanced Performance. *Environmental Energy and Economic Research*. 2022;6(3):1-13.
- [8] Fathi A, Salehi M, Komarizadeh A, Choubineh K, Golkar S, Ghahremani L. Evaluating a Dual-Axis Solar Tracker's Performance on Cloudy and Partly Cloudy Days. *Journal of Sustainable Energy Systems*. 2021;1(1):71-81.
- [9] Kazem HA, Chaichan MT, Al-Waeli AHA, Sopian K. Recent advancements in solar photovoltaic tracking systems: An in-depth review of technologies, performance metrics, and future trends. *Solar Energy*. 2024;282:112946.
- [10] Neelima K, Navya Y, Aishwarya L, Bhanutej JN. Smart Solar Energy System with IoT-Enabled Tracking. *E3S Web of Conferences*. 2025;616.
- [11] Barbón A, Carreira-Fontao V, Bayón L, Spagnuolo G. Energy, environmental and economic analysis of the influence of the range of movement limit on horizontal single-axis trackers at photovoltaic power plants. *Journal of Cleaner Production*. 2025;489:144637.
- [12] Imad Hazim H, Azmi Baharin K, Kim Gan C, Sabry AH. Techno-economic optimization of photovoltaic (PV)-inverter power sizing ratio for grid-connected PV systems. *Results in Engineering*. 2024;23:102580.
- [13] Fakouriyan S, Saboohi Y, Fathi A. Experimental analysis of a cooling system effect on photovoltaic panels' efficiency and its preheating water production. *Renewable Energy*. 2019;134:1362-8.
- [14] Väisänen J, Kosonen A, Ahola J, Sallinen T, Hannula T. Optimal sizing ratio of a solar PV inverter for minimizing the levelized cost of electricity in Finnish irradiation conditions. *Solar Energy*. 2019;185:350-62.
- [15] Haidar ZA, Orfi J, Kaneesamkandi Z. Experimental investigation of evaporative cooling for enhancing photovoltaic panels efficiency. *Results in Physics*. 2018;11:690-7.
- [16] Salehi R, Jahanbakhshi A, Ooi JB, Rohani A, Golzarian MR. Study on the performance of solar cells cooled with heatsink and nanofluid added with aluminum nanoparticle. *International Journal of Thermofluids*. 2023;20:100445.
- [17] Srithar K, Akash K, Nambi R, Vivar M, Saravanan R. Enhancing photovoltaic efficiency through evaporative cooling and a solar still. *Solar Energy*. 2023;265:112134.
- [18] Deepthi Jayan K. Design and Comparative Performance Analysis of High-Efficiency Lead-Based and Lead-Free Perovskite Solar Cells. *physica status solidi (a)*. 2022;219(7):2100606.
- [19] Saboohi Y, Fathi A, Škrjanc I, Logar V. EAF Heat Recovery from Incident Radiation on Water-Cooled Panels Using a Thermophotovoltaic System: A Conceptual Study. *steel research international*. 2018;89(4):1700446.
- [20] Tavakol-Moghaddam Y, Saboohi Y, Fathi A. Optimal design of solar concentrator in multi-energy hybrid systems based on minimum exergy destruction. *Renewable Energy*. 2022;190:78-93.

- [21] Fathi A, Ghayedhosseini A, Salehi M. Optimizing Wind-Solar Power Plants: Novel Structures for Identifying Potential Sites and Capacity Ratios in Iran. *Journal of Energy Management and Technology*. 2023;7(3):153-64.
- [22] Peippo K, Lund PD. Optimal sizing of solar array and inverter in grid-connected photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1994;32(1):95-114.
- [23] Mondol JD, Yohanis YG, Norton B. Optimal sizing of array and inverter for grid-connected photovoltaic systems. *Solar Energy*. 2006;80(12):1517-39.
- [24] Kazem HA. Optimal Sizing of Photovoltaic Systems Using HOMER for Sohar, Oman. https://www.researchgate.net/publication/260106045_Optimal_Sizing_of_Photovoltaic_Systems_Using_HOMER_for_Sohar_Oman. 2013.
- [25] Faranda RS, Hafezi H, Leva S, Mussetta M, Ogliari E. The Optimum PV Plant for a Given Solar DC/AC Converter. *Energies*. 2015;8(6):4853-70.
- [26] Hazim HI, Baharin KA, Gan CK, Sabry AH, Humaidi AJ. Review on Optimization Techniques of PV/Inverter Ratio for Grid-Tie PV Systems. *Applied Sciences*. 2023;13(5):3155.
- [27] Bahloul M, Khadem S. A refined method for optimising inverter loading ratio in utility-scale photovoltaic power plant. *Energy Reports*. 2024;12:5110-5.
- [28] Kumar M, Kumar A. Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;78:554-87.
- [29] Vinod, Kumar R, Singh SK. Solar photovoltaic modeling and simulation: As a renewable energy solution. *Energy Reports*. 2018;4:701-12.
- [30] Adamo F, Attivissimo F, Di Nisio A, Spadavecchia M. Characterization and testing of a tool for photovoltaic panel modeling. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. 2011;60(5):1613-22.
- [31] Patcharaprakiti N, Kirtikara K, Monyakul V, Chenvidhya D, Thongpron J, Sangswang A, et al. Modeling of single phase inverter of photovoltaic system using Hammerstein–Wiener nonlinear system identification. *Current Applied Physics*. 2010;10(3, Supplement):S532-S6.
- [32] Dash PP, Kazerani M. Dynamic modeling and performance analysis of a grid-connected current-source inverter-based photovoltaic system. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2011;2(4):443-50.
- [33] Kaleshwarwar A, Bahadure S. Validating the credibility of solar simulation tools using a real-world case study. *Energy and Buildings*. 2023;301:113697.
- [34] DSNEG. 7 most popular solar PV system design and simulation software 2019 [Available from: <https://www.dsnerg.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34226867.html>].
- [35] Tools SD. SolarPro software 2025 [Available from: <https://www.solar设计tools.com/solarpro>].
- [36] ul HEb. HOMER PRO Software 2025 [Available from: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>].
- [37] PVPlanner. PV*Planner software 2025 [Available from: <https://www.pvplanner.de/>].
- [38] PVF-Chart. PV F-CHART: Photovoltaic systems analysis software 2025 [Available from: <https://fchartsoftware.com/pvfchart/>].
- [39] SA. P. (2023). PVsyst Software Help Documentation (Version 7.2). 2023 [Available from: <https://www.pvsyst.com>].
- [40] Canada NR. RETScreen Expert software 2025 [Available from: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>].
- [41] National Renewable Energy L. System Advisor Model (SAM) software. 2025.
- [42] Folsom L. HelioScope software. 2025.
- [43] Software V. PV*SOL premium simulation software 2025 [Available from: <https://www.valentin-software.com/en/products/photovoltaics/94/pvsol-premium>].
- [44] Inc O. OpenSolar platform 2025 [Available from: <https://www.opensolar.com>].
- [45] technologies S. SolarEdge Dsigner 2025 [Available from: <https://designer.solaredge.com>].
- [46] Commission IE. IEC 61853-1: Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating—Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating. 2016.
- [47] Green MA. Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications.: Prentice Hall.; 1982.

- [48] Barbuscia M. Economic viability assessment of floating photovoltaic energy. Work Pap. 2018;1(1):1-11.
- [49] AEG. AEG; 2025 [Available from: <https://aeg-solar.com/service/downloads/>].
- [50] GROWATT. GROWATT; 2025 [Available from: <https://growatt.tech/product/growatt-mid-20ktl3-xh/>].