



The University of Tehran Press

Review of Environmental Parameter Modeling Affecting the Performance of Solar Photovoltaic Systems

Mahdi Gandomzadeh¹ | Aslan Gholami² | Majid Zandi^{3*}

1. Department of Renewable Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_gandomzadeh@sbu.ac.ir
2. Department of Renewable Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: a_gholami@sbu.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Renewable Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_zandi@sbu.ac.ir

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article type: Research Paper Article History: Received: 22 May 2025 Revised: 21 July 2025 Accepted: 26 September 2025 Published Online: 15 January 2025 Keywords: Solar photovoltaic systems, Environmental parameter modeling, Machine learning, Bibliometric analysis, Content analysis.	The main objective of this study is to systematically review research on environmental parameter modeling for photovoltaic systems and to highlight recent methodological trends. PV performance is strongly influenced by environmental factors such as solar irradiance, temperature, wind speed, dust, humidity, precipitation, and atmospheric pressure. Accurate modeling of these parameters is essential for improving efficiency and reliability. To address this, the study employs bibliometric and content analysis of Scopus publications from 1984 to 2024. Results show a 9.13% annual growth in related studies, with China, India, Italy, the U.S., and Iran as leading contributors. Modeling approaches are categorized into white-box, black-box, and hybrid methods. Findings indicate that while white-box models provide interpretability, machine learning-based black-box models achieve higher predictive accuracy. Hybrid models, integrating physical and data-driven techniques, offer the most robust solutions. The study underscores the increasing role of ML in PV performance and recommends future research on hybrid frameworks, IoT-enabled data collection, and explainable AI.

Cite this article: Gandomzadeh, M.; Gholami, A. & Zandi, M. (2026). Review of Environmental Parameter Modeling Affecting the Performance of Solar Photovoltaic Systems. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (1), 165-185. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394623.1144>



© Mahdi Gandomzadeh, Aslan Gholami, Majid Zandi
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394623.1144>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Photovoltaic (PV) systems are among the fastest-growing renewable energy technologies due to their significant role in reducing greenhouse gas emissions and dependence on fossil fuels. However, their performance is strongly influenced by environmental parameters such as solar irradiance, temperature, dust accumulation, wind speed, humidity, and atmospheric pressure, which introduce considerable variability in power output. To address this challenge, two main modeling approaches have been widely adopted: physics-based (white-box) models and data-driven (black-box) models. While white-box models provide physical interpretability, they often fail to capture the nonlinear behavior of real operating conditions. In contrast, machine learning-based black-box models offer high predictive accuracy but suffer from limited transparency and generalization issues. Consequently, hybrid modeling approaches have recently emerged as a promising solution. Given the rapid growth of this field, a comprehensive and systematic review is required to identify research trends, methodological developments, and existing knowledge gaps.

Materials and Methods

A hybrid systematic review methodology was adopted, incorporating bibliometric analysis and content analysis.

Bibliometric Analysis: Research articles from Scopus (1984–2024) were analyzed to determine publication trends, citation impact, leading journals, geographic distribution of authors, and keyword co-occurrence networks.

Content Analysis: Studies were categorized based on modeling approaches, emphasizing white-box models, black-box models, and hybrid approaches. The effectiveness of ML techniques, including Artificial Neural Networks (ANNs), Support Vector Machines (SVMs), Decision Trees (DT), and Deep Learning models (LSTM, CNN), was evaluated. To provide a clear overview of the adopted methodology, a flow diagram (Fig. 1) has been included. The diagram illustrates the two main components of the study: (i) bibliometric analysis, which covers data collection from Scopus, trend identification, and keyword co-occurrence analysis; and (ii) content analysis, which categorizes modeling approaches into white-box, black-box, and hybrid models. This visual representation helps readers to easily follow the logical sequence of the study.

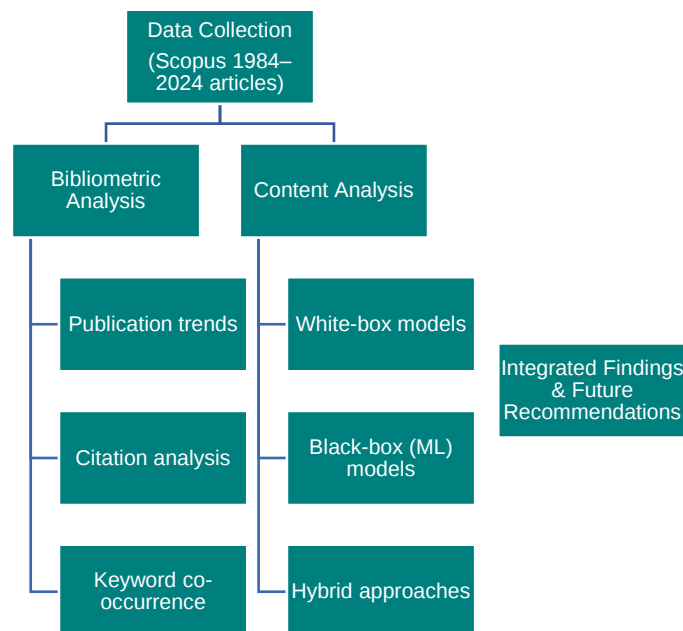


Fig. 1. The diagram for the methodological process.

Results

The bibliometric analysis reveals a strong and continuous growth in research on environmental parameter modeling for PV systems, with an average annual publication growth rate of 9.13%. Major contributions originate from China, India, Italy, the United States, and Iran, reflecting both technological advancement and high solar energy potential in these regions. Keyword co-occurrence analysis identifies three dominant research clusters: (i) the impact of environmental parameters such as temperature, dust, and humidity on PV performance; (ii) modeling techniques, including numerical, machine learning, and hybrid approaches; and (iii) technological advancements related to PV optimization, such as maximum power point tracking and intelligent control strategies.

The content analysis shows that white-box models remain valuable for physical interpretation but struggle with nonlinear environmental dynamics. Black-box machine learning models demonstrate superior predictive accuracy, particularly when handling complex interactions among environmental parameters. Hybrid models consistently outperform individual approaches by combining physical understanding with data-driven learning, highlighting their growing importance in recent studies.

Discussion and Conclusion

The results of this review confirm and extend findings reported in earlier studies, which highlighted the limitations of physics-based models in accurately representing nonlinear and dynamic environmental conditions affecting PV systems. While white-box models are essential for theoretical insight and parameter estimation, their applicability is often restricted under real-world operating conditions. In contrast, machine learning-based models, including artificial neural networks and deep learning architectures, have demonstrated superior predictive capabilities in capturing complex environmental effects such as dust accumulation, temperature fluctuations, and irradiance variability. A key contribution of this study is the identification of a clear and accelerating shift toward hybrid modeling approaches. By integrating physical principles with data-driven learning, hybrid models achieve improved accuracy, robustness, and partial interpretability, addressing the shortcomings of standalone methods. The bibliometric trends further indicate that research in this domain is expanding globally and becoming increasingly interdisciplinary. Despite these advances, challenges related to data quality, model transparency, and cross-climatic generalization remain unresolved. Future research should focus on hybrid ML–physics frameworks, real-time data acquisition through IoT technologies, transfer learning for multi-region applicability, and explainable artificial intelligence techniques. Overall, this review provides a structured roadmap for advancing PV performance modeling under diverse environmental conditions.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

مطالعه مروری مدل‌سازی پارامترهای محیطی مؤثر بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی

مهدی گندم‌زاده^۱ | اصلا ن غلامی^۲ | مجید زندی^{۳*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. رایانامه: m_gandomzadeh@sbu.ac.ir
۲. استادیار، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. رایانامه: a_gholami@sbu.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. رایانامه: m_zandi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۵

کلیدواژه:

مدل‌سازی پارامترهای محیطی،
سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی،
یادگیری ماشین،
تحلیل مرجع‌شناسی،
تحلیل محتوایی.

هدف اصلی مطالعه پیش رو، مرور نظام‌مند پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه مدل‌سازی پارامترهای محیطی مؤثر بر سامانه‌های فتوولتاییک و بررسی روندهای نوین روش‌شناسی در این حوزه است. عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک به شدت تحت تأثیر عواملی مانند تابش خورشید، دما، گردوغبار، سرعت باد، رطوبت، بارش و فشار هوا قرار دارد. مدل‌سازی دقیق این عوامل برای افزایش بهره‌وری و قابلیت اطمینان سامانه‌های فتوولتاییک ضروری است. در این راستا، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از تحلیل مرجع‌شناسی و تحلیل محتوایی، مقالات نمایه‌شده در پایگاه Scopus طی سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۴ را بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد این حوزه با نرخ رشد سالانه ۹/۱۳ درصد توسعه یافته و کشورهای چین، هند، ایتالیا، آمریکا و ایران سهم عمده‌ای در تولیدات علمی داشته‌اند. رویکردهای مدل‌سازی در سه دسته جعبه‌سفید، جعبه‌سیاه و ترکیبی طبقه‌بندی شدند. یافته‌ها نشان می‌دهد در حالی که مدل‌های جعبه‌سفید تفسیرپذیری بالایی دارند، مدل‌های جعبه‌سیاه مبتنی بر یادگیری ماشین دقت پیش‌بینی بیشتری دارند. مدل‌های ترکیبی که تلفیقی از هر دو رویکرد هستند، دقیق‌ترین نتایج را ارائه می‌دهند. این مطالعه ضمن تأکید بر نقش روبه‌رشد یادگیری ماشین در بهبود عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک، مسیرهای پژوهشی آینده شامل توسعه مدل‌های ترکیبی، استفاده از داده‌های لحظه‌ای مبتنی بر اینترنت اشیا و بهره‌گیری از هوش مصنوعی تفسیرپذیر را پیشنهاد می‌کند.

استناد: گندم‌زاده، مهدی؛ غلامی، اصلا ن و زندی، مجید (۱۴۰۴). مطالعه مروری مدل‌سازی پارامترهای محیطی مؤثر بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۵ (۱) ۱۶۵-۱۸۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394623.1144>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© مهدی گندم‌زاده، اصلا ن غلامی، مجید زندی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394623.1144>



۱. مقدمه

انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع مهم انرژی های تجدیدپذیر، نقش کلیدی در کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای دارد و سامانه های فتوولتاییک خورشیدی^۱ یکی از فناوری های پرکاربرد آن محسوب می شوند [۱]. با رشد روزافزون تقاضا برای انرژی پاک، بهره گیری از فناوری های فتوولتاییک با سرعت چشمگیری در حال گسترش است [۲ و ۳]. این سامانه ها به دلیل مزایایی همچون هزینه های عملیاتی و نگهداری پایین و قابلیت مقیاس پذیری، پتانسیل بالایی برای جایگزینی با منابع انرژی سنتی دارند [۴ و ۵]. در کنار این توسعه، مطالعات اخیر نشان داده اند ترکیب فتوولتاییک با حوزه های کاربردی جدید، فرصت های نوآوری گسترده ای ایجاد کرده است. برای نمونه، از تلفیق سامانه های فتوولتاییک با کشاورزی شهری در گلخانه های هوشمند [۶]، بهره گیری از سیستم های هیبریدی حرارتی - نمک زدایی [۷]، توسعه سامانه های خورشیدی شناور [۸ و ۹] تا به کارگیری در نانوتکنولوژی [۱۰] و نانومواد در ساختمان های صفر انرژی [۱۱]، همگی بیانگر تنوع و اهمیت روبه رشد فناوری های فتوولتاییک خورشیدی هستند.

با این حال، چالش های متعددی در بهره برداری از این سامانه ها وجود دارد. عملکرد ماژول های فتوولتاییک به شدت تحت تأثیر پارامترهای محیطی مانند تابش خورشید، دما، گردوغبار، سرعت باد و شرایط اقلیمی است که می تواند باعث کاهش قابل توجه بازدهی شود [۱۲ - ۱۴]. مطالعات متعددی به بررسی این چالش ها از جمله آثار سایه اندازی و استراتژی های کاهش دهنده آن [۱۵]، مقایسه روش های دقیق پیش بینی عملکرد سامانه های شناور و زمینی [۹] و استفاده از مدل های یادگیری ماشین برای بهبود پیش بینی عملکرد سامانه فتوولتاییک خورشیدی تحت شرایط متغیر محیطی [۲۱ - ۲۴] پرداخته اند. علاوه بر این، پژوهش ها در حوزه یکپارچه سازی انرژی های تجدیدپذیر با شبکه های قدرت نیز اهمیت یافته اند، به طوری که مطالعاتی به زمان بندی شارژ خودروهای برقی در شرایط عدم قطعیت منابع خورشیدی، زمان بندی بهره برداری از شبکه های هوشمند با پارکینگ خودروهای برقی و مدیریت ریسک در بهره برداری از ذخیره سازها در شبکه های غنی از سامانه فتوولتاییک خورشیدی [۲۰] پرداخته اند. این روندهای پژوهشی نشان می دهد توسعه فناوری های سامانه فتوولتاییک خورشیدی تنها به بهبود کارایی ماژول ها محدود نبوده، بلکه دامنه ای از موضوعات مرتبط با پایداری سیستم های انرژی، کشاورزی پایدار [۳]، طراحی میکروگریدهای تجدیدپذیر [۲۱] و مدیریت منابع چندبخشی را نیز در بر گرفته است.

بنابراین، شناسایی و مدل سازی دقیق پارامترهای محیطی که بهره وری سامانه های فتوولتاییک را تغییر می دهند ضرورتی اجتناب ناپذیر است [۲۱ و ۲۲]. مرور نظام مند پژوهش های این حوزه می تواند تصویری جامع از روش ها، روندها و شکاف های موجود ارائه کند و مسیرهای نوآورانه ای برای پژوهش های آینده ترسیم کند.

عوامل مؤثر بر عملکرد سامانه های فتوولتاییک خورشیدی در سه دسته کلی عوامل محیطی، عوامل طراحی و عوامل بهره برداری قابل طبقه بندی است [۲۳]. عوامل محیطی شامل پارامترهایی مانند تابش، دما، گردوغبار، سرعت باد، رطوبت، بارش و فشار است که به طور مستقیم بر عملکرد و بازده سامانه های SPV تأثیر می گذارند [۱۶]. عوامل طراحی شامل نوع پنل های فتوولتاییک، زاویه نصب، مواد سازنده و چیدمان پنل ها است که تأثیر زیادی بر بازده و طول عمر سامانه دارد [۲۴]. در نهایت، عوامل بهره برداری نظیر روش های نگهداری، تمیزکاری سطح ماژول ها، سامانه های خنک سازی و نظارت بر عملکرد سامانه نیز در این دسته قرار می گیرند که انتخاب راه کارهای بهینه در این بخش می تواند عملکرد سامانه را به طور قابل توجهی بهبود بخشد [۱۶].

از میان این سه دسته، عوامل محیطی به دلیل ماهیت غیر قابل کنترل و تأثیر مستقیم بر عملکرد سامانه های فتوولتاییک خورشیدی، نیازمند بررسی دقیق تری هستند [۲۵]. دو پارامتر اصلی تأثیرگذار محیطی عبارتند از: تابش خورشید و دما که بیشترین تأثیر را در میزان تولید توان خروجی دارند. افزایش تابش خورشید به طور معمول موجب افزایش تولید انرژی خروجی می شود، اما تغییر فصلی و اقلیمی می توانند باعث ایجاد نوسان در میزان انرژی تولیدی شوند [۲۶]. از سوی دیگر، افزایش دما در بیشتر موارد به کاهش بهره وری پنل های فتوولتاییک خورشیدی منجر می شود. سامانه های SPV تحت شرایط دمایی بالا دچار افت ولتاژ خروجی می شوند و بازده آن ها کاهش می یابد [۲۷]. گردوغبار با کاهش میزان جذب نور خورشید و در نتیجه، افت تولید

انرژی خروجی همراه است. سرعت باد نقش مهمی در خنک‌سازی مازول‌ها ایفا و موجب بهبود عملکرد آن‌ها در دماهای بالا می‌شود. رطوبت زیاد نیز می‌تواند به خوردگی تجهیزات و کاهش طول عمر سامانه منجر شود، در حالی که تغییر فشار هوا بر میزان جذب نور خورشید تأثیرگذار است [۲۸].

به دلیل اهمیت مدل‌سازی دقیق این پارامترها برای بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی، روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی تأثیر آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، دو رویکرد اصلی برای مدل‌سازی این پدیده‌ها مورد توجه قرار گرفته است: مدل‌های مبتنی بر روابط فیزیکی (جعبه‌سفید) و مدل‌های داده‌محور (جعبه‌سیاه). مدل‌های جعبه‌سفید اگرچه تفسیرپذیری بالایی دارند، اما در بازنمایی رفتارهای غیرخطی و شرایط پیچیده محیطی محدودیت‌های قابل توجهی نشان می‌دهند. در مقابل، مدل‌های جعبه‌سیاه به‌ویژه الگوریتم‌های یادگیری ماشین، توان بالایی در پیش‌بینی رفتار سامانه‌ها دارند، ولی چالش‌هایی مانند نیاز به داده‌های گسترده و ضعف در تفسیرپذیری همچنان پابرجاست. این تضاد به شکل‌گیری رویکردهای ترکیبی منجر شده است که تلاش می‌کنند مزایای هر دو دسته را به طور هم‌زمان در اختیار قرار دهند [۲۹]. این محدودیت‌ها به توسعه روش‌های ترکیبی منجر شده است که قوت‌ها هر دو روش را ادغام و استفاده می‌کنند. جدول ۱ به مقایسه پژوهش‌های کلیدی در زمینه مدل‌سازی پارامترهای محیطی سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی با مطالعه حاضر پرداخته است.

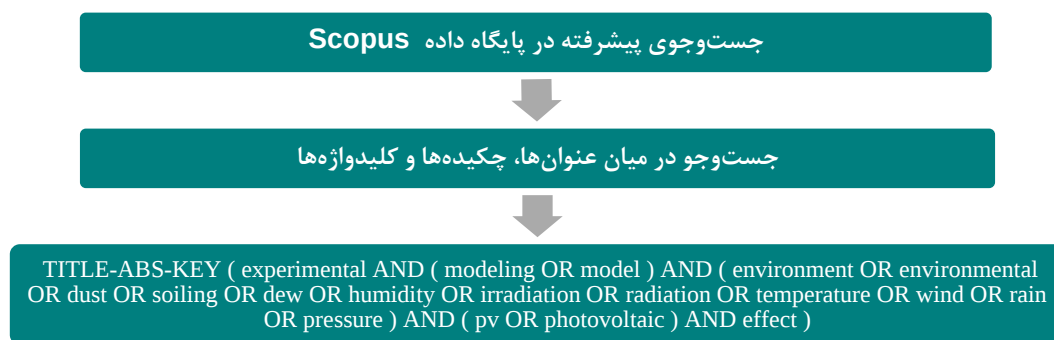
جدول ۱. مقایسه پژوهش‌های کلیدی در زمینه مدل‌سازی پارامترهای محیطی سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی با مطالعه حاضر				
مرجع	نوع مدل‌سازی	پارامترهای محیطی بررسی‌شده	مهم‌ترین یافته‌ها	محدودیت‌ها
(۳۰)	جعبه‌سفید (فیزیکی)	دما، تابش	ارائه روش‌های برآورد پارامتر سلول‌های فتوولتاییک	عدم انطباق‌پذیری با شرایط پویا
(۳۱)	جعبه‌سفید، جعبه‌سیاه، ترکیبی	دما، تابش، باد	مقایسه مدل‌های فیزیکی، یادگیری ماشین و ترکیبی؛ برتری مدل‌های ترکیبی	نیاز به محاسبات سنگین
(۳۲)	جعبه‌سیاه (یادگیری ماشین)	گردوغبار، رطوبت، تابش	دقت بالای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی عمل‌کرد فتوولتاییک	وابستگی زیاد به داده‌ها
(۳۳)	جعبه‌سفید (الکتریکی، حرارتی، اپتیکی)	تابش، دما، گردوغبار	تحلیل مقایسه‌ای مرحله‌به‌مرحله از روش‌های مدل‌سازی	دشواری کاربرد در زمان واقعی
(۳۴)	یادگیری نظارت‌شده	گردوغبار	پیش‌بینی افت بازده ناشی از گردوغبار با استفاده از یادگیری ماشین	محدود به اثر گردوغبار
مطالعه حاضر	مرور (مرجع‌شناسی + تحلیل محتوا)	چندپارامتری (تابش، دما، گردوغبار، باد، رطوبت، بارش و فشار)	مرور نظام‌مند ۴۰ سال پژوهش؛ تأکید بر اهمیت مدل‌های یادگیری ماشین و ترکیبی	مقاله مروری

با توجه به رشد سریع ادبیات پژوهشی و ظهور روش‌های نوین مدل‌سازی، نیاز به یک مرور نظام‌مند برای دسته‌بندی رویکردهای موجود، تحلیل روندهای پژوهشی و شناسایی شکاف‌های دانشی به‌خوبی احساس می‌شود. از این‌رو، مطالعه حاضر با بهره‌گیری از تحلیل مرجع‌شناسی و تحلیل محتوایی، به بررسی نظام‌مند پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه مدل‌سازی پارامترهای محیطی مؤثر بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی می‌پردازد. این مطالعه علاوه بر شناسایی روندهای علمی جهانی، به مقایسه رویکردهای مختلف مدل‌سازی و ارائه چشم‌اندازهای آینده با تمرکز ویژه بر روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و مدل‌های ترکیبی می‌پردازد. نتایج این پژوهش می‌تواند به پژوهشگران و صنعتگران در توسعه راهکارهای نوین برای افزایش بهره‌وری و قابلیت اطمینان سامانه‌های فتوولتاییک در شرایط محیطی متنوع کمک کند.

۲. روش‌شناسی

در این پژوهش، از روش ترکیبی جامع مرجع‌شناسی و تحلیل محتوا برای انتخاب، طبقه‌بندی و مرور ادبیات مرتبط با موضوع پژوهش استفاده شده است. ابتدا مطالعه مرجع‌شناسی براساس داده‌های اولیه و سندهای مرتبط از پایگاه داده Scopus انجام شده

است. به این منظور واژه های مربوطه، مطابق شکل ۱ برای جست و جو تهیه شده اند. نتیجه مشخصه های کلی به دست آمده برای جست و جو در بازه ۳۰ ساله در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱. نحوه استخراج و کلیدواژه های جست و جو شده در پایگاه داده Scopus

جدول ۲. مشخصه های کلی به دست آمده با کلیدواژه های موضوع از پایگاه داده Scopus

عنوان	نتیجه
بازه زمانی	۱۹۸۴-۲۰۲۴ میلادی
منبع ها	۵۸۴
سند ها	۱۵۰۲
نرخ رشد سالانه	۹/۱۳ درصد
نویسنده ها	۴۸۸۸ نفر
سند های تک نویسنده	۴۲
همکاری های بین المللی	۲۶/۹۶ درصد
تعداد همکاران به ازای هر سند	۴/۲۴
میانگین عمر اسناد	۷/۲۱ سال
میانگین ارجاع ها به هر سند	۲۸/۵۴

با توجه به جدول ۱، ۱۵۰۲ سند شامل مقاله های پژوهشی، مروری، کنفرانس و کتاب در حوزه این پژوهش یافته شده اند که به طور متوسط هر سال ۹/۱۳ درصد افزایش یافته است. ۲۶/۹۶ درصد از اسناد، توسط نویسندگانی از کشورهای مختلف تولید شده اند. به طور متوسط، سند های این حوزه بیش از ۷ سال پس از انتشار هنوز مورد ارجاع قرار می گیرند. سند های این حوزه به طور متوسط ۲۸/۵۴ بار توسط سایر پژوهشگران مورد استناد قرار گرفته اند که نشان دهنده اهمیت و تأثیرگذاری این حوزه پژوهشی است.

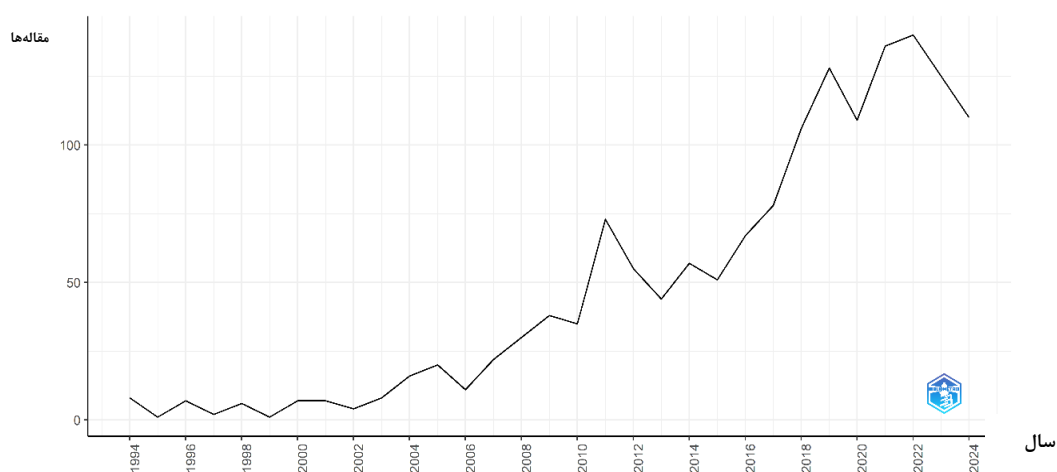
پس از استخراج کلیدواژه ها و روندهای پژوهشی از مرحله تحلیل مرجع شناسی، به منظور تحلیل محتوایی، مقاله های مرتبط با موضوع مدل سازی پارامترهای محیطی انتخاب و تحلیل شدند. هدف از این مرحله، شناسایی مدل سازی های مختلف انجام شده با هر روش برای پارامترهای محیطی مختلف است.

در این تحلیل، کاربردهای انواع روش های مدل سازی مورد بررسی قرار گرفته اند که شامل مدل های جعبه سفید (تحلیلی و عددی)، جعبه سیاه (یادگیری ماشین) و مدل های ترکیبی است [۳۵]. همچنین، تمرکز ویژه ای بر مدل های جعبه سیاه مبتنی بر یادگیری ماشین شده است، زیرا این روش ها توانایی بالایی در کشف روابط بین پارامترهای محیطی و عملکرد سامانه های فتوولتاییک خورشیدی دارند. در این راستا، مدل های شبکه های عصبی مصنوعی^۱، ماشین بردار پشتیبان^۲، درخت تصمیم^۳ و جنگل تصادفی^۴ و مدل های یادگیری عمیق^۵ بررسی شده اند.

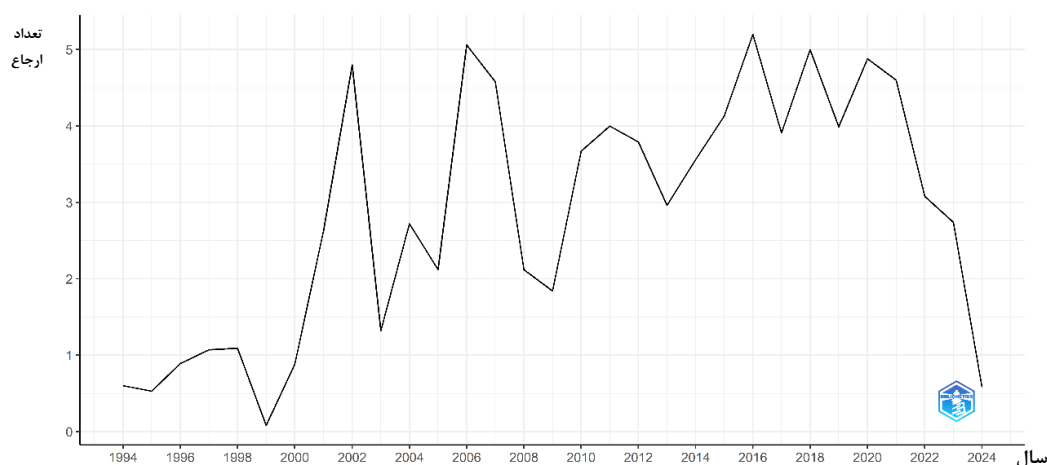
1. Artificial Neural Networks (ANNs)
2. Support Vector Machines (SVMs)
3. Decision Tree (DT)
4. Random Forests (RF)
5. Deep Learning

۳. تحلیل مرجع‌شناسی

تحلیل مرجع‌شناسی این پژوهش ابتدا شامل بررسی تعداد سندهای منتشرشده در بازه زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۴ میلادی و میانگین ارجاع به هر سند در هر سال در این دوره است که نشان‌دهنده روند رشد و تأثیرگذاری علمی این حوزه است. علاوه بر این، پایگاه‌های علمی منتشرکننده اسناد مرتبط با موضوع پژوهش شناسایی شده‌اند تا منابع معتبر و پرارجاع در این زمینه مشخص شوند. همچنین، توزیع جغرافیایی مقاله‌ها براساس کشورهای نویسندگان مسئول بررسی شده است تا نقش کشورها و مراکز علمی فعال در این حوزه تحلیل شود. در ادامه، نویسندگانی با بیشترین مشارکت در تولید اسناد علمی و میزان ارجاع دریافت‌شده در دوره ۳۰ ساله شناسایی شده‌اند. به منظور استخراج محورهای کلیدی پژوهش، دسته‌های موضوعی ایجادشده از طریق هم‌آبی واژگان^۱ در مقاله‌ها بررسی شده و روندهای پژوهشی غالب شناسایی شده است. در نهایت، موضوع‌های برجسته در زمینه بررسی‌های تجربی و مدل‌سازی پارامترهای محیطی تأثیرگذار بر عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک خورشیدی تحلیل شده است تا مهم‌ترین چالش‌ها و فرصت‌های پژوهشی در این حوزه مشخص شوند. به این ترتیب، روند تعداد سندهای منتشرشده و تعداد ارجاع به آن‌ها به ترتیب شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

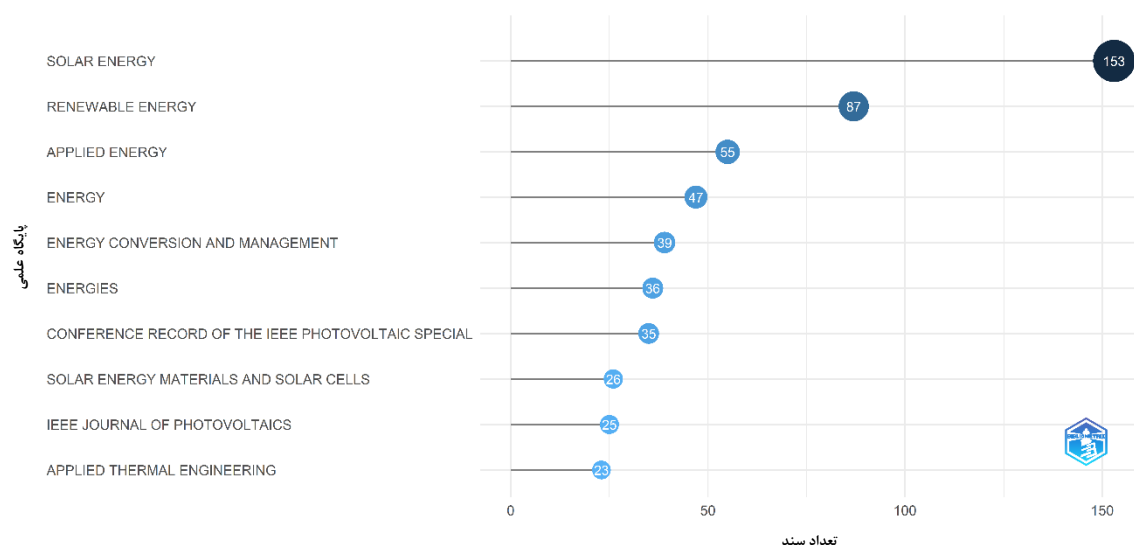


شکل ۲. تعداد سندهای منتشرشده طی سال‌های ۱۹۸۴ - ۲۰۲۴ میلادی



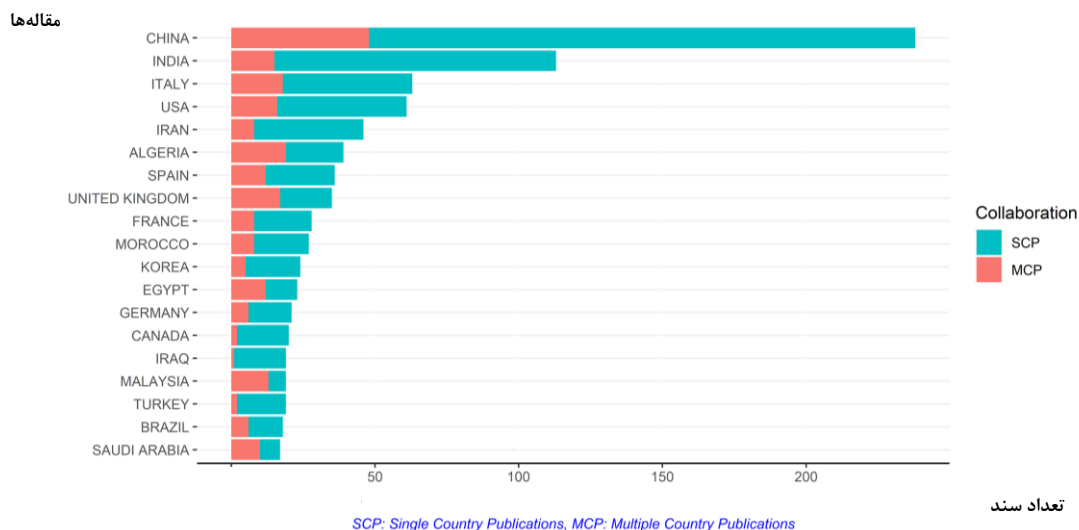
شکل ۳. میانگین ارجاع به هر سند در هر سال طی سال‌های ۱۹۸۴ - ۲۰۲۴ میلادی

سندهای این حوزه بیشتر در نشریه های بین المللی Solar Energy, Renewable Energy و Applied Energy منتشر شده اند.



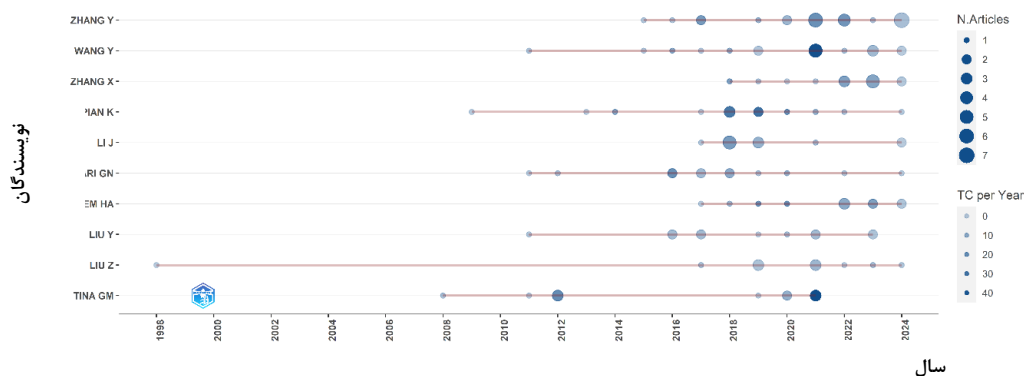
شکل ۴. پایگاه های علمی منتشر کننده سندهای مربوط به موضوع پژوهش

همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نویسنده های مسئول این سندها بیشتر از کشور چین بوده اند. پس از چین، هند، ایتالیا، ایالات متحده آمریکا و ایران در جایگاه های بعدی هستند. قسمت های آبی رنگ مشخص کننده همکاری های داخلی و قسمت های نارنجی رنگ مشخص کننده همکاری بین المللی در تهیه سندهای علمی هستند.



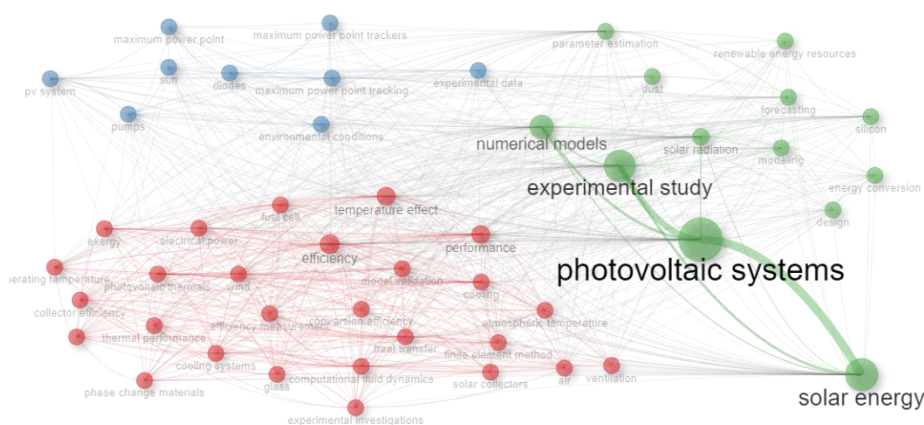
شکل ۵. توزیع سندها براساس کشورهای نویسندگان مسئول در موضوع پژوهش

همچنین در موضوع پژوهش، نویسندگان مطرح نیز شناسایی شدند که مطابق شکل ۶ تعداد مقاله و تعداد ارجاع در سال های مختلف برای آنها نشان داده شده است.



شکل ۶. نویسندگان با بیشترین مشارکت در تعداد سند و تعداد ارجاع طی دوره ۳۰ ساله

دو نتیجه دیگر تحلیل مرجع‌شناسی در شکل‌های ۷ و ۸ آمده است. شکل ۷ نشان‌دهنده یک تحلیل هم‌آبی واژگان است. در این تحلیل، واژگانی که در پژوهش‌های مختلف به طور مکرر با هم ظاهر می‌شوند، در قالب شبکه‌ای از ارتباطات به نمایش گذاشته شده‌اند. براساس دسته‌بندی‌های رنگی که در این تصویر مشاهده می‌شود، این واژگان به سه خوشه اصلی تقسیم شده‌اند.



شکل ۷. دسته‌های ایجادشده به وسیله هم‌آبی واژگان در موضوع پژوهش

دسته قرمز (عملکرد سامانه فتوولتایک خورشیدی و تأثیر پارامترهای محیطی)

دسته قرمز به بررسی عملکرد سامانه‌های فتوولتایک خورشیدی تحت تأثیر پارامترهای محیطی اشاره دارد. مفاهیمی مانند تأثیر دما^۱، بازدهی^۲، اثر باد^۳ و تأثیر گردوغبار^۴ در این دسته جای می‌گیرند. مطالعه‌ها در این حوزه به بررسی نحوه تغییر عملکرد سامانه‌های خورشیدی در شرایط محیطی مختلف مانند تابش متفاوت، افزایش دما، حضور گردوغبار و رطوبت می‌پردازد.

دسته سبز (مدل‌سازی پارامترهای محیطی بر عملکرد سامانه خورشیدی فتوولتایک)

دسته سبز بر مدل‌سازی تأثیر پارامترهای محیطی بر عملکرد سامانه‌های فتوولتایک خورشیدی تمرکز دارد. واژگانی مانند مدل‌های عددی^۵، تخمین^۶ و پارامترهای محیطی^۷ در این خوشه دیده می‌شوند. مدل‌سازی‌ها به پژوهشگران کمک می‌کنند تا

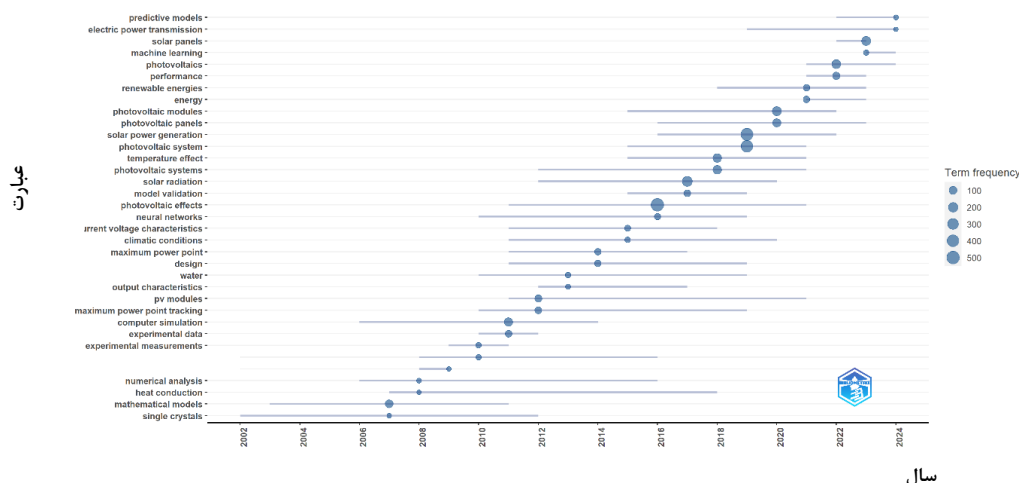
1. Temperature Effect
2. Efficiency
3. Wind
4. Dust Effect
5. Numerical Models
6. Estimation
7. Environmental Parameters

رفتار سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی را در شرایط محیطی مختلف بررسی شود. با توجه به اینکه پارامترهای محیطی به طور هم‌زمان تأثیرگذار هستند، مدل‌سازی جامع و هم‌زمان از همه این متغیرها به منظور ارائه پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی مهم است.

دسته آبی (دست‌آورد مدل‌سازی‌های پارامترهای محیطی و تأثیر بر پیشرفت در سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی)

دسته آبی به نتایج عملی و بهبودهای فنی حاصل از مدل‌سازی پارامترهای محیطی و بررسی عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی اشاره دارد. این دسته بیانگر بهینه‌سازی‌ها و پیشرفت‌های فناورانه است که از تحلیل و مدل‌سازی دقیق تأثیر پارامترهای محیطی بر سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی به دست آمده‌اند. تمرکز بر واژه‌ای مانند ردیابی نقطه توان ماکزیمم^۱ این موضوع را نشان می‌دهد.

نمودار شکل ۸ روند موضوع‌های برجسته را در سال‌های مختلف در حوزه پژوهش‌های مرتبط با مدل‌سازی پارامترهای محیطی و بررسی تجربی سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی نشان می‌دهد.



شکل ۸. موضوع‌های برجسته و مورد توجه پیرامون بررسی تجربی و مدل‌سازی پارامترهای محیطی مؤثر بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی

شکل ۸ نشان می‌دهد در سه دهه اخیر (۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴)، موضوع‌های مرتبط با یادگیری ماشین^۲، مدل‌های پیش‌بینی^۳ و عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی^۴ به عنوان موضوع‌های برجسته در پژوهش‌ها مطرح شده‌اند. عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی به عنوان یکی از موضوع‌های مهم پژوهشی با هدف بهبود بازدهی و عملکرد این سامانه‌ها در شرایط مختلف محیطی همچنان ادامه دارد. همچنین، از حدود سال ۲۰۱۷ میلادی به بعد، پژوهش‌ها به مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده و یادگیری ماشین توجه بیشتری داشته‌اند. این مدل‌ها به طور گسترده برای پیش‌بینی عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی تحت شرایط محیطی متغیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۴. تحلیل محتوایی

۴-۱. مدل‌سازی پارامترهای محیطی

دو رویکرد برای مدل‌سازی رفتار سامانه به کمک متغیرهای اثرگذار درون سامانه و در محیط وجود دارد. این دو رویکرد در اصطلاح جعبه‌سفید و جعبه‌سیاه نامیده می‌شود. در مدل‌سازی جعبه‌سفید، توصیف یک پدیده براساس شناخت فیزیک مسئله

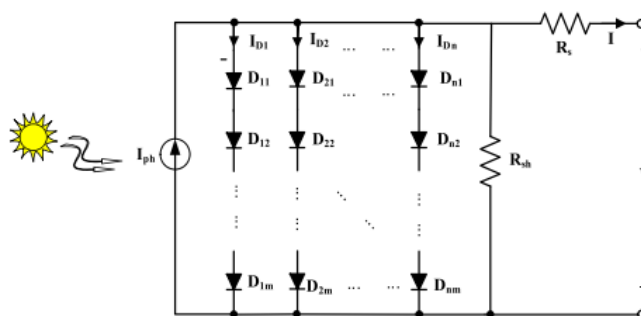
1. Maximum Power Point Tracker
2. Machine Learning
3. Predictive Models
4. Photovoltaic Performance

امکان دارد. بنابراین، تمرکز اصلی بر یافتن ارتباط منطقی بین ورودی و خروجی است. پیچیدگی معادله‌های حاکم بر فیزیک یک مسئله، مدل‌سازی به کمک مدل‌های جعبه‌سفید را دشوار می‌کند. در مدل‌سازی جعبه‌سیاه، توصیف ارتباط بین ورودی و خروجی براساس داده‌های ثبت‌شده بدون آگاهی دقیق از چگونگی روند محاسباتی درون مدل است. در صورت دسترسی به حجم بزرگی از داده مرتبط با مسئله، مدل‌سازی جعبه‌سیاه توانایی خوبی در توصیف پدیده‌ها دارد. بر این اساس، مدل‌های یادگیری ماشین در دسته مدل‌سازی جعبه‌سیاه قرار می‌گیرند.

توسعه مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر یادگیری ماشین می‌تواند به شناسایی الگوهای مناسب میان عوامل محیطی و عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی منجر شود. این امر اجازه می‌دهد تا راه‌حل مطلوبی برای کاهش اثر منفی عوامل محیطی و افزایش کارایی سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی ارائه شود. در ادامه، به پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه مدل‌سازی اثر پارامترهای محیطی بر سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی به کمک مدل‌های جعبه‌سیاه و جعبه‌سفید اشاره می‌شود.

۴-۱-۱. روش‌های جعبه‌سفید: مدل‌سازی الکتریکی، حرارتی و اپتیکی

مدل‌سازی فیزیک حاکم بر سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی در سه حوزه مدل‌سازی الکتریکی، حرارتی و اپتیکی است [۳۶]. استخراج پارامترها در هر یک از روش‌های بیان‌شده نیاز به حل معادله‌های حاکم بر سامانه دارد. به دست آوردن این پارامترها به کمک حل تعدادی معادله ریاضی به دست‌آمده از فیزیک مسئله امکان‌پذیر است. مدل مداری چند دیودی سلول فتوولتاییک در شکل ۹ نشان داده شده است.



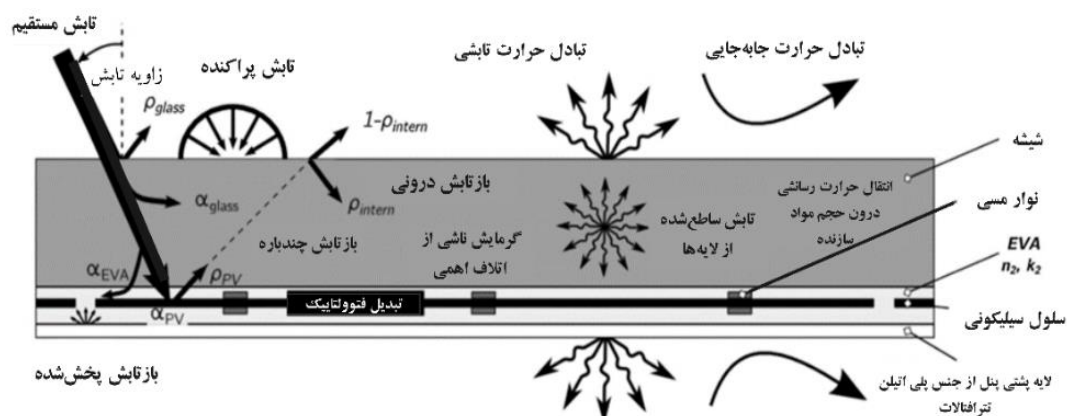
شکل ۹. مدل مداری دیودی برای مدل‌سازی الکتریکی سلول‌های خورشیدی فتوولتاییک [۳۷]

براساس شکل ۸، از مدل‌های مدار معادل برای شبیه‌سازی رفتار الکتریکی سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی استفاده می‌شود. یک سلول فتوولتاییک مانند یک نیمه‌رسانای p-n حساس به تابش خورشید رفتار می‌کند. بنابراین، یک سلول فتوولتاییک خورشیدی به کمک تعدادی دیود و مقاومت در مدار معادل توصیف می‌شود. این مدل‌ها از دیدگاه تعداد پارامترهای مجهول یا تعداد دیودها دسته‌بندی می‌شوند [۳۸].

به طور کلی، یک مدل مداری دیودی برای سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی می‌تواند چند متغیر مجهول در مدل‌سازی داشته باشد: جریان منبع تابش (I_{ph}) برای مدل‌سازی تابش خورشید، دیودهای موازی با جریان منبع تابش با ضریب ایده‌آلی (α) (مشخص برای شبیه‌سازی پدیده قطبیت و جریان اشباع معکوس، مقاومت‌های سری (R_s) برای اتلاف اهمی و مقاومت‌های موازی (R_{sh}) برای اتلاف ناشی از نشت جریان [۳۹] از جمله متغیرهای مجهول است. بسته به نوع فناوری و میزان دقت مد نظر، محاسبات ریاضی و تعداد پارامترهای مجهول بیشتر می‌شود.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، دمای سلول نقش اساسی در عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی دارد. بنابراین، تلاش‌های بسیاری برای مدل‌سازی حرارتی و بررسی توزیع دمای پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی انجام شده است. برای نمونه، یک مدل‌سازی یک‌بعدی برای تجزیه و تحلیل توزیع دما در یک پنل فتوولتاییک خورشیدی انجام شده است [۴۰]. با این وجود، محاسبه مدل حرارتی برای سرعت‌های باد کمتر از ۱ متر بر ثانیه بیانگر اثر بیشتر انتقال حرارت هم‌رفتی آزاد نسبت به انتقال حرارت هم‌رفت اجباری است. در پژوهشی دیگر، یک مدل‌سازی دینامیکی برای توزیع دمای یک سلول فتوولتاییک خورشیدی با

در نظر گرفتن تعادل انرژی وابسته به زمان و دفع حرارت همرفتی مختلط (آزاد و اجباری) انجام شده است. همچنین، خروجی الکتریکی پنل، با استفاده از یک مدل مدار معادل پنج پارامتری و به صورت جفت شده با معادله های حرارتی مدل سازی شد. نتایج این مدل با داده های تجربی برای یک روز زمستان و یک روز تابستان اعتبارسنجی شده است. با توجه به دمای سلول و میزان تابش، حذف حرارت اضافی از پنل ها می تواند به بهبود عملکرد از ۳۰ تا ۴۰ درصد منجر شود [۴۱].



شکل ۱۰. سازوکار تبادل انرژی در یک پنل فتوولتاییک خورشیدی [۴۲]

در شکل ۱۰، انواع شکل های تبادل انرژی در یک سامانه فتوولتاییک خورشیدی نشان داده شده است [۴۲]. این سامانه ها از پدیده های گوناگونی تأثیر می گیرند. برای شبیه سازی حرارتی پنل های فتوولتاییک خورشیدی، باید عامل های زیادی مورد توجه قرار گیرد. یک پنل از چندین لایه با خاصیت های مختلف ساخته شده است. برای مدل سازی دقیق انتقال حرارت در چنین ساختاری، در نظرگیری خواص مواد اهمیت دارد. همچنین، جنبه های دیگری مانند بعد مدل سازی (یک بعدی، دوبعدی یا سه بعدی)، وابستگی پارامترهای مدل به زمان (مسئله های حالت پایدار یا گذرا)، روش حل یا ترکیب روابط حاکم باید توجه شود. برای مدل سازی ایتیکی یک سامانه فتوولتاییک خورشیدی، اثرهای سه گانه نور یعنی جذب، بازتابش و عبور باید شبیه سازی شوند [۴۳]. ردیابی تابش^۱، روش مرسوم برای مدل سازی ایتیکی سامانه های فتوولتاییک خورشیدی است. فرض اساسی این روش مدل سازی، بزرگ بودن نسبی طول و عرض در مقایسه با ضخامت پنل های فتوولتاییک است. این روش تمام بازتابش های ممکن از سطح را در نظر می گیرد.

با مروری بر این روش ها نتیجه گرفته می شود که برای مدل سازی دقیق خروجی الکتریکی سامانه های فتوولتاییک خورشیدی، مدل سازی دقیق مقدار تابش دریافت شده و توزیع دما در سطح پنل بسیار مهم است. همچنین، برای داشتن مدل های دقیق ایتیکی و حرارتی، تعریف دقیق سازوکار انتقال حرارت و شرایط مرزی آن ها اهمیت بسیار دارد. بنابراین، با تغییر شرایط محیطی و طراحی سامانه، معادله های حاکم بر مسئله تغییر زیادی خواهند کرد.

۴-۱-۲. روش های جعبه سیاه: مدل های یادگیری ماشین

در روش جعبه سیاه، بدون اطلاع دقیق از چگونگی روند محاسباتها در یک الگوریتم، مدل سازی از راه الگوییابی بین داده های متغیرهای ورودی و داده های متغیرهای هدف انجام می شود. اگر مدل سازی یک سامانه به کمک توصیف فیزیکی از طریق معادله های حاکم بسیار دشوار باشد، ولی داده لازم به اندازه کافی در دسترس باشد، این مدل ها توانایی خوبی در یافتن الگوی رفتاری متغیرهای هدف دارند. الگوریتم های یادگیری ماشین در چنین دسته ای قرار می گیرند.

یادگیری ماشین شاخه ای از علوم رایانه است که هدف آن، توسعه الگوریتم هایی برای پیش بینی و توصیف پدیده ها براساس شبیه سازی فرایند یادگیری انسانی است [۴۴]. به فرایند یادگیری از روی داده، آموزش^۲ نیز گفته می شود. عملکرد این مدل ها

وابستگی زیادی به نوع داده ورودی و رویکرد مدل‌سازی دارد. براساس رویکردهای مدل‌سازی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین در سه دسته کلی یادگیری با نظارت، یادگیری بدون نظارت و یادگیری تقویتی قرار می‌گیرند. در الگوریتم‌های یادگیری با نظارت، یک متغیر مشخص (متغیر هدف^۱) برای پیش‌بینی براساس سایر متغیرها (ویژگی‌ها^۲) وجود دارد. این الگوریتم‌ها در دو دسته رگرسیون^۳ و طبقه‌بندی^۴ قرار می‌گیرند. هدف اصلی در هر دو گروه، توصیف ارتباط بین متغیر هدف و دیگر متغیرهای موجود در داده ورودی است. اگر متغیر هدف به صورت یک تابع پیوسته از مقادیر ورودی تعریف شود در دسته رگرسیون قرار می‌گیرد. اگر متغیر هدف نشان‌دهنده تعلق به یک دسته خاص باشد، از الگوریتم‌های طبقه‌بندی بهره گرفته می‌شود. در الگوریتم‌های یادگیری بدون نظارت، متغیر هدف وجود ندارد و هدف اصلی یافتن الگوی نهان موجود در داده به کمک گروه‌بندی^۵ است. در الگوریتم‌های یادگیری تقویتی، به طور کلی دو هویت اصلی عامل و محیط تعریف می‌شود. عامل با انجام سری آزمون و خطاها سعی می‌کند بازخورد مثبت عمل خروجی خود از محیط را افزایش دهد.

در مرجعی دیگر ظرفیت‌های مدل‌های یادگیری ماشین در کاربردهای گوناگونی برای سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی معرفی شده است [۳۲]. مدل‌های یادگیری ماشین مختلفی در بررسی اثر عامل‌های محیطی در سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی به کار گرفته شده است. برای مثال، برای مدل‌سازی افت ناشی از نشست گردوغبار در سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی، پنج مدل یادگیری ماشین مختلف بررسی شده است. برای آموزش این مدل‌ها، از چندین داده آب‌وهوایی مرتبط با ریزگردها استفاده شده است. در میان مدل‌های آموزش داده شده، مدل پرسپترون چندلایه کمترین خطای میانگین را داشته است [۳۴]. در یک پژوهش دیگر، برای آموزش یک مدل شبکه عصبی، داده‌های حسگرهای نصب‌شده در یک سامانه فتوولتاییک خورشیدی به کار گرفته شده است. مدل آموزش دیده با امتیاز R^2 برابر با ۹۶ درصد عملکرد مناسبی برای پیش‌بینی بازدهی سامانه فتوولتاییک خورشیدی براساس داده‌های محیطی داشته است [۴۵]. مدل‌های یادگیری ماشین قابلیت تحلیل و به‌کارگیری داده‌های غیر عددی را برای پیش‌بینی اثر عامل‌های محیطی در سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی دارد. این مدل‌ها با پردازش اطلاعات درون تصویر، قادر به استخراج اطلاعات سودمندی درباره وضعیت یک سامانه فتوولتاییک خورشیدی است. برای مثال، از تصویر آسمان برای مدل‌سازی پیش‌بینی حرکت ابرها برای اثر سایه‌اندازی آنان بر سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی استفاده شده است [۴۶]. همچنین، این مدل‌ها قابلیت ترکیب با مدل‌های تئوری برای پیش‌بینی اثر عامل‌های محیطی را دارد. برای مثال، در یک مطالعه به کمک مدل شبکه عصبی برای پردازش تصویر در ترکیب با تحلیل مداری یک پنل فتوولتاییک خورشیدی، اثر نشست گردوغبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک بررسی شده است. مدل ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با به‌کارگیری فقط مدل شبکه عصبی دقت بهتری را براساس متریک حداقل مربعات خطا گزارش کرده است [۴۷]. در یک پژوهش دیگر، ترکیبی از جفت متغیرهای محیطی به عنوان داده ورودی برای پیش‌بینی توان خروجی سامانه فتوولتاییک به کمک شبکه‌های عصبی بررسی شده است. دقت مدل‌های شبکه عصبی با در نظرگیری جفت متغیرهای حداکثر دمای محیط و رطوبت نسبی، دمای محیط و تابش بیشترین دقت را داشته‌اند. جنس جفت متغیرها، بیان‌گر اثر واضح تابش و دما در پیش‌بینی توان خروجی سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی است [۴۸].

همچنین، جدول ۳ نشان‌دهنده سایر بررسی‌های موجود در مقاله‌های علمی است که به‌کارگیری روش‌های یادگیری ماشین برای تحلیل و پیش‌بینی تأثیر پارامترهای محیطی بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی را مورد بررسی قرار داده‌اند.

1. Target variable
2. Features
3. Regression
4. Classification
5. Clustering
6. Root Mean Squared Error (RMSE)

جدول ۳. کاربرد روش‌های یادگیری ماشین برای بررسی پارامترهای محیطی مؤثر بر سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی

مرجع	روش مدل‌سازی مقاله	خلاصه مطالعه
(۴۹)	مروری در زمینه روش‌های برپایه یادگیری ماشین در سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی	الگوریتم‌هایی همچون شبکه عصبی، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبانی و رگرسیون از جمله روش‌های پرتکرار در زمینه پیش‌بینی تأثیر پارامترهای محیطی بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی هستند. این الگوریتم‌ها علاوه بر اینکه تأثیر مواردی نظیر دما، رطوبت، سرعت باد و گردوغبار را به کمک توابع ریاضی مورد مطالعه قرار می‌دهند، می‌توانند رفتار خود پارامترها را نیز مدل‌سازی و پیش‌بینی کنند. با این حال اغلب پژوهش‌های به‌کارگرفته یادگیری ماشین روی پیش‌بینی توان خروجی تمرکز داشته‌اند.
(۵۰)	الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی و گرادیان بوستینگ	با بهره‌گیری از الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی و گرادیان بوستینگ و با داده‌های دمای محیط، تابش، سرعت باد و رطوبت نسبی برای پیش‌بینی دقیق دمای مازول‌های فتوولتاییک خورشیدی بهره گرفته شده است. نتایج این پژوهش نشان داده که مدل شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادشده به ضریب تعیین ۰/۹۸۶ دست می‌یابد که بیانگر دقت زیاد این الگوریتم است.
(۵۱)	شبکه عصبی مصنوعی	با در نظر گرفتن پارامترهای اشاره‌شده و به‌کمک داده‌های تجربی ضبط‌شده طی یک سال، به پیش‌بینی دمای سلول به روش شبکه عصبی مصنوعی پرداخته شد و هم‌پوشانی ۹۸/۸۷ درصدی بین دمای پیش‌بینی‌شده و دمای اندازه‌گیری شده نشان داده شد.
(۵۲)	میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه	دقت و برتری الگوریتم میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه ^۱ در پیش‌بینی تابش دریافتی توسط سامانه فتوولتاییک خورشیدی را نسبت به شبکه عصبی مطرح می‌کند.
(۵۳)	ماشین بردار پشتیبانی	الگوریتم ماشین بردار پشتیبانی نیز برای پیش‌بینی تغییر کوتاه‌مدت تابش پیشنهاد شده است.
(۵۴)	شبکه عصبی مصنوعی	به کمک شبکه عصبی مصنوعی که با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از یک نمونه سامانه آزمایشگاهی در فضای باز آموزش داده شده است، دمای سطح مازول فتوولتاییک خورشیدی با دو متغیر دمای محیط و تابش پیش‌بینی شده است.
(۵۵)	رگرسیون خطی چندمتغیره ^۲ و شبکه عصبی مصنوعی	با استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره و شبکه عصبی مصنوعی مدلی برای پیش‌بینی بازدهی سامانه فتوولتاییک خورشیدی بر اثر دمای محیط و گردوغبار در کشور اردن توسعه یافته است. همچنین، نشان داده شده است که مدت زمان مناسب برای هر بار تمیزکاری پنل در اقلیم مورد بررسی حدود ۱۲ تا ۱۵ روز است.
(۵۶)	رگرسیون خطی چندمتغیره	با بهره‌گیری از رگرسیون خطی چندمتغیره بازدهی یک سامانه فتوولتاییک خورشیدی نصب‌شده در بام ساختمان را مورد بررسی قرار داده و ضریب تعیین ۹۱ درصدی را گزارش کرده است.
(۵۷)	شبکه عصبی	به‌کمک ضریب همستگی پیرسون عوامل محیطی مؤثر بر عملکرد یک نیروگاه بزرگ‌مقیاس در مالزی شناسایی شده و با شبکه عصبی به پیش‌بینی میزان تولید توان پرداخته شده است.
(۵۸)	رگرسیون کرنل ریج ^۳	جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدارباز، ضریب پری و توان بیشینه پنل‌های مختلف ساخته‌شده از نیمه‌رساناهای متفاوت به‌کمک رگرسیون کرنل ریج تحت تغییر دمایی پیش‌بینی شده است.
(۵۹)	شبکه عصبی مصنوعی	یک شبکه عصبی مصنوعی با دو لایه پنهان می‌تواند به حداقل خطای میانگین مربعات ریشه ۱/۹۷ درصد در پیش‌بینی خروجی پنل تحت شرایط واقعی آب‌وهوایی دست یابد.
(۶۰)	شبکه عصبی پیچشی ^۴	به‌کمک شبکه عصبی پیچشی ولتاژ خروجی پنل فتوولتاییک تحت شرایط مختلف گردوغبار پیش‌بینی شده و ضریب تعیین ۰/۴۱۶۶ به دست آمده است.
(۶۱)	شبکه عصبی بازگشتی	با استفاده از شبکه عصبی بازگشتی اثر گردوغبار را بر ۶ پنل مستقل با فناوری‌های مونوکریستال و پلی‌کریستال در کشور عمان بررسی شده است. در این پژوهش نشان داده شده است توان خروجی پنل‌ها بر اثر این پارامتر از ۲۸/۹۴ تا ۳۶/۲۱ درصد دچار افت می‌شود.
(۶۲)	شبکه عصبی	مدل شبکه عصبی برای بررسی اثر گردوغبار روی سلول‌های مونوکریستال، پلی‌کریستال و میکرومورف توسعه داده شده است. همچنین نشان داده شده است که شبکه‌ای با سه لایه و پنج نورون پنهان می‌تواند عملکرد پنل را فارغ از فناوری ساخت آن پیش‌بینی کند.
(۶۳)	رگرسیون خطی چندگانه، رگرسیون گاوسی، رگرسیون ماشین بردار پشتیبانی	سه روش یادگیری ماشین به نام‌های رگرسیون خطی چندگانه، رگرسیون گاوسی، رگرسیون ماشین بردار پشتیبانی برای بررسی اثر گردوغبار مورد استفاده قرار گرفته است. روش سوم بهترین نتیجه را از نظر خطای میانگین مربعات در اختیار قرار می‌دهد.
(۶۴)	الگوریتم‌های کی - نزدیک‌ترین همسایه، درخت تصمیم‌گیری، جنگل تصادفی و گرادیان بوست	از الگوریتم‌های کی - نزدیک‌ترین همسایه، درخت تصمیم‌گیری، جنگل تصادفی و گرادیان بوست برای پیش‌بینی میزان عبور نور از سطح پنل‌های افقی، شیب‌دار و عمودی استفاده شده است. در نتیجه پژوهش گرادیان بوست به عنوان دقیق‌ترین روش معرفی شده است.
(۶۵)	شبکه عصبی	با بهره‌گیری از شبکه عصبی، اثر درازمدت نشست ذره‌های از جنس آهک، خاک رس و گردوغبار شهری روی بازدهی پنل فتوولتاییک خورشیدی بررسی شده است. این پژوهش نشان داده که افت بازدهی ناشی از گردوغبار می‌تواند با توجه به جنس‌های اشاره‌شده طی شش ماه به حدود ۶۷ تا ۷۸ درصد برسد.

1. Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)
2. Multi-variant Linear Regression
3. Kernel Ridge Regression (kRR)
4. Convolutional Neural Network (CNN)

براساس جدول ۳، الگوریتم‌های متنوعی از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبانی، رگرسیون‌های خطی و غیرخطی و الگوریتم‌های گرایان بوست^۱ به کار رفته‌اند. این روش‌ها می‌توانند با دقت زیاد توان خروجی، تابش، دما و دیگر پارامترهای محیطی را پیش‌بینی کنند. این روش‌ها قادر هستند بررسی تأثیر پارامترهای محیطی را بر خروجی سامانه فتوولتاییک خورشیدی ممکن سازند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های جنگل تصادفی توانایی بالایی در مدل‌سازی برخی داده‌های محیطی داشته و بیشترین دقت را در پیش‌بینی‌ها به دست آورده‌اند.

به طور کلی، مطالبی که در خصوص پژوهش‌های اخیر برای به‌کارگیری روش‌های یادگیری ماشین در سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی بیان شد، نشان‌دهنده اهمیت و کارایی بالای روش‌های یادگیری ماشین در بهبود عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی ناشی از تأثیر پارامترهای محیطی بر آن‌ها است.

به طور کلی و به عنوان بحث در خصوص یافته‌های پژوهش، نرخ رشد سالانه ۹/۱۳ درصدی در انتشارات علمی نشان‌دهنده توجه روزافزون جامعه علمی و صنعتی به موضوع مدل‌سازی پارامترهای محیطی در سامانه‌های فتوولتاییک است. این رشد بیانگر هم‌زمانی نیاز جهانی به توسعه انرژی خورشیدی کارآمد و پیشرفت روش‌های نوین محاسباتی در مدل‌سازی است. توزیع جغرافیایی مقالات نیز نشان می‌دهد علاوه بر کشورهای صنعتی پیشرفته، کشورهایی با پتانسیل بالای تابش خورشیدی مانند ایران، هند و چین نیز نقش مؤثری در این حوزه دارند.

تحلیل هم‌آبی کلیدواژه‌ها سه دسته اصلی پژوهشی را مشخص کرد. دسته نخست به اثر مستقیم پارامترهای محیطی نظیر دما، گردوغبار و رطوبت بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک اشاره دارد که چالش‌های مربوط به حفظ بازدهی در شرایط اقلیمی متغیر را نشان می‌دهد. دسته دوم به رویکردهای مدل‌سازی اختصاص دارد و روند گذار از مدل‌های فیزیکی به سمت الگوریتم‌های یادگیری ماشین را آشکار می‌سازد. دسته سوم بر نوآوری‌های فناورانه مانند ردیابی نقطه توان بیشینه و مدل‌های ترکیبی تمرکز دارد. این سه دسته در مجموع تصویری جامع از تحول این حوزه به سمت روش‌های داده‌محور و ترکیبی ارائه می‌دهند.

تحلیل محتوایی نیز این یافته‌ها را تقویت می‌کند. در حالی که مدل‌های جعبه‌سفید هنوز درک نظری مناسبی فراهم می‌کنند، سهم مدل‌های یادگیری ماشین به‌ویژه یادگیری عمیق به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. در بسیاری از پژوهش‌ها، مدل‌های ترکیبی عملکرد دقیق‌تر و پایدارتر نسبت به روش‌های منفرد ارائه کرده‌اند، که اهمیت این رویکردها در شناسایی هم‌زمان جنبه‌های فیزیکی و داده‌محور عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک را نشان می‌دهد.

یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین درباره محدودیت‌های مدل‌های جعبه‌سفید در مواجهه با پدیده‌های غیرخطی همخوانی دارد. برای مثال، جوردی [۳۰] و غلامی [۳۳] نشان داده‌اند که این مدل‌ها علی‌رغم ارزش بالای نظری و توانایی در برآورد پارامترها، در شرایط واقعی عملکرد مطلوبی ندارند. مرور حاضر این موضوع را تأیید و شواهد گسترده‌تری در این زمینه ارائه می‌کند. از سوی دیگر، نتایج ما با پژوهش‌هایی که به توانایی بالای مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک اشاره دارند هم‌راستا است. مطالعاتی مانند گاواریا [۳۲] و سیلوا [۳۴] دقت زیاد الگوریتم‌های یادگیری ماشین را در شناسایی اثر پارامترهایی همچون گردوغبار، تابش و دما نشان داده‌اند. مرور حاضر این یافته‌ها را گسترش داده و تأکید می‌کند که روش‌های یادگیری عمیق و مدل‌های ترکیبی دقت بیشتری نسبت به مدل‌های منفرد دارند. همچنین، نتایج این مطالعه یک روند کمتربرجسته‌شده در مرورهای پیشین را نشان می‌دهد: افزایش استفاده از مدل‌های ترکیبی. این موضوع تأییدکننده پیشنهاد چن و اروین [۳۱] است که ترکیب رویکردهای فیزیکی و داده‌محور را راهکاری مقاوم می‌دانستند. مرور حاضر با تحلیل جامع پژوهش‌های چهار دهه گذشته، شواهد محکمی بر اهمیت و آینده‌دار بودن مدل‌های ترکیبی ارائه می‌دهد.

۵. نتیجه‌گیری

عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی به‌شدت تحت تأثیر پارامترهای محیطی مانند تابش خورشید، دما، گردوغبار، سرعت

باد، رطوبت و فشار هوا قرار دارد. شناخت دقیق این پارامترها و مدل‌سازی تأثیر آن‌ها بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی، می‌تواند موجب بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌های عملیاتی شود. با توجه به تحلیل مرجع‌شناسی انجام‌شده در این مقاله، سه موضوع کلیدی مدل‌های پیش‌بینی، عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی و یادگیری ماشین در مقاله‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع‌ها، نه‌تنها به دلیل اهمیت آن‌ها در بهبود عملکرد سامانه‌های خورشیدی، بلکه به دلیل نقش کلیدی آن‌ها در پیش‌بینی دقیق سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی در شرایط محیطی مختلف برجسته شده‌اند. پژوهش‌های متعددی از روش‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی، رگرسیون و الگوریتم‌های دیگر برای بررسی پارامترهای محیطی تأثیرگذار بر سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی بهره گرفته‌اند.

اهداف اصلی این پژوهش، مرور نظام‌مند روش‌های مدل‌سازی پارامترهای محیطی مؤثر بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک و شناسایی روندهای نوین و شکاف‌های پژوهشی در این حوزه بوده است. نتایج تحلیل مرجع‌شناسی و محتوایی به طور مستقیم این اهداف را پشتیبانی می‌کنند. به طور خاص، رشد پیوسته انتشارات علمی بیانگر اهمیت روزافزون این حوزه و تحلیل محتوایی نیز نشان‌دهنده گذار از مدل‌های فیزیکی به سمت مدل‌های داده‌محور و ترکیبی است. این یافته‌ها علاوه بر تأیید هدف اولیه تحقیق، افق‌های تازه‌ای را در زمینه چالش‌های کیفیت داده، تفسیرپذیری مدل‌ها و تعمیم‌پذیری میان‌اقلیمی روشن می‌سازند. در نتیجه، دستاوردهای این مرور ارتباط روشنی با اهداف مطالعه داشته و مسیر مشخصی برای پژوهش‌های آینده ارائه می‌دهند.

مقایسه نتیجه‌ها نشان داد روش‌های ترکیبی که از هر دو مدل جعبه‌سفید و جعبه‌سیاه استفاده می‌کنند، می‌توانند نقاط ضعف هر یک را پوشش دهند. ترکیب مدل‌های فیزیکی با یادگیری ماشین باعث می‌شود دقت پیش‌بینی افزایش یابد، در حالی که نیاز به داده‌های گسترده کاهش می‌یابد. به علاوه، ترکیب روش‌های پردازش تصویر با یادگیری عمیق نیز می‌تواند در شناسایی اثر گردوغبار و شرایط جوی بر عملکرد سامانه‌ها مفید باشد.

در حالی که برتری مدل‌های ترکیبی برجسته شد، بررسی عملی و اعتبارسنجی میان‌منطقه‌ای آن‌ها خارج از دامنه این مطالعه بوده است. پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده شامل توسعه مدل‌های یادگیری ترکیبی برای افزایش دقت پیش‌بینی، استفاده از تکنیک‌های یادگیری انتقالی برای بهبود مدل‌سازی در موارد کم‌داده و بهره‌گیری از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی در شرایط محیطی متغیر است. همچنین، بهره‌گیری از داده‌های حسگرهای اینترنت اشیا برای بهبود مدل‌های پیش‌بینی، یکی از روندهای آینده در این حوزه خواهد بود.

منابع

- [1] Mahmoudian Yonesi S, Gandomzadeh M, Mosayyebi A, Mazlom Farsibaf M, Zandi M. Modeling the supply chain of LNG with system dynamic method (Case study: Iran). *Strateg Stud Pet Energy Ind.* 2024;60(16).
- [2] Jami M, Parsay A, Gandomzadeh M, Mosayyebi A, Gavagsaz-Ghoachani R, Zandi M. Future Energy Modeling Pathway in Iran: Scenario Analysis Using Cross-Impact Balance Method. *J Sustain Energy Syst.* 2024;3(2):193–208.
- [3] Gholami A, Deghan Banadaky M, Gholami A. Advancing Sustainability in Dairy Farming: Integrating Renewable Energy and Dietary Innovations. In: 2025 10th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM). 2025.
- [4] Parsay A, Gandomzadeh M, Gholami A, Gavagsaz-Ghoachani R, Phattanasak M. Multi-Purposeful Visualization Card: A Creative Teaching Tool For Attractive Engineering Education. 4th Res Invent Innov Congr Innov Better Life (RI2C 2023). 2023;1–4.
- [5] Parsay A, Gandomzadeh M, Yaghoubi AA, Hoorsun A, Gholami A, Zandi M, et al. Enhancing photovoltaic efficiency: An in-depth systematic review and critical analysis of dust monitoring, mitigation, and cleaning techniques. *Appl Energy* [Internet]. 2025 Jun;388:125668. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261925003988>
- [6] Alviri Y, Zandi M, Jahangiri A, Ameri M, Gholami A, Shahidi P, et al. BIPV-driven smart vertical greenhouses: a water energy food environment nexus framework for sustainable urban agriculture. *Energy Nexus.* 2025;19.
- [7] Akhbari H, Eslami S, Gholami A. Long-term performance evaluation of hybrid solar thermal and desalination Systems: Heat transfer fluids and advanced configurations insights. *Case Stud Therm Eng.* 2025;73:106601.
- [8] Goharian MS, Gandomzadeh M, Gholami A, Gavagsaz-Ghoachani R, Phattanasak M. Floating Solar Photovoltaics: Design Classifications and Technological Trends. *Proc - 2025 IEEE 7th Glob Power, Energy Commun Conf GPECOM 2025.* 2025;668–72.
- [9] Minoofar A, Zandi A, Gholami A. Precise prediction models for floating and land-based Photovoltaics: Comparative analysis for advancing sustainable energy and water management solutions. *Renew Energy.* 2025;255.
- [10] Piryaee Z, Gholami A, Zandi M, Gavagsaz-Ghoachani R, Phattanasak M. Advances in Nanotechnology for Sustainable Photocatalytic Water Splitting. In: V International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2025). Paris: IEEE; 2025.
- [11] Yousefi Roshan A, Gandomzadeh M, Alviri Y, Gholami A, Zandi M. Nanomaterials in Zero Energy Buildings: A Comprehensive Review of Achievements, Challenges, and Urban Perspectives. *Urban Dev Policy Mak.* 2025;
- [12] Yaghoubi AA, Gandomzadeh M, Gholami A, Gavagsaz-Ghoachani R, Zandi M, Phattanasak M. Harnessing Machine Learning with Advanced Linear Regression Models to Forecast PV System. In: 2024 International Conference on Materials and Energy: Energy in Electrical Engineering (ICOME 2024) [Internet]. IEEE; 2024. p. 1–4. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10845673/>
- [13] Gandomzadeh M, Kabiri-Sedeh M, Gavagsaz-Ghoachani R, Zandi M. Practical reliability study of a photovoltaic system for the supply of home load profile; Case study: Tehran city. In: 2019 Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG2019). Tehran; 2019. p. 1–6.
- [14] Hoorsun A, Gandomzadeh M, Yaghoubi AA, Parsay A, Gholami A, Zandi M. Insights and Research Trends of Dust and Cleaning in Solar Energy: A Bibliometric Review Study. In: 2024 9th International Conference on Technology and Energy Management, ICTEM 2024. Behshahr, Mazandaran, Iran: IEEE; 2024. p. 1–5.
- [15] Bozorgpuore S, Gholami A. Impacts of Shading on Photovoltaic Panel Performance and Mitigating Strategies. *Iran Electr Ind J Qual Product.* 2025;14(2):1–13.
- [16] Ameri M, Gandomzadeh M, Yaghoubi AA, Gholami A, Zandi M, Gavagsaz-Ghoachani R. Revolutionizing Solar Panel Maintenance in Photovoltaic Systems: Reviewing Intelligent UAV

- Solutions for Efficient Dust Mitigation and Perspectives. In: 7th International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME 2024). 2024. p. 111–9.
- [17] Gandomzadeh M, Gholami A, Zandi M. Modeling Environmental Parameters Affecting the Performance of Solar Photovoltaic Systems Using Machine Learning. 2025 10th Int Conf Technol Energy Manag ICTEM 2025. 2025;
- [18] Rostami S, Zeinalpourcharigh H, Kouhzadi Hikoe MA, Gandomzadeh M, Minoofar A, Gholami A, et al. Convolutional Neural Networks for Hotspot Detection in Photovoltaic Systems. In: V International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2025). Paris: IEEE; 2025.
- [19] Kouhzadi Hikoe MA, Rostami S, Zeinalpourcharigh H, Gandomzadeh M, Minoofar A, Gholami A, et al. PV Panel Defect Detection Based on CNN Machine Learning Using Electroluminescence Dataset. In: V International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2025). Paris: IEEE; 2025.
- [20] Gholami K, Karimi S, Rastgou A. Fuzzy risk-based framework for scheduling of energy storage systems in photovoltaic-rich networks. J Energy Storage. 2022;52.
- [21] Piryaee Z, Gholami A, Zandi M. 4E performance evaluation of renewable microgrids: Comparing hydrogen and battery storage for nearly net zero energy buildings. Energy Convers Manag [Internet]. 2025;332(March):119711. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119711>
- [22] Gandomzadeh M, Malandish E, Gavagsaz-Ghoachani R, Jafari H, Phattanasak M. Purposeful Learning Booklet a method for teaching Engineering. In: 2019 6th International Conference on Technical Education (ICTechEd6). 2019. p. 1–6.
- [23] Yaghoubi AA, Gandomzadeh M, Gholami A, Gavagsaz Ghoachani R, Zandi M, A. Kazem H. Optimize photovoltaic panels cleaning scheduling framework based on variations of hourly-based active electricity pricing in the market. Sol Energy. 2024 Jun;275(May):112633.
- [24] Gholami A, Ameri M, Zandi M, Ghoachani RG, Kazem HA. Predicting solar photovoltaic electrical output under variable environmental conditions: Modified semi-empirical correlations for dust. Energy Sustain Dev. 2022;71:389–405.
- [25] Gandomzadeh M, Gholami A, Zandi M. Modeling Environmental Parameters Affecting the Performance of Solar Photovoltaic Systems Using Machine Learning. In: 2025 10th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM2025). Tabriz; 2025.
- [26] Gandomzadeh M, Mahmoudian Younesi S, Mosayyebi A, Zandi M. Development scenarios for electrical energy storage in Iran with Cross-Impact Balance method. J Sustain Energy Syst [Internet]. 2022;1(4):373–96. Available from: https://ses.ut.ac.ir/article_91815.html?lang=en
- [27] Gandomzadeh M, Yaghoubi AA, Hoorsun A, Parsay A, Gholami A, Zandi M, et al. Dust mitigation methods and multi-criteria decision-making cleaning strategies for photovoltaic systems: Advances, challenges, and future directions. Energy Strateg Rev. 2025;57:101629.
- [28] Rezvani M, Gholami A, Gavagsaz-Ghoachani R, Zandi M. A Review on The Effect of Dust Properties on Photovoltaic Solar Panels' Performance. J Renew New Energy. 2023 Mar;10(1):198–211.
- [29] Yaghoubi AA, Gandomzadeh M, Parsay A, Gholami A, Gavagsaz-Ghoachani R, Zandi M. A Review on Machine Learning Model Implementation for Photovoltaic Systems. In: 2024 11th Iranian Conference on Renewable Energy and Distribution Generation, ICREDG 2024. Yazd, Iran: IEEE; 2024. p. 1–5.
- [30] Jordehi AR. Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review. Renew Sustain Energy Rev. 2016;61:354–71.
- [31] Chen D, Irwin D. Black-box solar performance modeling: Comparing physical, machine learning, and hybrid approaches. ACM SIGMETRICS Perform Eval Rev. 2017;45(2):79–84.
- [32] Gaviña JF, Narváez G, Guillen C, Giraldo LF, Bressan M. Machine learning in photovoltaic systems: A review. Renew Energy. 2022;196:298–318.
- [33] Gholami A, Ameri M, Zandi M, Gavagsaz Ghoachani R. Electrical, thermal and optical modeling of photovoltaic systems: Step-by-step guide and comparative review study. Sustain Energy Technol Assessments. 2022 Feb;49:101711.

- [34] Silva LAC, Ruiz LGB, Criado-Ramón D, Bessa JG, Micheli L, Jiménez M del CP. Assessing the impact of soiling on photovoltaic efficiency using supervised learning techniques. *Expert Syst Appl*. 2023;231:120816.
- [35] Yaghoubi AA, Gandomzadeh M, Gholami A, Gavagsaz-Ghoachani R, Zandi M. Long-term comparative analysis of machine learning models: A deep dive into applications of artificial intelligence for enhancing photovoltaic performance prediction. *Int J Electr Power Energy Syst*. 2025;170.
- [36] Gholami A, Ameri M, Zandi M, Gavagsaz Ghoachani R. Electrical, thermal and optical modeling of photovoltaic systems: Step-by-step guide and comparative review study. *Sustain Energy Technol Assessments*. 2022;49.
- [37] Zandi M, Amirhosseini M. *Solar Energy; Solar Photovoltaic Systems*. 2021. 418 p.
- [38] Baig MQ, Khan HA, Ahsan SM. Evaluation of solar module equivalent models under real operating conditions - A review. *J Renew Sustain Energy*. 2020 Jan;12(1):012701.
- [39] Yıldırım N, Tacer E. Identification of photovoltaic cell single diode discrete model parameters based on datasheet values. *Sol Energy*. 2016;127:175–83.
- [40] Notton G, Cristofari C, Mattei M, Poggi P. Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. *Appl Therm Eng*. 2005;25(17–18):2854–77.
- [41] Siddiqui MU, Arif AFM, Kelley L, Dubowsky S. Three-dimensional thermal modeling of a photovoltaic module under varying conditions. *Sol energy*. 2012;86(9):2620–31.
- [42] Weiss L, Amara M, Ménézo C. Impact of radiative-heat transfer on photovoltaic module temperature. *Prog Photovoltaics Res Appl*. 2016 Jan;24(1):12–27.
- [43] Smestad GP, Germer TA, Alrashidi H, Fernández EF, Dey S, Brahma H, et al. Modelling photovoltaic soiling losses through optical characterization. *Sci Rep*. 2020;10(1):58.
- [44] Russell SJ, Norvig P. *Artificial intelligence: a modern approach*. Pearson; 2016.
- [45] Sahin G, Isik G, van Sark WGJHM. Predictive modeling of PV solar power plant efficiency considering weather conditions: A comparative analysis of artificial neural networks and multiple linear regression. *Energy Reports*. 2023;10:2837–49.
- [46] Paletta Q, Hu A, Arbod G, Lasenby J. ECLIPSE: Envisioning CCloud Induced Perturbations in Solar Energy. *Appl Energy*. 2022;326.
- [47] Jiao X, Li X, Yang Y, Xiao W. Novel and comprehensive approach for power loss estimation of soiled photovoltaic modules. *Sol Energy*. 2024;268:112283.
- [48] Kassem Y, Othman AA. Selection of most relevant input parameters for predicting photovoltaic output power using machine learning and quadratic models. *Model Earth Syst Environ*. 2022;8(4):4661–86.
- [49] Tina GM, Ventura C, Ferlito S, De Vito S. A state-of-art-review on machine-learning based methods for PV. Vol. 11, *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021.
- [50] Keddouda A, Ihaddadene R, Boukhari A, Atia A, Arıcı M, Lebbihiat N, et al. Photovoltaic module temperature prediction using various machine learning algorithms: Performance evaluation. *Appl Energy*. 2024;363:123064.
- [51] Kayri I, Aydın H. ANN Based Prediction of Module Temperature in a Single Axis PV System. In: *IEEE Global Energy Conference, GEC 2022*. 2022. p. 361–7.
- [52] Fara L, Diaconu A, Craciunescu D, Fara S. Forecasting of Energy Production for Photovoltaic Systems Based on ARIMA and ANN Advanced Models. *Int J Photoenergy*. 2021;2021.
- [53] Li J, Ward JK, Tong J, Collins L, Platt G. Machine learning for solar irradiance forecasting of photovoltaic system. *Renew Energy*. 2016;90:542–53.
- [54] Ceylan I, ErKaymaz O, Gedik E, Gurel AE. The prediction of photovoltaic module temperature with artificial neural networks. *Case Stud Therm Eng*. 2014;3:11–20.
- [55] Hammad B, Al-Abed M, Al-Ghandoor A, Al-Sardeah A, Al-Bashir A. Modeling and analysis of dust and temperature effects on photovoltaic systems' performance and optimal cleaning frequency: Jordan case study. *Renew Sustain Energy Rev*. 2018 Feb;82(April 2017):2218–34.
- [56] Sharma S, Joshua Thomas J, Vasant P. Performance Analysis and Effects of Dust & Temperature on Solar PV Module System by Using Multivariate Linear Regression Model. In: *Artificial Intelligence for Renewable Energy and Climate Change*. 2022. p. 217–75.

- [57] Amer HN, Dahlan NY, Azmi AM, Latip MFA, Onn MS, Tumian A. Solar power prediction based on Artificial Neural Network guided by feature selection for Large-scale Solar Photovoltaic Plant. *Energy Reports*. 2023;9:262–6.
- [58] Durganjali CS, Avinash G, Megha K, Ponnalagu RN, Goel S, Radhika S. Prediction of PV cell parameters at different temperatures via ML algorithms and comparative performance analysis in Multiphysics environment. *Energy Convers Manag*. 2023;282:116881.
- [59] Mohammad AT, Hussen HM, Akeiber HJ. Prediction of the output power of photovoltaic module using artificial neural networks model with optimizing the neurons number. *Int J Renew Energy Dev*. 2023 May;12(3):478–87.
- [60] Villan JS, Mantalaba RR, Diaz RJB, Albios KDO, Elevecionado VT, Benares NP, et al. Dust Impact Assessment on Micro Solar Voltage: A Deep Learning-Enabled Prediction Approach. In: 2023 IEEE 15th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM). 2024. p. 1–5.
- [61] Yousif JH, Kazem HA, Bwalya KJ. Dust impact on photovoltaic technologies: a comparative analysis using deep recurrent neural networks. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff*. 2024;46(1):3023–40.
- [62] Tossa AK, Soro YM, Coulibaly Y, Azoumah Y, Migan-Dubois A, Thiaw L, et al. Artificial intelligence technique for estimating PV modules performance ratio under outdoor operating conditions. *J Renew Sustain Energy*. 2018;10(5).
- [63] Tripathi AK, Aruna M, Venkatesan EP, Abbas M, Afzal A, Shaik S, et al. Quantitative Analysis of Solar Photovoltaic Panel Performance with Size-Variied Dust Pollutants Deposition Using Different Machine Learning Approaches. *Molecules*. 2022;27(22).
- [64] Ra N, Varman S, Antony Joseph K, Bhattacharjee A. Prediction of Optical Performance of Solar PV under the Impact of Natural Dust Accumulation: Machine Learning Approach. In: 2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies, GlobConHT 2023. 2023. p. 1–5.
- [65] Kayri İ, Bayar MT. A new approach to determine the long-term effect of efficiency losses due to different dust types accumulation on PV modules with artificial neural networks. *J Clean Prod*. 2024;434:140282.