



Modeling Key Barriers and Ranking Practical Strategies for Facilitating the Market Penetration of Solar Home Systems in Iran

Ali Ehsani¹, Farzad Bahrami^{*2}

1- Department of Industrial Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, Arak University, Arak, Iran

Abstract

Purpose: Despite the growth in installed renewable energy capacity in Iran, the penetration of Solar Home Systems (SHS) in the residential sector remains limited due to structural challenges. While many previous studies have examined general obstacles to renewable energy deployment, there is a significant research gap in modeling the specific barriers to SHS diffusion in the Iranian market. Therefore, this study aims to identify and model these key barriers and rank practical strategies for mitigating them. The main innovation of this research lies in proposing a hybrid fuzzy framework (FDM-FAHP-MARCOS) that, for the first time, manages the uncertainty in expert judgments and allows for precise analysis of market penetration barriers and operational prioritization of strategies tailored to the Iranian energy market's economic-institutional structure.

Methodology: This applied research adopts a descriptive-analytical approach. To analyze the problem and manage uncertainty in expert judgments, a hybrid fuzzy multi-criteria decision-making framework was employed, integrating the Fuzzy Delphi Method (FDM), the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP), and the Fuzzy MARCOS method. The expert panel consisted of seven specialists in renewable energy policy, solar market development, and energy economics in Iran. In the first stage, a systematic literature review identified 48 potential barriers. These factors were then evaluated using the FDM; linguistic assessments were converted into triangular fuzzy numbers, and consensus levels were determined. Factors with defuzzified values exceeding the predefined threshold were retained. In the second stage, the FAHP was applied to determine the relative importance and global weights of the dimensions and indicators through fuzzy pairwise comparisons. In the final stage, ten proposed strategies were evaluated and ranked using the Fuzzy MARCOS method, which assesses alternatives based on their distances from fuzzy ideal and anti-ideal solutions.

Findings: The FDM results identified 23 key barriers categorized into five dimensions: equipment quality, financial and payment structure, service and support, promotional and technological factors, and institutional and social factors. The FAHP results indicated that the "financial and payment structure" dimension, with a weight of 0.32, is the most significant barrier to SHS market penetration in Iran, followed by "service and support" with a weight of 0.24. These findings demonstrate that financial limitations and weak technical service infrastructure are the primary factors reducing households' willingness to invest in this technology. At the indicator level, the high initial cost, substantial down payment requirements, and lack of post-warranty services were identified as the most critical obstacles. Finally, the evaluation of ten practical strategies via the Fuzzy MARCOS method revealed that facilitating installment-based repayment schemes through banking and financial mechanisms is the most effective strategy. This is followed by installation subsidies for rural areas and public housing, and the establishment of a transparent and stable Feed-in Tariff (FIT) policy. The results further suggest that while awareness-raising and promotional measures are necessary, they have limited impact without fundamental improvements in financial and institutional frameworks.

Conclusion: The findings suggest that the slow diffusion of SHS in Iran is primarily driven by economic constraints and weaknesses in service infrastructure rather than technological limitations. High upfront costs, burdensome down payment requirements, and the absence of efficient after-sales service systems are the main deterrents to adoption. Therefore, designing innovative financing mechanisms—such as long-term low-interest installment plans, targeted subsidies for rural and low-income households, and stable Feed-in Tariff policies—can significantly reduce investment risk and bolster public confidence. Furthermore, strengthening technical service infrastructure, standardizing maintenance procedures, and requiring performance guarantees from service providers can enhance consumer trust in system reliability. These results provide actionable insights for policymakers and energy planners to design effective strategies for accelerating the adoption of Solar Home Systems in Iran.

Keywords: Solar Energy Market; Fuzzy MCDM; Renewable Energy Policy; Solar Home Systems (SHS)

Citation:

Ehsani, A., & Bahrami, F. (2026). Modeling Key Barriers and Ranking Practical Strategies for Facilitating the Market Penetration of Solar Home Systems in Iran. *Journal of Intelligent Marketing Management*, 7(3), 135-163.



مدل سازی موانع کلیدی و رتبه بندی راهکارهای عملی برای تسهیل نفوذ سیستم های خورشیدی

خانگی در بازار ایران

علی احسانی^۱، فرزاد بهرامی^{۲*}

۱- گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

هدف: با وجود رشد ظرفیت نصب شده انرژی های تجدیدپذیر در ایران، نفوذ سیستم های خورشیدی خانگی (SHS) در بازار مصرف همچنان با چالش های ساختاری مواجه است. اکثر پژوهش های پیشین به بررسی عمومی موانع تجدیدپذیرها پرداخته اند و شکاف بزرگی در مدل سازی یکپارچه موانع ویژه نفوذ بازار سیستم های خورشیدی خانگی در ایران وجود دارد. از این رو، هدف این پژوهش شناسایی و مدل سازی موانع کلیدی و رتبه بندی راهکارهای عملی برای تسهیل نفوذ این فناوری در بازار ایران است. نوآوری اصلی این مطالعه ارائه یک چارچوب تحلیلی ترکیبی فازی-FDM-FAHP (FDM-MARCOS) است که برای نخستین بار با مدیریت عدم قطعیت های قضاوت خبرگان، امکان تحلیل دقیق موانع نفوذ در بازار و اولویت بندی عملیاتی راهکارها را متناسب با ساختار اقتصادی-نهادی بازار انرژی ایران فراهم می سازد.

روش پژوهش: این پژوهش از نوع کاربردی بوده و با رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام شده است. برای تحلیل مسئله و مدیریت عدم قطعیت موجود در قضاوت های خبرگان، از یک چارچوب ترکیبی تصمیم گیری چندمعیاره فازی شامل روش دلفی فازی (FDM)، تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) و روش MARCOS فازی استفاده شد. جامعه خبرگان شامل ۷ نفر از متخصصان حوزه سیاست گذاری انرژی های تجدیدپذیر، توسعه بازار انرژی خورشیدی و اقتصاد انرژی در ایران بود. در مرحله نخست، با مرور نظام مند ادبیات پژوهش، فهرستی از ۴۸ مانع بالقوه استخراج شد. سپس با استفاده از روش دلفی فازی، ارزیابی خبرگان جمع آوری و متغیرهای زبانی به اعداد فازی مثلثی تبدیل شد و میزان اجماع میان آن ها محاسبه گردید. عواملی که مقدار دفازی شده آن ها از آستانه تعیین شده بیشتر بود برای مراحل بعدی حفظ شدند. در مرحله دوم، برای تعیین اهمیت نسبی و وزن نهایی ابعاد و شاخص های موانع از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده شد. در این مرحله مقایسات زوجی بر اساس مقیاس های ترجیح فازی انجام و وزن های نهایی استخراج گردید. در مرحله سوم، برای ارزیابی و رتبه بندی ۱۰ راهکار عملی پیشنهادی جهت کاهش موانع نفوذ سامانه های خورشیدی خانگی، روش MARCOS فازی به کار گرفته شد که امکان رتبه بندی گزینه ها را بر اساس فاصله آن ها از راداهل های ایده آل و ضدایده آل فراهم می کند.

یافته ها: نتایج مرحله دلفی فازی منجر به شناسایی ۲۳ مانع کلیدی شد که در پنج بعد کیفیت تجهیزات، ساختار مالی و پرداخت، خدمات و پشتیبانی، ابعاد ترویجی و فناوریانه و ابعاد نهادی و اجتماعی طبقه بندی شدند. نتایج تحلیل سلسله مراتبی فازی نشان داد بعد ساختار مالی و پرداخت با وزن ۰/۳۲ مهم ترین مانع نفوذ در بازار سامانه های خورشیدی خانگی در ایران است و پس از آن بعد خدمات و پشتیبانی با وزن ۰/۲۴ قرار دارد. این نتایج نشان می دهد محدودیت های اقتصادی و ضعف زیرساخت های خدمات فنی مهم ترین عوامل کاهش تمایل خانوارها برای سرمایه گذاری در این فناوری هستند. در سطح شاخص ها نیز هزینه اولیه بالای سیستم، مبلغ پیش پرداخت بالا و کمبود خدمات پس از گارانتی مهم ترین موانع شناسایی شدند. در ادامه، ۱۰ راهکار عملی با استفاده از روش MARCOS فازی ارزیابی شد. نتایج رتبه بندی نشان داد تسهیل طرح های بازپرداخت اقساطی از طریق سازوکارهای مالی و بانکی مؤثرترین راهکار برای کاهش موانع نفوذ سامانه های خورشیدی خانگی است. پس از آن پرداخت یارانه نصب برای مناطق روستایی و مسکن عمومی و تدوین قانون شفاف و پایدار خرید تضمینی برق در رتبه های بعدی قرار گرفتند. نتایج همچنین نشان داد راهکارهای آموزشی و ترویجی، هرچند ضروری اند، بدون اصلاح ساختارهای مالی و نهادی اثر محدودی بر گسترش این فناوری خواهند داشت.

نتیجه گیری: یافته های پژوهش نشان می دهد کندی نفوذ سامانه های خورشیدی خانگی در ایران بیشتر ناشی از چالش های اقتصادی و ضعف زیرساخت های خدماتی است تا محدودیت های فنی. هزینه اولیه بالای نصب، الزامات مالی مربوط به پیش پرداخت و نبود نظام کارآمد خدمات پس از فروش از مهم ترین عوامل بازدارنده پذیرش این فناوری در میان خانوارها هستند. بنابراین طراحی سازوکارهای نوآورانه تأمین مالی، از جمله طرح های اقساطی بلندمدت با بهره پایین، ارائه یارانه های هدفمند برای مناطق روستایی و اقشار کم درآمد و ایجاد چارچوب های پایدار خرید تضمینی برق می تواند نقش مهمی در کاهش ریسک سرمایه گذاری و افزایش اعتماد عمومی ایفا کند. همچنین تقویت زیرساخت های خدمات فنی، استاندارد سازی نظام نگهداری و تعمیرات و الزام ارائه تضمین عملکرد توسط شرکت های ارائه دهنده خدمات می تواند اعتماد مصرف کنندگان را نسبت به پایداری عملکرد سامانه ها افزایش دهد. این نتایج می تواند به سیاست گذاران و برنامه ریزان انرژی در طراحی سیاست های مؤثر برای نفوذ در بازار سامانه های خورشیدی خانگی در ایران کمک کند.

کلیدواژه ها: بازار انرژی خورشیدی؛ تصمیم گیری چندمعیاره فازی؛ سیاست گذاری انرژی های تجدیدپذیر؛ سیستم های خورشیدی خانگی

استناد:

احسانی، علی و بهرامی، فرزاد. (۱۴۰۵). مدل سازی موانع کلیدی و رتبه بندی راهکارهای عملی برای تسهیل نفوذ سیستم های خورشیدی خانگی در بازار ایران.

مدیریت بازاریابی هوشمند، ۷(۳)، ۱۳۵-۱۶۳.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

https://doi.org/ JABM.3.2.15564.351256.3257.36310

نشریه مدیریت بازاریابی هوشمند، ۷(۳)، شماره ۳، پیاپی ۳۳

ناشر: نشریه مدیریت بازاریابی هوشمند

نوع مقاله: علمی پژوهشی

© نویسنده گان



مقدمه

در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های فزاینده درباره تغییرات اقلیمی، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی موجب شده است که توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر به یکی از مهم‌ترین اولویت‌های سیاست‌گذاری انرژی در سطح جهان تبدیل شود (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۴b). بسیاری از کشورها در تلاش هستند تا با افزایش سهم انرژی‌های پاک در سبد انرژی خود، وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش دهند. با این حال، تحقق این امر نیازمند نفوذ موفق این فناوری‌ها در بازارهای مصرفی است. در این میان، انرژی خورشیدی به دلیل فراوانی، دسترس‌پذیری گسترده و پیشرفت سریع فناوری‌های فتوولتائیک، به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر شناخته می‌شود. گزارش‌های بین‌المللی نشان می‌دهد که ظرفیت نصب‌شده انرژی خورشیدی در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته و این روند همچنان ادامه دارد (آژانس بین‌المللی انرژی تجدیدپذیر، ۲۰۲۳).

در کنار نیروگاه‌های بزرگ خورشیدی، سیستم‌های تولید پراکنده مبتنی بر انرژی خورشیدی نیز توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین این فناوری‌ها، سیستم‌های خورشیدی خانگی^۱ هستند که امکان تولید برق در مقیاس کوچک و در محل مصرف را فراهم می‌کنند. این سیستم‌ها (SHS) به عنوان یکی از راهکارهای توزیع‌شده تولید برق، پتانسیل بالایی برای تأمین انرژی پایدار دارند. اما نفوذ مؤثر آن‌ها در بازار مصرف، به شدت تحت تأثیر رفتارهای پذیرش مصرف‌کننده، مدل‌های کسب و کار و سازوکارهای حمایتی است (خطاک و همکاران، ۲۰۲۶).

کشور ایران با برخورداری از میانگین تابش خورشید بین ۴/۵ تا ۵/۵ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز، از ظرفیت فنی بسیار بالایی برای توسعه سامانه‌های خورشیدی برخوردار است (حسینجانی‌زاده و قانعی، ۲۰۱۸). در عین حال، آمارهای رسمی سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) نشان می‌دهد که ظرفیت تجمعی نیروگاه‌های تجدیدپذیر و پاک کشور تا خرداد سال ۱۴۰۵ به حدود ۵۱۹۷/۹ مگاوات رسیده است که از این میزان، حدود ۳۵۵۴/۱ مگاوات، معادل ۷۸ درصد، مربوط به انرژی خورشیدی است و نیروگاه‌های انشعابی نیز حدود ۵۸۶/۱ مگاوات، معادل ۱۱ درصد، از کل ظرفیت را تشکیل می‌دهند (ساتبا، ۱۴۰۵). با وجود این رشد کمی، بخش انشعابی و به‌ویژه سامانه‌های خورشیدی خانگی هنوز با سطح مورد انتظار نفوذ در بازار مصرف فاصله دارد. این وضعیت نشان می‌دهد که توسعه ظرفیت کل تجدیدپذیرها، لزوماً به معنای نفوذ موفق سیستم‌های خورشیدی خانگی در بازار خانوار نیست و همچنان موانع اقتصادی، نهادی، فنی و رفتاری در مسیر پذیرش گسترده این فناوری وجود دارد.

تجربه جهانی نشان می‌دهد نفوذ سیستم‌های خورشیدی خانگی نه تنها آثار مثبت زیست‌محیطی دارد، بلکه امنیت انرژی خانوارها را بهبود می‌بخشد (واربرگ، کیوله و پوگرانیا، ۲۰۲۶). با این حال، پذیرش بازار و نفوذ فراگیر این فناوری با چالش‌های متعددی مواجه است (انگوندا، ۲۰۲۲). بررسی‌ها نشان می‌دهد که موانع اقتصادی (از جمله هزینه اولیه بالا، نبود سازوکارهای مالی مناسب و محدودیت تسهیلات اعتباری) از مهم‌ترین عوامل بازدارنده هستند (جامی اودولو و یزدانی، ۲۰۲۱؛ لیو، ۲۰۱۸). در کنار آن، چالش‌های فنی و خدماتی مانند کیفیت نامناسب تجهیزات و ضعف خدمات پس از فروش و نگهداری (افاه و همکاران، ۲۰۲۵a)، در کنار عوامل اجتماعی و عدم اعتماد مصرف‌کنندگان به پایداری سیستم‌ها (مهن و همکاران، ۲۰۲۴)، مانع از شکل‌گیری یک بازار پویا برای این فناوری در ایران شده است. به گونه‌ای که حتی سیاست‌های حمایتی موجود نیز نتوانسته‌اند انگیزه کافی برای سرمایه‌گذاری بخش خانگی ایجاد کنند (نادری مهدی و محمودیان، ۲۰۱۶).

^۱ Solar Home Systems (SHS)

برای تحلیل این گونه مسائل پیچیده چندبعدی، استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره فازی بسیار کارآمد است. در این میان، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) ابزاری دقیق برای تعیین وزن موانع با در نظر گرفتن عدم قطعیت های قضاوت خبرگان ارائه می دهد (چانگ، ۱۹۹۶). از سوی دیگر، روش نوین مارکوس فازی (Fuzzy MARCOS) به عنوان یک ابزار قدرتمند، امکان رتبه بندی راهکارهای عملی را بر اساس سنجش فاصله گزینه ها از نقاط ایده آل و ضدایده آل فراهم می سازد (حاجی پور و شهرکی، ۲۰۲۵).

اگرچه برخی پژوهش ها راهکارهایی مانند اصلاح سیاست های حمایتی و توسعه مدل های مالی را پیشنهاد کرده اند، اما اولویت بندی تحلیلی و مبتنی بر چارچوب یکپارچه فازی در بستر ایران محدود است. با وجود اهمیت موضوع، مرور ادبیات پژوهش نشان می دهد که بیشتر مطالعات پیشین به بررسی کیفی و کلی موانع توسعه انرژی های تجدیدپذیر پرداخته اند و پژوهش های محدودی به طور خاص به مدل سازی موانع نفوذ بازار سیستم های خورشیدی خانگی (SHS) و رتبه بندی راهکارهای عملی در بستر اقتصادی-نهادی ایران پرداخته اند. شکاف پژوهشی اصلی در اینجا، نبود یک چارچوب تحلیلی یکپارچه فازی (ترکیب دلفی فازی، FAHP فازی و مارکوس فازی) است که بتواند به صورت هم زمان، موانع کلیدی نفوذ بازار را شناسایی، وزن دهی و راهکارهای عبور از آن ها را اولویت بندی کند. این پژوهش درصدد پر کردن این شکاف ساختاری در بازار انرژی ایران است.

بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی و مدل سازی موانع کلیدی نفوذ سیستم های خورشیدی خانگی در بازار ایران و اولویت بندی راهکارهای عملی برای رفع آن ها با استفاده از چارچوب ترکیبی FDM-FAHP-MARCOS فازی است. در این راستا، پژوهش به دنبال پاسخگویی به این پرسش های اساسی است:

- (۱) موانع کلیدی نفوذ بازار سیستم های خورشیدی خانگی در ایران کدامند و اولویت اهمیت ابعاد و شاخص های آن ها چگونه است؟
 - (۲) اثربخش ترین راهکارهای عملی برای تسهیل نفوذ بازار این سیستم ها در ایران کدامند و اولویت اجرایی آن ها به چه صورت است؟
- در مجموع، انتظار می رود نتایج این پژوهش بتواند به سیاست گذاران، برنامه ریزان انرژی و سرمایه گذاران کمک کند تا درک بهتری از چالش های توسعه سیستم های خورشیدی خانگی داشته باشند و بر اساس یک تحلیل علمی، راهکارهای مناسب برای نفوذ این فناوری را در اولویت قرار دهند. همچنین یافته های این مطالعه می تواند به توسعه ادبیات علمی در حوزه برنامه ریزی انرژی های تجدیدپذیر و تصمیم گیری چندمعیاره کمک کند.

مبانی نظری و مرور پیشینه پژوهش

زمینه مفهومی سامانه های خورشیدی خانگی

دسترسی به انرژی پایدار و مقرون به صرفه یکی از مهم ترین پیش نیازهای توسعه اقتصادی، اجتماعی و انسانی محسوب می شود. با وجود پیشرفت های گسترده در توسعه زیرساخت های انرژی در دهه های اخیر، هنوز بخش قابل توجهی از جمعیت جهان به ویژه در مناطق روستایی و دورافتاده کشورهای در حال توسعه از دسترسی پایدار به برق محروم هستند. گزارش های بین المللی نشان می دهد که میلیون ها خانوار همچنان برای تأمین نیازهای اولیه انرژی خود به منابع سنتی مانند نفت سفید، زغال سنگ و زیست توده متکی هستند که این امر پیامدهای منفی اقتصادی، زیست محیطی و بهداشتی به همراه دارد (آژانس بین المللی انرژی، ۲۰۲۴(a)).

در چنین شرایطی، فناوری های انرژی تجدیدپذیر غیرمتمرکز به عنوان یکی از راهکارهای مهم برای کاهش شکاف دسترسی به انرژی مطرح شده اند. در میان این فناوری ها، سیستم های خورشیدی خانگی به دلیل انعطاف پذیری، قابلیت نصب در مقیاس کوچک و عدم نیاز به شبکه انتقال برق، به طور گسترده در برنامه های الکتریفیکاسیون روستایی مورد استفاده قرار گرفته اند (مارشال و همکاران، ۲۰۲۶).

سیستم‌های خورشیدی خانگی معمولاً شامل یک مازول فتوولتائیک، باتری ذخیره انرژی، کنترل‌کننده شارژ و تجهیزات مصرف‌کننده مانند چراغ‌های LED، تلویزیون یا شارژر تلفن همراه هستند. این سیستم‌ها می‌توانند خدمات انرژی پایه را برای خانوارهایی که به شبکه برق دسترسی ندارند فراهم کنند و در نتیجه کیفیت زندگی و فرصت‌های اقتصادی را بهبود بخشند (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۴b). ایران نیز به‌عنوان کشوری با گستره وسیع مناطق روستایی و تابش خورشید قابل توجه، با چالش‌های مشابهی در زمینه دسترسی پایدار به برق در برخی نواحی مواجه است. برنامه‌های محدود نصب سامانه‌های خورشیدی مستقل در برخی استان‌ها همچون سیستان و بلوچستان و کرمان اجرا شده‌اند، اما هنوز بخش قابل توجهی از ظرفیت بالقوه کشور در این زمینه بلااستفاده مانده است. بررسی دقیق موانع نفوذ این سیستم‌ها در بازار می‌تواند مسیر اجرای فراگیرتر پروژه‌های خورشیدی خانگی در ایران را هموار کند (الله یاری و همکاران، ۲۰۲۵). با وجود مزایای قابل توجه این فناوری، تجربه اجرای پروژه‌های سیستم‌های خورشیدی خانگی در کشورهای مختلف نشان می‌دهد که توسعه و گسترش این سیستم‌ها با چالش‌ها و موانع متعددی مواجه است. در برخی موارد، برنامه‌های توسعه سیستم‌های خورشیدی خانگی به دلیل مشکلات اقتصادی، فنی، نهادی یا اجتماعی نتوانسته‌اند به اهداف مورد انتظار دست یابند (جورج و گوش، ۲۰۲۶). از این رو، شناسایی و تحلیل نظام‌مند موانع نفوذ این سیستم‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

مفهوم موانع نفوذ در بازار فناوری‌های تجدیدپذیر

در ادبیات توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر، موانع به عواملی اطلاق می‌شود که مانع از پذیرش، گسترش یا بهره‌برداری مؤثر از یک فناوری می‌شوند. این موانع می‌توانند ماهیت اقتصادی، فنی، نهادی، اجتماعی یا سیاستی داشته باشند و در سطوح مختلف از مصرف‌کنندگان تا ساختارهای کلان اقتصادی و نهادی ظاهر شوند (آبب و همکاران، ۲۰۲۴).

در زمینه سیستم‌های خورشیدی خانگی، موانع نفوذ می‌توانند در مراحل مختلف چرخه عمر فناوری از طراحی و تولید تا توزیع، نصب، استفاده و نگهداری ظاهر شوند. برخی از این موانع به ویژگی‌های فناوری مربوط هستند، در حالی که برخی دیگر ناشی از شرایط اقتصادی، ساختار بازار یا چارچوب‌های سیاستی هستند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که شناسایی دقیق این موانع می‌تواند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان کمک کند تا راهکارهای مناسب برای تسهیل نفوذ فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر طراحی کنند (ثدای و همکاران، ۲۰۲۳).

چارچوب مفهومی و نظری پژوهش

چارچوب نظری این پژوهش بر این فرض استوار است که نفوذ بازار سامانه‌های خورشیدی خانگی، صرفاً تابع ویژگی‌های فنی فناوری نیست، بلکه محصول هم‌زمان نیروهای اقتصادی، فنی، خدماتی، نهادی و اجتماعی است (مارشال و همکاران، ۲۰۲۶). این نگاه با نظریه‌های پذیرش فناوری (TAM)، انتشار نوآوری‌ها (DOI) و توسعه بازار فناوری‌های پاک هم‌راستا است. نظریه‌هایی که نشان می‌دهند پذیرش یک فناوری در سطح خانوار، علاوه بر کارآمدی فنی، به استطاعت مالی مصرف‌کننده، کیفیت زنجیره خدمات پشتیبان، مشوق‌های مقرراتی و پذیرش اجتماعی بستگی دارد (دانگ و همکاران، ۲۰۲۶). بر این اساس، موانع نفوذ بازار سامانه‌های خورشیدی خانگی در این مطالعه در ۵ بُعد کلیدی مفهوم‌سازی شده‌اند: ۱. کیفیت تجهیزات، ۲. ساختار مالی و پرداخت، ۳. خدمات و پشتیبانی، ۴. ابعاد ترویجی و فناوریانه و ۵. ابعاد نهادی و اجتماعی. هر یک از این ابعاد به‌صورت متقابل بر تمایل خانوارها به سرمایه‌گذاری و ماندگاری در بازار اثرگذارند.

یکی از مهم‌ترین موانع نفوذ سیستم‌های خورشیدی خانگی، هزینه اولیه نسبتاً بالای این سیستم‌ها است. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، خانوارهای کم‌درآمد توانایی پرداخت هزینه اولیه خرید سیستم‌های خورشیدی را ندارند. این موضوع به ویژه در مناطق روستایی که درآمد خانوارها محدود است، چالش مهمی محسوب می‌شود (افاه و همکاران، ۲۰۲۵b).

علاوه بر هزینه اولیه، محدودیت دسترسی به منابع مالی و اعتباری نیز می‌تواند مانع مهمی در نفوذ سیستم‌های خورشیدی خانگی باشد. در بسیاری از مناطق، مؤسسات مالی تمایل کمتری به ارائه وام برای خرید تجهیزات انرژی تجدیدپذیر دارند، زیرا این پروژه‌ها را پرریسک تلقی می‌کنند (ماهو و همکاران، ۲۰۲۶).

در پاسخ به این چالش، برخی کشورها مدل‌های مالی نوآورانه‌ای مانند سیستم‌های پرداخت تدریجی^۱ را توسعه داده‌اند که به خانوارها امکان می‌دهد هزینه سیستم را به صورت اقساطی پرداخت کنند (آب و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، اجرای موفق این مدل‌ها نیز نیازمند زیرساخت‌های مالی و نهادی مناسب است.

در ایران نیز علی‌رغم آن که طی سال‌های اخیر برخی طرح‌های تسهیلاتی برای نصب سامانه‌های خورشیدی کوچک مقیاس آغاز شده‌اند، محدود بودن منابع مالی، نوسانات نرخ ارز و نبود مدل‌های تأمین مالی ساده و قابل اعتماد برای خانوارها همچنان از موانع اصلی محسوب می‌شود. همچنین فقدان نظام مشخص خرید تضمینی برق تولیدی خانوارها موجب کاهش انگیزه سرمایه‌گذاری در این حوزه شده است (نادری مهدی و محمودیان، ۲۰۱۶).

موانع فنی نیز نقش مهمی در محدود کردن گسترش سیستم‌های خورشیدی خانگی دارند. کیفیت پایین برخی تجهیزات، عدم استانداردسازی محصولات و ضعف در طراحی سیستم‌ها از جمله چالش‌های رایج در این حوزه هستند (لیو، ۲۰۱۸). در برخی موارد، استفاده از تجهیزات بی‌کیفیت یا طراحی نامناسب سیستم باعث کاهش عملکرد و عمر مفید سیستم می‌شود که این امر می‌تواند اعتماد کاربران به فناوری را کاهش دهد. همچنین، عدم دسترسی به خدمات تعمیر و نگهداری یکی دیگر از چالش‌های مهم در بسیاری از مناطق روستایی است (رحیمی‌راد و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات نشان می‌دهد که نبود شبکه خدمات فنی و کمبود تکنسین‌های آموزش‌دیده می‌تواند منجر به خرابی طولانی‌مدت سیستم‌ها و در نهایت کنار گذاشته شدن آن‌ها توسط کاربران شود (سلیم و ابودبوس، ۲۰۲۳).

چارچوب‌های نهادی و سیاستی نیز تأثیر قابل توجهی بر توسعه سیستم‌های خورشیدی خانگی دارند. در برخی کشورها، نبود سیاست‌های حمایتی مناسب یا عدم هماهنگی میان نهادهای مختلف می‌تواند روند نفوذ این فناوری را کند کند (آکلین و همکاران، ۲۰۱۸). برای مثال، نبود استانداردهای فنی، مقررات مشخص برای بازار تجهیزات خورشیدی یا سازوکارهای نظارتی مناسب می‌تواند باعث ورود محصولات بی‌کیفیت به بازار شود. همچنین، عدم وجود سیاست‌های حمایتی مانند یارانه‌ها، مشوق‌های مالیاتی یا برنامه‌های توسعه بازار می‌تواند سرمایه‌گذاری در این حوزه را محدود کند. علاوه بر این، پیچیدگی فرآیندهای اداری و بوروکراتیک نیز می‌تواند مانع ورود شرکت‌های خصوصی به بازار سیستم‌های خورشیدی خانگی شود (مصطفی، ملیک و مقسوم، ۲۰۲۴). در کشور ایران نیز پراکندگی وظایف میان نهادهای مختلف از جمله شرکت توانیر، ساتبا، وزارت نیرو و شهرداری‌ها و نبود نظام یکپارچه حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر، اجرای طرح‌های خورشیدی خانگی را با چالش جدی مواجه ساخته است. علاوه بر این، نبود قوانین شفاف برای اتصال سیستم‌های خانگی به شبکه و رویه‌های اداری طولانی از موانع نهادی مهم در بازار ایران محسوب می‌شود (حسینجانی‌زاده و قانندی، ۲۰۱۸).

^۱ Pay-As-You-Go

عوامل اجتماعی و رفتاری نیز نقش مهمی در پذیرش یا عدم پذیرش فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر دارند. سطح آگاهی پایین کاربران درباره مزایا و نحوه استفاده از سیستم‌های خورشیدی خانگی می‌تواند مانع مهمی در گسترش این فناوری باشد (افاه و همکاران، ۲۰۲۵b). در برخی موارد، کاربران انتظارات غیرواقعی از عملکرد سیستم دارند و در صورت عدم تحقق این انتظارات ممکن است از استفاده از فناوری منصرف شوند. همچنین، عوامل فرهنگی و اجتماعی نیز می‌توانند بر نگرش افراد نسبت به فناوری‌های جدید تأثیر بگذارند. مطالعات نشان داده‌اند که آموزش کاربران، افزایش آگاهی عمومی و مشارکت جامعه محلی می‌تواند نقش مهمی در کاهش این موانع ایفا کند (سلیم و السیوف، ۲۰۲۰). در ایران نیز مطالعات میدانی نشان می‌دهد که سطح آگاهی عمومی نسبت به عملکرد و صرفه‌جویی مالی بلندمدت سیستم‌های خورشیدی هنوز پایین است و بسیاری از خانوارها به دلیل تجربه محدود در پروژه‌های مشابه، نگرانی‌هایی درباره اعتمادپذیری و هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات دارند. برای نمونه، (کریم‌زاده و صالحی، ۲۰۲۲) در یک مطالعه کمی در روستاهای استان مازندران نشان دادند که میزان تمایل به نصب پنل‌های خورشیدی در میان روستاییان نسبتاً پایین است و تنها بخش محدودی از پاسخگویان قصد پذیرش این فناوری را در آینده نزدیک دارند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عوامل اجتماعی و ادراکی، به‌ویژه سهولت مصرف درک‌شده، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری قصد رفتاری خانوارها برای پذیرش سیستم‌های خورشیدی ایفا می‌کنند.

پیشینه تجربی پژوهش

مروور نظام‌مند شواهد تجربی نشان می‌دهد که نفوذ بازار سامانه‌های خورشیدی خانگی در کشورهای در حال توسعه با چالش‌های نسبتاً مشابهی روبه‌رو است. در بعد بین‌المللی، پژوهش‌های افاه و همکاران (۲۰۲۵b) و موسیکا و همکاران (۲۰۲۲) تایید می‌کنند که محدودیت‌های مالی و بالا بودن مبالغ پیش‌پرداخت، اصلی‌ترین سد ورود خانوارهای کم‌درآمد به بازار فناوری‌های خورشیدی است. از سوی دیگر، مطالعات سلیم و ابودبوس (۲۰۲۳) و انگویا (۲۰۲۲) نشان داده‌اند که فقدان شبکه خدمات پس از فروش استاندارد در مناطق دورافتاده، ریسک پذیرش فناوری را افزایش داده و در بلندمدت منجر به خروج مصرف‌کنندگان از بازار می‌شود. در ایران نیز، هرچند پژوهش‌هایی به بررسی عمومی انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته‌اند، اما تمرکز بر بازار خانگی محدود بوده است. نادری مهدی و محمودیان (۲۰۱۶) و جامی اودولو و یزدانی (۲۰۲۱) در مطالعات محلی خود نشان دادند که ضعف آگاهی عمومی و فقدان تسهیلات بانکی ارزان‌قیمت مانع استقبال خانوارها می‌شود. در بعد ساختاری و گذار انرژی نیز، رحیمی‌راد و همکاران (۲۰۱۸) و حسینجانی‌زاده و قائدی (۲۰۱۸) بوروکراسی اداری ناشی از پراکندگی نهادی (میان وزارت نیرو، ساتبا و توانیر) و سلطه رژیم سوخت‌های فسیلی یارانه‌ای را به عنوان موانع کلیدی توسعه این بازار معرفی کرده‌اند مطالعه غمخواری و پورعلی‌گنجی (۱۴۰۲) بر روی مشتریان برق خورشیدی خانگی شهر یزد نشان داد که مؤلفه‌های مدل پذیرش فناوری و متغیرهای رفتاری نظیر سودمندی درک‌شده، سهولت استفاده، اعتماد، لذت و نفوذ اجتماعی، از طریق نگرش مصرف‌کننده بر قصد استفاده اثر گذارند. از این رو، پذیرش سامانه‌های خورشیدی خانگی صرفاً تابع ملاحظات فنی و اقتصادی نبوده و دارای ابعاد ادراکی-رفتاری نیز هست. با این حال، اکثر این مطالعات کیفی بوده یا موانع را به صورت تک‌بعدی تحلیل کرده‌اند. خلأ تجربی موجود، نبود یک ارزیابی و اولویت‌بندی کمی و هم‌زمان روی موانع و راهکارهای نفوذ بازار سامانه‌های خورشیدی خانگی با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری فازی است که پژوهش حاضر در پی پوشش آن است.

روش تدوین فهرست اولیه موانع از ادبیات

به منظور تدوین فهرست اولیه موانع نفوذ سامانه‌های خورشیدی خانگی، یک مرور هدفمند ادبیات در پایگاه‌های علمی معتبر خارجی شامل ScienceDirect، Web of Science، Scopus و Google Scholar و پایگاه‌های داخلی مانند میپران و SID انجام شد. جست‌وجو با استفاده از کلیدواژه‌هایی نظیر سیستم خورشیدی خانگی Solar Home Systems، موانع barriers، پذیرش adoption، نفوذ بازار market penetration، انرژی تجدیدپذیر renewable energy، برق‌رسانی روستایی rural electrification و معادل‌های ترکیبی آن‌ها در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۶ (۱۳۹۶-۱۴۰۵) صورت گرفت. پس از حذف مطالعات نامرتبط، تکراری و غیرمتمرکز بر سامانه‌های خورشیدی خانگی، مقالات و گزارش‌های مرتبط به صورت تحلیلی بررسی شدند. در ادامه، موانع گزارش شده در منابع منتخب استخراج، موارد هم‌پوشان ادغام و در نهایت در پنج طبقه اصلی شامل موانع فنی و کیفیت تجهیزات، موانع مالی و اقتصادی، موانع خدمات و پشتیبانی، موانع ترویجی و فناوریانه و موانع نهادی و اجتماعی دسته‌بندی شدند. بر این اساس، جدول ۱ نه یک فهرست اقتباسی از یک منبع واحد، بلکه خروجی تلفیق و کدگذاری نظام‌مند ادبیات پیشین است. لازم به ذکر است که هر مانع ممکن است در بیش از یک منبع گزارش شده باشد. با این حال، به منظور جلوگیری از حجیم شدن جدول، تنها یک یا چند منبع نمونه برای هر مانع ارائه شده است.

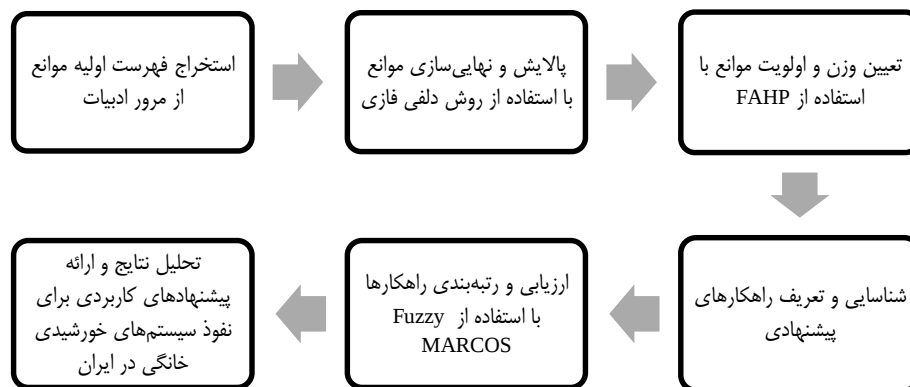
جدول ۱: فهرست اولیه موانع نفوذ بازار سامانه‌های خورشیدی خانگی مستخرج از مرور ادبیات پژوهش

موانع	طبقه	منبع نمونه
۱. عملکرد پایین پنل‌ها در شرایط گرد و غبار	موانع فنی و کیفیت تجهیزات	(افاه و همکاران، ۲۰۲۵)
۲. خرابی سریع باتری‌ها و کاهش ظرفیت ذخیره		(ریگو و همکاران، ۲۰۲۰)
۳. فقدان استاندارد ملی برای کیفیت تجهیزات خانگی خورشیدی		(حسینجانی‌زاده و قائدی، ۲۰۱۸)
۴. نبود نظام نظارت فنی بر شرکت‌های نصاب		(سلیم و ابودبوس، ۲۰۲۳)
۵. پایین بودن کیفیت قطعات وارداتی و جایگزین		(قاضی‌نوری و همکاران، ۲۰۲۵)
۶. فرسودگی سریع اتصالات و کابل‌ها در شرایط آب‌وهوایی سخت		(انگویا، ۲۰۲۲)
۷. نبود خدمات نگهداری دوره‌ای		(افاه و همکاران، ۲۰۲۵)
۸. خرابی منظم لوازم جانبی (لامپ، شارژکننده‌ها و ...)		(اسلام و اسلام، ۲۰۱۷)
۹. عدم ارائه خدمات پس از گارانتی		(مارشال و همکاران، ۲۰۲۶)
۱۰. راندمان پایین سیستم در فصول سرد یا ابری		(آب و همکاران، ۲۰۲۴)
۱۱. نبود مراکز تست و پایش عملکرد تجهیزات		(افاه و همکاران، ۲۰۲۵)
۱۲. کمبود فناوری بومی برای بهبود تطبیق با شرایط اقلیم ایران	موانع مالی و اقتصادی	(رحیمی‌راد و همکاران، ۲۰۱۸)
۱۳. قیمت بالای اولیه سیستم‌های خانگی خورشیدی		(موسیکا و همکاران، ۲۰۲۲)
۱۴. پیش‌پرداخت زیاد برای خرید یا نصب		(ریگو و همکاران، ۲۰۲۰)
۱۵. نبود مدل‌های تأمین مالی ساده مانند اقساط بلندمدت		(سلیم و ابودبوس، ۲۰۲۳)
۱۶. نرخ بهره بالای وام‌ها		(موسیکا و همکاران، ۲۰۲۲)
۱۷. فشرده‌گی دوره بازپرداخت و اقساط سنگین		(اسلام و اسلام، ۲۰۱۷)
۱۸. نبود طرح‌های یارانه‌ای پایدار دولتی		(مولپو و همکاران، ۲۰۲۶)
۱۹. هزینه‌های جانبی پنهان (نصب، حمل، تعمیرات)		(موسیکا و همکاران، ۲۰۲۲)
۲۰. نوسانات نرخ ارز که قیمت تجهیزات را ناپایدار می‌سازد		(سلیم و ابودبوس، ۲۰۲۳)
۲۱. نبود بیمه یا تضمین بازگشت سرمایه برای مصرف‌کنندگان		(ریگو و همکاران، ۲۰۲۰)
۲۲. ضعف سیستم اجاره یا لیزینگ خورشیدی		(موسیکا و همکاران، ۲۰۲۲)
۲۳. نبود انگیزه مالی برای شرکت‌های بخش خصوصی در مناطق کم‌درآمد	موانع خدمات و پشتیبانی	(مولپو و همکاران، ۲۰۲۶)
۲۴. نبود سیاست‌های تشویقی برای واردکنندگان تجهیزات باکیفیت		(نادری مهدی و محمودیان، ۲۰۱۶)
۲۵. نبود شبکه خدمات پس از فروش در مناطق دورافتاده		(انگویا، ۲۰۲۲)
۲۶. نبود تکنسین‌های محلی آموزش‌دیده		(اسلام و اسلام، ۲۰۱۷)
۲۷. تأخیر طولانی در تعمیر یا تعویض تجهیزات		(سلیم و ابودبوس، ۲۰۲۳)
۲۸. عدم تمایل شرکت‌ها به تعمیر اقلام گران قیمت		(موسیکا و همکاران، ۲۰۲۲)
۲۹. ابهام یا فقدان اطلاع‌رسانی درباره یارانه‌ها و تسهیلات دولتی		(ریگو و همکاران، ۲۰۲۰)
۳۰. الزام به پرداخت اجاره یا هزینه بهره‌برداری پس از مالکیت		(آب و همکاران، ۲۰۲۴)
۳۱. رفتار نامناسب یا فشار در وصول اقساط		(قاضی‌نوری و همکاران، ۲۰۲۵)
۳۲. ضعف نظارت بر عملکرد شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات		(سلیم و ابودبوس، ۲۰۲۳)
۳۳. نبود سامانه پاسخگویی یا ثبت شکایات کاربران		(انگویا، ۲۰۲۲)
۳۴. کمبود قطعات یدکی قابل دسترس در سطح شهرستان‌ها		(قاضی‌نوری و همکاران، ۲۰۲۵)
۳۵. سطح پایین آگاهی عمومی درباره مزایای سیستم خانگی خورشیدی		(مارشال و همکاران، ۲۰۲۶)
۳۶. فقدان برنامه‌های آموزشی درباره نصب و استفاده		(نادری مهدی و محمودیان، ۲۰۱۶)

منبع نمونه	طبقه	موانع
(آب و همکاران، ۲۰۲۴)	موانع ترویج، ارتباطات و فناوری	۳۷. فقدان تبلیغات مؤثر از سوی دولت و شرکت‌ها
(موسیکا و همکاران، ۲۰۲۲)		۳۸. ضعف پروژه‌های پابلوت نمایشی در مناطق نمونه
(قاضی‌نوری و همکاران، ۲۰۲۵)		۳۹. عدم معرفی فناوری‌های جدید یا کارآمدتر در بازار ایران
(اسلام و اسلام، ۲۰۱۷)		۴۰. تأخیر در ورود تکنولوژی‌های مکمل (مثلاً باتری‌های لیتیومی یا سیستم‌های ترکیبی)
(سلیم و ابودبوس، ۲۰۲۳)	موانع نهادی و اجتماعی	۴۱. نبود برنامه‌های تحقیق و توسعه منظم در انرژی خورشیدی خانگی
(حسینجانی‌زاده و قائدی، ۲۰۱۸)		۴۲. نبود همکاری دانشگاه‌ها و شرکت‌های خصوصی در توسعه طراحی‌های بومی
(قاضی‌نوری و همکاران، ۲۰۲۵)		۴۳. نیاز به تأیید تصمیم‌گیر اصلی خانواده برای خرید سیستم
(سلیم و ابودبوس، ۲۰۲۳)		۴۴. محدودیت‌های فنی ساختمان (مساحت بام، زاویه نصب و ...)
(آب و همکاران، ۲۰۲۴)		۴۵. نگرانی از ریسک فناوری نوظهور و عدم اعتماد در بازار
(مارشال و همکاران، ۲۰۲۶)		۴۶. محدودیت توان بازپرداخت اقساط در مشاغل فصلی یا کم‌درآمد
(حسینجانی‌زاده و قائدی، ۲۰۱۸)		۴۷. نبود هماهنگی میان نهادهای دولتی (توانیر، ساتبا، شرکت توزیع)
(نادری مهدی و محمودیان، ۲۰۱۶)		۴۸. نبود سیاست بلندمدت و هماهنگ برای گسترش انرژی خورشیدی در برنامه ملی

روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی و از نظر روش، توصیفی-تحلیلی مبتنی بر رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (FCDM) است. هدف اصلی این مطالعه، شناسایی و اولویت‌بندی موانع کلیدی نفوذ در بازار سامانه‌های خورشیدی خانگی و همچنین رتبه‌بندی راهکارهای عملی برای تسهیل نفوذ این سیستم‌ها در بازار ایران است. بدین منظور، از یک چارچوب ترکیبی سه‌گانه شامل دلفی فازی (FDM)، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) و روش مارکوس فازی (F-MARCOS) استفاده شده است. شکل ۱ فرآیند کلی و گام‌به‌گام اجرای پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱: خلاصه مراحل اجرای پژوهش

در گام نخست، بر اساس مرور ادبیات و مطالعات پیشین، فهرستی اولیه از موانع توسعه سیستم‌های خورشیدی خانگی استخراج شد. سپس این فهرست با استفاده از روش دلفی فازی و با بهره‌گیری از نظرات هفت خبره حوزه انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر مورد ارزیابی قرار گرفت تا موانع کلیدی و مورد توافق متخصصان مشخص شود. در گام بعدی، اهمیت نسبی موانع نهایی با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی تعیین گردید. در نهایت، مجموعه‌ای از راهکارهای پیشنهادی برای رفع یا کاهش این موانع با بهره‌گیری از روش مارکوس فازی ارزیابی و رتبه‌بندی شد.

جامعه آماری و فرآیند انتخاب خبرگان (پنل دلفی)

انتخاب خبرگان در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بر اساس نمونه‌گیری غیرتصادفی هدفمند (قضاوت‌محور) انجام می‌شود. از آنجا که کیفیت خروجی این روش‌ها مستقیماً به دانش تخصصی مشارکت‌کنندگان وابسته است، فرآیند شناسایی و انتخاب اعضای پنل در این پژوهش طی سه مرحله زیر صورت گرفت:

شناسایی اولیه (مبتنی بر تنوع نقش‌ها): فهرستی از متخصصان فعال در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر ایران (شامل بخش‌های دانشگاهی، سیاست‌گذاری دولتی در ساتبا، توانیر و بخش خصوصی/مجریان صنعتی) تهیه شد.

ارزیابی صلاحیت علمی و تجربی (ماتریس ارزیابی): برای انتخاب نهایی، داشتن حداقل مدرک کارشناسی ارشد، حداقل ۱۰ سال سابقه کار اجرایی یا پژوهشی مرتبط در حوزه انرژی‌های خورشیدی و انتشار حداقل یک مقاله علمی یا ثبت یک پروژه صنعتی خورشیدی به عنوان معیارهای ورود در نظر گرفته شد.

دعوت و تشکیل پنل نهایی: در نهایت، با توجه به نرخ پاسخ‌دهی و تمایل به همکاری، پنلی متشکل از ۷ خبره ارشد تشکیل شد.

جدول ۲ مشخصات دموگرافیک و شاخص‌های صلاحیت حرفه‌ای اعضای این پنل را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات و صلاحیت حرفه‌ای پنل خبرگان پژوهش

کد خبره	مدرک تحصیلی	حوزه تخصصی	سابقه (سال)	نوع سازمان/نهاده	شاخص کلیدی صلاحیت
۱	دکتری	مهندسی انرژی و سیستم‌ها	۱۵	دانشگاهی (عضو هیئت علمی)	پژوهشگر ارشد حوزه اقتصاد انرژی و مدل‌سازی تجدیدپذیرها
۲	دکتری	سیاست‌گذاری انرژی	۱۲	بخش دولتی (ساتبا)	کارشناس ارشد تدوین دستورالعمل نیروگاه‌های انشعابی
۳	کارشناسی ارشد	مهندسی برق (فتوولتائیک)	۱۸	بخش خصوصی	مدیر پروژه شرکت مشاور و مجری نیروگاه خورشیدی خانگی
۴	دکتری	مهندس مکانیک (انرژی خورشیدی)	۱۱	دانشگاهی (عضو هیئت علمی)	طراح سیستم‌های حرارتی و فتوولتائیک و بهینه‌سازی انرژی
۵	دکتری	مدیریت پروژه و ساخت	۱۳	بخش خصوصی (پیمانکار)	مجری پروژه‌های تامین تجهیزات و نصب پنل‌های خورشیدی حمایتی
۶	کارشناسی ارشد	مهندسی صنایع (سیستم انرژی)	۱۰	بخش دولتی (توانیر)	کارشناس توزیع برق و اتصال نیروگاه‌های مقیاس کوچک به شبکه
۷	دکتری	اقتصاد محیط‌زیست	۱۴	دانشگاهی/پژوهشی	تحلیل‌گر مالی و ارزیاب اقتصادی طرح‌های توجیهی انرژی پاک

در ادبیات روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (FCDM)، تمرکز بر عمق تخصص و روایی قضاوت‌ها است، نه حجم جامعه آماری. بر اساس مطالعات مرجع (نظیر سو و سانفوررد، ۲۰۰۷) در روش دلفی فازی زمانی که خبرگان از همگنی بالا و تخصص عمیق برخوردار باشند، تشکیل پنلی بین ۵ تا ۱۰ نفر برای دستیابی به اجماع معتبر علمی کاملاً کافی و بهینه است. برخلاف دلفی سنتی که نیازمند دورهای متعدد تکرار با حجم نمونه بزرگ است، ورود منطق فازی در دلفی (FDM) به علت مدل‌سازی دقیق ابهام ذهن انسان، نیاز به پنل‌های بزرگ مستعد فرسودگی را از بین برده و پایداری نتایج را با حجم نمونه کوچک‌تر تضمین می‌کند.

شایان ذکر است سیستم‌های انرژی خورشیدی خانگی در بازار ایران در یک اتمسفر با عدم قطعیت بالا فعالیت می‌کنند. این عدم قطعیت‌ها از سه منبع اصلی ناشی می‌شوند که متدولوژی فازی انتخاب‌شده در این پژوهش، آن‌ها را به صورت زیر کنترل می‌کند:

ابهام در قضاوت انسانی (عدم قطعیت ذهنی): خبرگان در بیان ترجیحات خود با محدودیت‌های شناختی مواجه‌اند. استفاده از متغیرهای زبانی (مانند «زیاد»، «متوسط») به جای مقادیر قطعی، به خبرگان اجازه می‌دهد بازه‌های خاکستری ذهن خود را مدل کنند.

عدم قطعیت‌های کلان اقتصادی و سیاست‌گذاری در ایران: نوسانات شدید نرخ ارز، تغییرات ناگهانی تعرفه‌های خرید تضمینی برق و نوسان در زنجیره تامین تجهیزات وارداتی، ارزش‌گذاری عددی قطعی موانع را ناممکن می‌کند. تبدیل مقیاس‌های کیفی به اعداد فازی مثلی باعث می‌شود کران‌های پایین و بالای این ریسک‌ها در تحلیل نهایی مشارکت داده شوند.

تعدد معیارهای متناقض: همپوشانی ابعاد اقتصادی و فنی در پذیرش فناوری منجر به بروز ارباب در وزن‌دهی می‌شود. استفاده از بررسی نرخ ناسازگاری فازی در روش FAHP تضمین‌کننده پایداری منطقی قضاوت‌هاست.

در ادامه به ترتیب تکنیک‌های دلفی فازی، فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی و مارکوس فازی تشریح خواهد شد.

روش دلفی فازی

روش دلفی فازی برای دستیابی به اجماع خبرگان در شرایط عدم قطعیت و استفاده از قضاوت‌های زبانی به کار می‌رود (احسانی و زاهدی، ۲۰۲۶). در این پژوهش، خبرگان میزان اهمیت هر مانع را با استفاده از مقیاس‌های زبانی ارزیابی کردند که به اعداد فازی مثلی به صورت جدول ۳ تبدیل شدند.

جدول ۳: مقیاس‌های زبانی و اعداد فازی دلفی

قضاوت زبانی	بسیار کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد
عدد فازی مثلی	(0.0, 0.0, 0.25)	(0.0, 0.25, 0.5)	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.5, 0.75, 1.0)	(0.75, 1.0, 1.0)

اگر نظر خبره i برای یک مانع به صورت عدد فازی رابطه ۱ باشد،

$$\tilde{A}_i = (l_i, m_i, u_i) \quad \text{رابطه ۱}$$

میانگین فازی نظرات خبرگان به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\tilde{A} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} \right) \quad \text{رابطه ۲}$$

سپس برای تصمیم‌گیری نهایی، مقدار فازی با رابطه ۳ به عدد قطعی تبدیل می‌شود.

$$A = \frac{l + m + u}{3} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این پژوهش، موانعی که مقدار غیرفازی سازی شده آن‌ها بزرگ‌تر یا مساوی مقدار آستانه تعیین شده باشد، پذیرفته شده و سایر موانع حذف شدند. خروجی این مرحله، مجموعه موانع نهایی مورد استفاده در تحلیل‌های بعدی است.

روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP)

برای تعیین اهمیت نسبی موانع نهایی، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی استفاده شد. این روش با بهره‌گیری از مقایسات زوجی فازی، امکان مدل‌سازی عدم قطعیت در قضاوت‌های انسانی را فراهم می‌کند (چانگ، ۱۹۹۶). در این پژوهش، ساختار سلسله‌مراتبی شامل هدف، ابعاد اصلی و موانع به صورت جدول ۴ تعریف گردید.

جدول ۴: مقیاس مقایسات زوجی فازی

کاملاً مهم‌تر	خیلی مهم‌تر	مهم‌تر	کمی مهم‌تر	اهمیت برابر	قضاوت زبانی
(7, 9, 9)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)	(1, 1, 1)	عدد فازی مثلثی

ماتریس مقایسه زوجی فازی به صورت رابطه ۴ تشکیل می‌شود.

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}] \quad \text{رابطه ۴}$$

در این پژوهش، برای محاسبه وزن‌ها از روش تحلیل گستره‌ای چانگ^۱ استفاده شد. در نهایت، وزن‌های فازی با فرمول ۵ محاسبه و به مقادیر قطعی تبدیل شدند.

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad \text{رابطه ۵}$$

به منظور بررسی پایایی قضاوت‌های خبرگان، نرخ ناسازگاری به صورت زیر محاسبه شد.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در صورت $CR < 0.1$ ماتریس مقایسه زوجی قابل قبول در نظر گرفته شد (چانگ، ۱۹۹۶).

روش مارکوس فازی (Fuzzy MARCOS)

روش مارکوس یکی از روش‌های نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره است که گزینه‌ها را بر اساس میزان مطلوبیت آن‌ها نسبت به راه‌حل ایده‌آل و ضدایده‌آل ارزیابی می‌کند (استویک و همکاران، ۲۰۲۰). در این پژوهش، گزینه‌ها شامل راهکارهای پیشنهادی برای کاهش موانع نفوذ سیستم‌های خورشیدی خانگی هستند و معیارها همان موانع شناسایی شده در مراحل قبل می‌باشند. وزن معیارها نیز از طریق روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به دست آمده است.

^۱ Chang's extent analysis

گام ۱: تشکیل ماتریس تصمیم فازی

در ابتدا ماتریس تصمیم فازی بر اساس ارزیابی خبرگان تشکیل می‌شود. اگر تعداد گزینه‌ها برابر m و تعداد معیارها برابر n باشد، ماتریس تصمیم فازی به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود.

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن $\tilde{x}_{ij}$ به صورت رابطه ۸ محاسبه شده و نشان‌دهنده مقدار فازی مثلثی عملکرد گزینه i نسبت به معیار j است.

$$\tilde{x}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) \quad \text{رابطه ۸}$$

گام ۲: تعیین راه‌حل ایده‌آل و ضدایده‌آل

در این مرحله دو گزینه مرجع به ماتریس تصمیم اضافه می‌شوند. راه‌حل ایده‌آل (AI) و راه‌حل ضدایده‌آل (AAI) است که برای معیارهای سود با روابط ۹ و ۱۰ و برای معیارهای هزینه با روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شوند.

$$AI_j = \max_i(\tilde{x}_{ij}) \quad \text{رابطه ۹}$$

$$AAI_j = \min_i(\tilde{x}_{ij}) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$AI_j = \min_i(\tilde{x}_{ij}) \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$AAI_j = \max_i(\tilde{x}_{ij}) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

پس از این مرحله، ماتریس تصمیم به شکل توسعه یافته شامل گزینه‌های واقعی و دو گزینه مرجع خواهد بود.

گام ۳: نرمال سازی ماتریس تصمیم:

برای قابل مقایسه شدن مقادیر، ماتریس تصمیم نرمال سازی می‌شود. که برای معیارهای سود از رابطه ۱۳ و برای معیارهای هزینه از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$\tilde{n}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{ij}}{\tilde{x}_{AI,j}} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$\tilde{n}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{AAI,j}}{\tilde{x}_{ij}} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

در نتیجه ماتریس نرمال فازی به صورت رابطه ۱۵ به دست می‌آید.

$$\tilde{N} = [\tilde{n}_{ij}] \quad \text{رابطه ۱۵}$$

گام ۴: تشکیل ماتریس نرمال وزن دار:

در این مرحله مقادیر نرمال به صورت رابطه ۱۶ در وزن معیارها ضرب می‌شوند.

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{n}_{ij} \times w_j \quad \text{رابطه ۱۶}$$

که در آن، w_j وزن معیار j است (به دست آمده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی) و ماتریس وزن دار به صورت رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود.

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}] \quad \text{رابطه ۱۷}$$

گام ۵: محاسبه مقدار مطلوبیت گزینه‌ها: برای هر گزینه مقدار مطلوبیت نسبت به راه‌حل‌های مرجع محاسبه می‌شود. ابتدا مجموع عناصر هر سطر به صورت رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود.

$$S_i = \sum_{j=1}^n \tilde{v}_{ij} \quad \text{رابطه ۱۸}$$

سپس نسبت مطلوبیت گزینه i نسبت به راه‌حل ضدایده‌آل و ایده‌آل به ترتیب به صورت روابط ۱۹ و ۲۰ محاسبه می‌شود:

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{AAI}} \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$K_i^+ = \frac{S_i}{S_{AI}} \quad \text{رابطه ۲۰}$$

گام ۶: محاسبه تابع مطلوبیت نهایی
تابع مطلوبیت نهایی هر گزینه بر اساس مقادیر فوق به صورت رابطه ۲۱ محاسبه می‌شود.

$$f(K_i) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \quad \text{رابطه ۲۱}$$

گام ۷: رتبه‌بندی گزینه‌ها

در نهایت گزینه‌ها بر اساس مقدار تابع مطلوبیت $f(K_i)$ رتبه‌بندی می‌شوند. گزینه‌ای که مقدار بزرگ‌تری از تابع مطلوبیت داشته باشد، دارای اولویت بالاتری در میان گزینه‌ها خواهد بود. برای این مقاله از یک مقیاس پنج سطحی بسیار رایج در مقالات مارکوس فازی به شرح جدول ۵ استفاده شد.

جدول ۵: مقیاس زبانی ارزیابی گزینه‌ها در روش مارکوس فازی

قضاوت زبانی	بسیار ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	بسیار خوب
عدد فازی مثلثی	(1, 1, 3)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(7, 9, 9)

در این مقیاس، ارزیابی عملکرد هر گزینه نسبت به هر معیار به صورت رابطه ۲۲ یک عدد فازی مثلثی تعریف می‌شود:

$$\tilde{x}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) \quad \text{رابطه ۲۲}$$

که در آن l_{ij} حد پایین مقدار فازی، m_{ij} مقدار محتمل، u_{ij} حد بالای مقدار فازی است و نشان‌دهنده ارزیابی عملکرد گزینه i نسبت به معیار j می‌باشد. استفاده از این مقیاس زبانی باعث می‌شود قضاوت‌های ذهنی خبرگان به صورت کمی مدل‌سازی شده و عدم قطعیت موجود در ارزیابی‌ها در تحلیل لحاظ گردد (پاموچار، استویچ و اسرمک، ۲۰۲۱).

نتایج

دلفی فازی

در این پژوهش، برای پالایش موانع استخراج شده از ادبیات از روش دلفی فازی استفاده شد. در گام نخست، فهرستی شامل ۴۸ مانع بالقوه در پنج بعد اصلی (فنی، مالی، خدماتی، ترویجی و نهادی) از مرور ادبیات استخراج گردید. سپس این فهرست برای ارزیابی اهمیت هر مانع در اختیار پنل خبرگان قرار گرفت. خبرگان اهمیت هر مانع را با استفاده از مقیاس زبانی پنج سطحی ارزیابی کردند. هر ارزیابی خبرگان به یک عدد فازی مثلثی تبدیل شد. برای هر مانع، میانگین فازی نظرات خبرگان محاسبه شد و برای تبدیل مقدار فازی به مقدار قطعی از روش مرکز سطح استفاده شد. از آنجایی که در بسیاری از مطالعات دلفی فازی، مقدار ۰/۵ به عنوان آستانه پذیرش در نظر گرفته می شود. بنابراین اگر $S_i \geq 0.5$ مانع پذیرفته می شود. در غیر این صورت، مانع حذف می شود. نتایج نهایی این بخش در قالب جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶: نتایج دلفی فازی برای غربالگری موانع نفوذ سیستم های خورشیدی خانگی

وضعیت	مقدار قطعی	U	m	L	مانع
پذیرفته	0.78	0.92	0.79	0.62	عملکرد پایین پنل ها در شرایط گرد و غبار
پذیرفته	0.82	0.94	0.84	0.68	خرابی سریع باتری ها
حذف	0.47	0.62	0.46	0.33	فقدان استاندارد ملی تجهیزات
پذیرفته	0.57	0.71	0.57	0.42	نبود نظارت بر شرکت های نصاب
پذیرفته	0.75	0.88	0.76	0.61	کیفیت پایین قطعات وارداتی
حذف	0.45	0.60	0.45	0.31	فرسودگی سریع کابل ها
پذیرفته	0.73	0.87	0.73	0.58	نبود خدمات نگهداری دوره ای
پذیرفته	0.77	0.91	0.78	0.63	خرابی لوازم جانبی
پذیرفته	0.81	0.93	0.82	0.67	عدم ارائه خدمات پس از گارانتی
حذف	0.48	0.63	0.47	0.34	راندمان پایین در فصول سرد
حذف	0.50	0.65	0.49	0.36	نبود مراکز تست تجهیزات
پذیرفته	0.55	0.69	0.54	0.41	کمبود فناوری بومی
پذیرفته	0.87	0.97	0.89	0.74	قیمت بالای اولیه سیستم
پذیرفته	0.82	0.94	0.84	0.69	پیش پرداخت زیاد
پذیرفته	0.72	0.86	0.73	0.58	نبود مدل های تأمین مالی ساده
پذیرفته	0.59	0.73	0.59	0.46	نرخ بهره بالای وام ها
پذیرفته	0.77	0.90	0.77	0.63	فشاردهی دوره بازپرداخت
پذیرفته	0.61	0.75	0.61	0.48	نبود طرح های یارانه ای پایدار
پذیرفته	0.79	0.92	0.80	0.66	هزینه های جانبی پنهان
پذیرفته	0.51	0.66	0.51	0.37	نوسان نرخ ارز
پذیرفته	0.53	0.67	0.52	0.39	نبود بیمه سرمایه گذاری
حذف	0.47	0.61	0.47	0.34	ضعف سیستم لیزینگ خورشیدی
حذف	0.49	0.63	0.48	0.36	نبود انگیزه مالی برای شرکت ها
حذف	0.46	0.60	0.46	0.33	نبود سیاست تشویقی برای واردات

وضعیت	مقدار قطعی	U	m	L	مانع
پذیرفته	0.78	0.91	0.79	0.64	نبود خدمات پس از فروش در مناطق دورافتاده
پذیرفته	0.55	0.69	0.55	0.41	کمبود تکنسین‌های محلی
پذیرفته	0.76	0.89	0.76	0.62	تأخیر در تعمیر تجهیزات
پذیرفته	0.77	0.90	0.78	0.63	عدم تمایل شرکت‌ها به تعمیر اقلام گران
پذیرفته	0.75	0.88	0.75	0.61	ضعف اطلاع‌رسانی درباره یارانه‌ها
پذیرفته	0.71	0.84	0.71	0.57	الزام پرداخت اجاره پس از مالکیت
پذیرفته	0.72	0.86	0.72	0.59	رفتار نامناسب در وصول اقساط
پذیرفته	0.56	0.70	0.56	0.42	ضعف نظارت بر شرکت‌های خدماتی
حذف	0.49	0.63	0.48	0.35	نبود سامانه ثبت شکایات
پذیرفته	0.57	0.72	0.57	0.43	کمبود قطعات یدکی
پذیرفته	0.84	0.95	0.86	0.72	سطح پایین آگاهی عمومی
پذیرفته	0.60	0.74	0.60	0.47	نبود برنامه‌های آموزشی
پذیرفته	0.81	0.92	0.82	0.68	فقدان تبلیغات مؤثر
حذف	0.46	0.60	0.46	0.33	ضعف پروژه‌های پایلوت
پذیرفته	0.76	0.89	0.77	0.63	عدم معرفی فناوری‌های جدید
پذیرفته	0.71	0.85	0.71	0.58	تأخیر در ورود فناوری مکمل
پذیرفته	0.51	0.65	0.50	0.38	نبود برنامه تحقیق و توسعه
حذف	0.50	0.64	0.49	0.36	نبود همکاری دانشگاه و صنعت
پذیرفته	0.75	0.88	0.75	0.61	نیاز به تأیید تصمیم‌گیر خانواده
پذیرفته	0.72	0.86	0.72	0.58	محدودیت‌های فنی ساختمان
پذیرفته	0.76	0.89	0.77	0.63	عدم اعتماد به فناوری جدید
پذیرفته	0.80	0.93	0.81	0.67	محدودیت توان بازپرداخت
پذیرفته	0.53	0.67	0.52	0.39	نبود هماهنگی نهادی
پذیرفته	0.55	0.69	0.54	0.41	نبود سیاست ملی بلندمدت

نتایج اجرای روش دلفی فازی نشان داد که از میان ۴۸ مانع اولیه استخراج‌شده از ادبیات، تعداد ۲۳ مانع دارای اهمیت کافی از دیدگاه خبرگان بوده و به عنوان موانع کلیدی نفوذ سیستم‌های خورشیدی خانگی در بازار ایران انتخاب شدند. این موانع در پنج دسته اصلی شامل موانع کیفی و طول عمر تجهیزات، موانع مالی و ساختار پرداخت، موانع خدمات و پشتیبانی، موانع ترویج و فناوری و موانع اجرایی و اجتماعی طبقه‌بندی شدند. در ادامه پژوهش، اهمیت نسبی این موانع با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) تعیین شد.

نتایج روش FAHP

ساختار سلسله‌مراتبی تحلیل به‌صورت زیر تعریف شد. هدف (سطح ۱): تعیین اهمیت نسبی موانع نفوذ سیستم‌های خورشیدی خانگی، سطح دو شامل پنج بُعد اصلی موانع کیفیت و طول عمر تجهیزات (D1)، مالی و ساختار پرداخت (D2)، خدمات و پشتیبانی (D3)، ترویج و فناوری (D4)، اجرایی و اجتماعی (D5) و سطح سوم شامل موانع نهایی استخراج‌شده از دلفی فازی. بر اساس نظر خبرگان، مقایسات زوجی بین پنج بُعد اصلی انجام شد که در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷. ماتریس مقایسات زوجی فازی ابعاد

ابعاد	D1	D2	D3	D4	D5
D1 کیفیت	(1,1,1)	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(4,5,6)	(3,4,5)
D2 مالی	(4,5,6)	(1,1,1)	(2,3,4)	(6,7,8)	(5,6,7)
D3 خدمات	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(5,6,7)	(4,5,6)
D4 ترویج	(1/6,1/5,1/4)	(1/8,1/7,1/6)	(1/7,1/6,1/5)	(1,1,1)	(1/2,1/3,1/4)
D5 اجتماعی	(1/5,1/4,1/3)	(1/7,1/6,1/5)	(1/6,1/5,1/4)	(4,5,6)	(1,1,1)

برای هر بُعد، مقدار گستره فازی^۱ با رابطه ۲۳ محاسبه شد.

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{M}_{ij} \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{M}_{ij} \right)^{-1} \quad \text{رابطه ۲۳}$$

سپس درجه امکان پذیری با رابطه ۲۴ محاسبه شد.

$$V(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_k) \quad \text{رابطه ۲۴}$$

و در آخر وزن نرمال شده هر معیار محاسبه شد. جدول ۸ وزن فازی و قطعی ابعاد را نشان می دهد.

جدول ۸: وزن های فازی و قطعی ابعاد اصلی (FAHP)

وزن قطعی	وزن فازی (l,m,u)	بعد
0.19	(0.15 , 0.19 , 0.23)	کیفیت و طول عمر تجهیزات (D1)
0.32	(0.28 , 0.32 , 0.36)	مالی و ساختار پرداخت (D2)
0.24	(0.20 , 0.24 , 0.28)	خدمات و پشتیبانی (D3)
0.10	(0.07 , 0.10 , 0.13)	ترویج و فناوری (D4)
0.15	(0.12 , 0.15 , 0.18)	اجرایی و اجتماعی (D5)
1.00	—	مجموع

شواهد نشان می دهد موانع مالی و خدماتی بیشترین تأثیر را بر عدم نفوذ سیستم های خانگی خورشیدی در ایران دارند.

در مرحله بعد، مراحل فوق برای تمامی زیرمعیارها در هر بعد تکرار شد. به جهت رعایت حجم مطالب، مقایسات زوجی موانع مالی در جدول ۹ آورده شده است و از ارائه سایر محاسبات پرهیز شده است.

^۱ Fuzzy Synthetic Extent

جدول ۹: نمونه مقایسه زوجی موانع مالی (D2)

B17	B16	B15	B14	B13	موانع مالی
(4,5,6)	(5,6,7)	(3,4,5)	(4,5,6)	(1,1,1)	B13 قیمت اولیه بالا
(3,4,5)	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1/6,1/5,1/4)	B14 پیش پرداخت زیاد
(2,3,4)	(3,4,5)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/5,1/4,1/3)	B15 نبود مدل مالی ساده
(1,2,3)	(1,1,1)	(1/5,1/4,1/3)	(1/6,1/5,1/4)	(1/7,1/6,1/5)	B16 بهره بالای وام
(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/5,1/4,1/3)	(1/6,1/5,1/4)	B17 بازپرداخت فشرده

در نهایت وزن فازی و قطعی برای هر ۲۳ معیار نهایی به صورت جدول ۱۰ محاسبه شد.

جدول ۱۰: وزن های فازی و نهایی موانع (FAHP)

رتبه	مانع	وزن فازی (l,m,u)	وزن نهایی
1	قیمت بالای اولیه سیستم	(0.085,0.102,0.118)	0.102
2	پیش پرداخت زیاد	(0.071,0.086,0.101)	0.086
3	نبود خدمات پس از گارانتی	(0.066,0.081,0.094)	0.081
4	نبود نگهداری دوره ای	(0.060,0.074,0.087)	0.074
5	فشرده گی بازپرداخت	(0.058,0.071,0.084)	0.071
6	هزینه های جانبی پنهان	(0.054,0.068,0.081)	0.068
7	سطح پایین آگاهی عمومی	(0.049,0.061,0.073)	0.061
8	خرابی سریع باتری	(0.046,0.058,0.070)	0.058
9	نبود خدمات در مناطق دور	(0.044,0.056,0.068)	0.056
10	نبود مدل های مالی ساده	(0.041,0.053,0.064)	0.053
11	عملکرد ضعیف در گردوغبار	(0.038,0.049,0.060)	0.049
12	تاخیر در تعمیر	(0.036,0.046,0.057)	0.046
13	محدودیت توان بازپرداخت	(0.033,0.043,0.054)	0.043
14	تبلیغات ناکافی	(0.031,0.040,0.050)	0.040
15	کیفیت پایین قطعات	(0.029,0.038,0.048)	0.038
16	ضعف اطلاع رسانی یارانه ها	(0.027,0.035,0.044)	0.035
17	عدم معرفی فناوری جدید	(0.025,0.033,0.041)	0.033
18	محدودیت فنی ساختمان	(0.023,0.031,0.039)	0.031
19	کمبود فناوری بومی	(0.022,0.029,0.036)	0.029
20	نیاز به تأیید خانوادگی	(0.020,0.027,0.034)	0.027
21	تاخیر فناوری مکمل	(0.019,0.025,0.032)	0.025
22	نبود هماهنگی نهادی	(0.017,0.023,0.029)	0.023
23	نبود سیاست ملی پایدار	(0.016,0.021,0.027)	0.021

نتایج تحلیل سلسله‌مراتبی فازی نشان داد که موانع مالی و خدماتی بیشترین اهمیت را در عدم نفوذ سیستم‌های خورشیدی خانگی در ایران دارند. در سطح موانع، قیمت بالای اولیه سیستم، پیش‌پرداخت زیاد و نبود خدمات پس از گارانتی به عنوان سه مانع بحرانی شناسایی شدند. این نتایج نشان می‌دهد که چالش‌های اقتصادی و ضعف زیرساخت‌های خدماتی، بیش از محدودیت‌های فنی یا فناوریانه، مانع اصلی نفوذ سیستم‌های خانگی خورشیدی در بازار ایران هستند.

مارکوس فازی

پس از شناسایی و اولویت‌بندی موانع نفوذ در بازار برای سیستم‌های خورشیدی خانگی در ایران با استفاده از روش‌های دلفی فازی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، گام بعدی پژوهش ارائه مجموعه‌ای از راهکارهای اجرایی برای کاهش اثر این موانع است. به همین منظور، با اتکا به نتایج به‌دست‌آمده از رتبه‌بندی موانع، مرور تجربیات بین‌المللی در توسعه سیستم‌های خورشیدی خانگی (خصوصاً با تکیه بر دو منبع (بانک جهانی، ۲۰۲۳ و آژانس بین‌المللی انرژی تجدیدپذیر، ۲۰۲۳) و نیز دریافت دیدگاه‌های تکمیلی از خبرگان حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر همکار در این تحقیق، مجموعه‌ای از گزینه‌های سیاستی و اجرایی استخراج شد. این گزینه‌ها به گونه‌ای طراحی شدند که هر یک بتواند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم مهم‌ترین موانع شناسایی‌شده در مراحل پیشین، به‌ویژه موانع مالی، خدماتی، فنی و نهادی را کاهش دهد. در نتیجه، ده راهکار عملی که بیشترین قابلیت اجرا و بیشترین ارتباط با موانع اولویت‌دار داشتند، به‌عنوان گزینه‌های تصمیم برای مرحله رتبه‌بندی انتخاب شدند. در ادامه، به‌منظور تعیین میزان اثربخشی نسبی این راهکارها در تسهیل نفوذ سیستم‌های خورشیدی خانگی در ایران، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مارکوس فازی استفاده شد. ۱۰ راهکار نهایی و عملی برای تسهیل نفوذ سیستم‌های خورشیدی خانگی در ایران، به شرح زیر احصاء شد.

۱. طرح‌های "تسهیل‌گر" بازپرداخت اقساطی (بانک‌های تخصصی انرژی)
مقابله با مانع: کمبود سرمایه اولیه، بالا بودن نرخ سود بانکی، ریسک بالای بانکی.
شرح: ایجاد صندوق‌های ضمانت مشترک دولت-بانک برای اعطای وام‌های کم‌بهره با بازپرداخت طولانی مدت (مثلاً ۵ تا ۱۰ سال) مستقیماً از محل صرفه‌جویی برق مصرف‌کننده.
۲. تصویب و اجرای فوری "قانون قیمت‌گذاری تضمینی (FIT) شفاف و ثابت"
مقابله با مانع: عدم شفافیت در خرید تضمینی، نوسانات نرخ‌ها، ریسک‌های قانونی و سیاسی.
شرح: اعلام نرخ خرید برق مازاد با طولانی مدت (حداقل ۲۰ سال) و تضمین پرداخت آن بدون تاخیر، به همراه شفافیت کامل در فرمول قیمت‌گذاری برای جلب اعتماد سرمایه‌گذاران.
۳. توسعه "سرمایه‌گذاری مشارکتی" و صندوق‌های خورشیدی خرد
مقابله با مانع: ناکافی بودن سرمایه‌گذاری دولتی، عدم دسترسی خانوارها به وام کلان.
شرح: راه‌اندازی پلتفرم‌های سرمایه‌گذاری خرد که مردم بتوانند با مبالغ کم در پروژه‌های خورشیدی مشارکت کرده و از سود فروش برق سهم بگیرند (مدل‌های موفق جهانی).
۴. تأسیس "مرکز نوآوری و تست تجهیزات خورشیدی" (ایزو و استانداردسازی داخلی)
مقابله با مانع: کیفیت پایین تجهیزات، نداشتن استانداردهای ملی، ترس از خرابی.

شرح: ایجاد آزمایشگاه‌های معتمد برای تست و گواهی‌نامه‌دهی تجهیزات داخلی و وارداتی و ارائه لیست "تجهیزات تأییدشده" به بازار برای اطمینان از کیفیت و طول عمر.

۵. اجرای برنامه "آموزش و گواهی‌نامه‌دهی اجباری نصاب‌ها"

مقابله با مانع: کمبود نیروی انسانی ماهر، نداشتن مجوز، نصب‌های غیرایمن و غیرمجاز.

شرح: الزام داشتن پروانه کسب از سازمان نظام مهندسی انرژی و گذراندن دوره‌های آموزشی تخصصی برای هر نصاب و ایجاد یک پایگاه داده آنلاین برای احراز هویت نصابان مجاز.

۶. تسهیلات "نصب رایگان" یا "یارانه‌ای پنل‌های خورشیدی" برای مسکن عمومی و روستاها

مقابله با مانع: هزینه‌های اولیه بالا، عدم دسترسی محرومان، عدم آگاهی اجتماعی.

شرح: اختصاص یارانه‌های مستقیم و قطعی (نه وام) برای ساخت‌وسازهای مسکن مهر، ویلاها در مناطق روستایی و ساختمان‌های دولتی جهت ایجاد الگوی مصرف پایدار.

۷. تعمیر و نگهداری قراردادی با ارائه گارانتی تعهدی

مقابله با مانع: عدم وجود خدمات پس از فروش، خرابی‌های پیش‌بینی نشده، نبود متخصص نگهداری.

شرح: الزام به ارائه قرارداد "تضمین عملکرد" توسط تولیدکنندگان تجهیزات و تأمین کنندگان، به‌طوری‌که در صورت خرابی، هزینه تعمیر و جایگزینی بر عهده آن‌ها باشد.

۸. توسعه شبکه "نمایشگاه‌های عملی و نمونه‌های موفق"

مقابله با مانع: عدم آگاهی عمومی، ترس از ناشناخته‌ها، مقاومت فرهنگی.

شرح: ساخت ساختمان‌های نمادین (مدارس، ادارات، مساجد) با سیستم خورشیدی و بازدید رایگان از آن‌ها برای عموم مردم جهت درک عملی عملکرد و سودآوری.

۹. تسهیل "مجوزهای یک‌پارچه و آنلاین" برای نصب و انشعاب

مقابله با مانع: پیچیدگی اداری، زمان‌بر بودن اخذ مجوز، بوروکراسی دولتی.

شرح: ایجاد پورتال جامع آنلاین برای دریافت کلیه مجوزها (استعلام، انشعاب، نصب) در کمتر از ۴۸ ساعت با حذف تشریفات اداری و کاغذبازی‌های غیرضروری.

۱۰. تأسیس "صندوق تحقیق و توسعه داخلی" برای بومی‌سازی تکنولوژی

مقابله با مانع: وابستگی به واردات، تحریم‌ها، گران‌بهای بودن قطعات یدکی.

شرح: اختصاص بودجه‌های کلان برای حمایت از استارت‌آپ‌ها و شرکت‌های داخلی جهت تولید پنل‌ها، اینورترها و سیستم‌های ذخیره‌سازی (باتری) متناسب با اقلیم ایران.

برای اجرای مارکوس فازی، این راهکارها به ترتیب A1 تا A10 نام گرفته و به همراه ۲۳ معیار شناسایی شده در مرحله قبل، ماتریس تصمیم را تشکیل می‌دهند. این ماتریس در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۱: ماتریس تصمیم فازی در روش مارکوس

تخریم و قطعات یدکی	وابستگی به واردات	ناهماهنگی نهادی	زمان بر بودن مجوز	پورو کراسی اداری	بی اعتمادی عمومی	مقاومت فرهنگی	پایین بودن آگاهی	نبود مجوز نصاب	کمبود نیروی ماهر	نصب غیر اصولی	نبود استاندارد ملی	خرابی باتری	کیفیت پایین تجهیزات	دسترسی محدود خدمات	نبود تعمیر	کمبود تعمیر کار	نبود خدمات پس از فروش	ریسک سرمایه گذاری	نبود FIT شفاف	نرخ سود بانکی	پیش پرداخت زیاد	قیمت بالای اولیه	راهکار
L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M	M	M	M	H	L	H	V	V	A1
L	L	M	M	M	M	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	V	L	M	M	A2
L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M	M	M	H	H	A3
M	M	L	L	L	L	L	L	L	M	M	V	H	V	M	M	M	H	L	L	L	L	L	A4
L	L	L	L	L	L	L	L	H	V	H	M	L	M	M	M	M	M	L	L	L	L	L	A5
L	L	L	L	L	M	M	M	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M	L	M	V	V	A6
L	L	L	L	L	L	L	L	L	M	M	M	M	M	H	V	H	V	M	L	L	M	M	A7
L	L	L	L	L	H	V	V	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	A8
L	L	H	V	V	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	A9
V	V	M	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H	L	L	L	L	M	L	L	M	M	A10

مراحل مارکوس فازی با افزودن گزینه ایده آل و ضدایده آل، نرمال سازی و اعمال وزن و دیفازی کردن و محاسبه تابع مطلوبیت و درجه مطلوبیت ادامه یافت. نتایج نهایی به شرح جدول ۱۲ است.

جدول ۱۲: نتایج نهایی مارکوس فازی

رتبه	K_i	S_i	راهکار
1	0.934	0.812	A1
2	0.910	0.791	A6
3	0.884	0.768	A2
4	0.857	0.744	A7
5	0.831	0.721	A4
6	0.804	0.698	A3
7	0.766	0.664	A9
8	0.741	0.642	A10
9	0.704	0.611	A8
10	0.679	0.589	A5

نتایج روش مارکوس فازی نشان می دهد که راهکار تسهیل گر بازپرداخت اقساطی (A1) با بیشترین درجه مطلوبیت، مؤثرترین گزینه برای کاهش موانع نفوذ سیستم های خورشیدی خانگی در ایران است. این نتیجه با توجه به وزن بالای موانع مالی در مرحله فرایند تحلیل سلسله مراتب فازی قابل انتظار است. پس از آن، راهکار یارانه نصب برای روستاها و مسکن عمومی (A6) و تصویب قانون قیمت گذاری تضمینی شفاف (A2) در رتبه های دوم و سوم قرار گرفتند که بیانگر نقش کلیدی سیاست های حمایتی مالی و نهادی در تسهیل نفوذ سیستم های

خورشیدی خانگی است. در مقابل، راهکارهای آموزشی و ترویجی، اگرچه ضروری، به دلیل تأثیر غیرمستقیم بر موانع اولویت‌دار، در رتبه‌های پایین‌تر قرار گرفتند.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی موانع کلیدی توسعه سامانه‌های خورشیدی خانگی (SHS) در ایران و رتبه‌بندی راهکارهای عملی برای تسهیل نفوذ آن‌ها در بازار، از یک چارچوب ترکیبی نوین شامل روش دلفی فازی (FDM)، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و مارکوس فازی استفاده کرد.

در گام نخست، غربالگری دلفی فازی نشان داد که از میان ۴۸ مانع بالقوه استخراج‌شده از ادبیات، تعداد ۲۳ مانع دارای اهمیت کافی (امتیاز قطعی بالای آستانه ۰/۵) بوده و به عنوان موانع کلیدی انتخاب شدند. بر اساس نتایج وزن‌دهی ابعاد با روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (جدول ۸)، موانع مالی و ساختار پرداخت با وزن قطعی ۰/۳۲ بالاترین اولویت بازدارندگی را به خود اختصاص داد. پس از آن، به ترتیب موانع خدمات و پشتیبانی با وزن ۰/۲۴ و موانع کیفیت و طول عمر تجهیزات با وزن ۰/۱۹ در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. موانع اجرایی و اجتماعی با وزن ۰/۱۵ و موانع ترویج و فناوری با وزن ۰/۱۰ کمترین میزان اهمیت نسبی را کسب کردند. در سطح زیرمعیارها و موانع نهایی (جدول ۱۰)، پنج مانع بحرانی اول که بیشترین بازدارندگی را در نفوذ بازار دارند عبارتند از: قیمت بالای اولیه سیستم (با وزن ۰/۱۰۲)، پیش‌پرداخت زیاد (با وزن ۰/۰۸۶)، نبود خدمات پس از گارانتی (با وزن ۰/۰۸۱)، نبود خدمات نگهداری دوره‌ای (با وزن ۰/۰۷۴)، فشردگی دوره بازپرداخت تسهیلات (با وزن ۰/۰۷۱).

جهت رفع این گلوگاه‌ها، ده راهکار سیاستی و اجرایی با روش مارکوس فازی رتبه‌بندی شدند (جدول ۱۲). نتایج نشان داد که راهکار طرح‌های بازپرداخت اقساطی تسهیل‌گر از طریق بانک‌های تخصصی انرژی، مؤثرترین گزینه است. رتبه‌های بعدی به ترتیب به تسهیلات نصب یارانه‌ای/رایگان برای مسکن عمومی و روستاها، تصویب و اجرای قانون قیمت‌گذاری تضمینی (FIT) شفاف و پایدار و تعمیر و نگهداری قراردادی با ارائه گارانتی تعهدی عملکرد اختصاص یافت. راهکارهای نرم‌تر مانند آموزش نصاب‌ها و نمایشگاه‌های ترویجی در رتبه‌های آخر قرار گرفتند. چرا که این اقدامات به طور مستقیم ریسک مالی و فنی فوری خانوارها را هدف قرار نمی‌دهند.

تسلط بی‌چون‌وچرای موانع مالی و در صدر قرار گرفتن هزینه‌های اولیه) را می‌توان در چارچوب نظری مدل پذیرش فناوری (TAM) و نظریه انتشار نوآوری‌ها تبیین کرد. در مدل پذیرش فناوری، دو مؤلفه سهولت درک‌شده و مفید بودن درک‌شده به شدت تحت تأثیر توجیه‌پذیری اقتصادی تکنولوژی برای کاربر نهایی قرار دارند. برای یک خانوار متوسط ایرانی، سامانه خورشیدی خانگی نه به عنوان یک هزینه جاری مصرفی، بلکه به عنوان یک کالای سرمایه‌ای با ریسک بالا (CAPEX) ادراک می‌شود. تحت شرایط تورم ساختاری و نااطمینانی کلان اقتصادی، محدودیت نقدینگی خانوارها که به دلیل پیش‌پرداخت‌های سنگین و بازپرداخت‌های کوتاه‌مدت تشدید می‌شود، سد ورود به بازار را به شدت بالا می‌برد. در نتیجه، حتی در صورت وجود نگرش مثبت به محیط‌زیست، کنترل رفتاری درک‌شده (در چارچوب نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده) به دلیل ناتوانی مالی محدود شده و به رفتار خرید منجر نمی‌شود.

از سوی دیگر، اهمیت بالای موانع خدماتی (با وزن ۰/۲۴)، به ویژه نبود خدمات پس از گارانتی و نگهداری دوره‌ای، نشان‌دهنده تأثیر ریسک عملکرد درک‌شده بر تصمیم خریدار است. سامانه‌های خورشیدی به دلیل ماهیت فنی و تجهیزات مصرفی (مانند باتری با رتبه ۸ بازدارندگی و وزن ۰/۰۵۸) و تأثیرپذیری از شرایط اقلیمی ایران (پدیده گرد و غبار با رتبه ۱۱ و وزن ۰/۰۴۹)، پس از مدتی دچار افت راندمان می‌شوند. نبود یک شبکه خدمات پس از فروش منسجم و محلی، چرخه عمر مفید سیستم و در نتیجه دوره بازگشت سرمایه را

در هاله‌ای از ابهام قرار می‌دهد. این امر موجب شکل‌گیری یک شکاف اعتماد در بازار می‌شود. بنابراین، کسب رتبه چهارم توسط راهکار گارانتی تعهدی عملکرد در مدل مارکوس کاملاً منطقی است. زیرا این سیاست با انتقال ریسک فنی از خریدار به تأمین‌کننده، ریسک ادراک‌شده را به حداقل رسانده و تمایل به پذیرش را افزایش می‌دهد.

نتایج این پژوهش با بسیاری از مطالعات پیشین در حوزه توسعه و نفوذ انرژی خورشیدی همخوانی دارد. برای مثال، در مطالعه (اسلام و اسلام، ۲۰۱۷) که به بررسی موانع نفوذ سیستم‌های خورشیدی در کشورهای در حال توسعه پرداخته‌اند، عوامل مالی به‌عنوان مهم‌ترین مانع شناسایی شده است. همچنین در پژوهش‌های انجام‌شده در کشورهای آسیایی و آفریقایی، هزینه اولیه بالا و محدودیت دسترسی به منابع مالی از جمله مهم‌ترین موانع پذیرش این فناوری گزارش شده‌اند (آب و همکاران، ۲۰۲۴ و واربرگ، کیوله و پوگرانیا، ۲۰۲۶). مطالعات دیگری نیز بر اهمیت زیرساخت‌های خدماتی و نگهداری تأکید کرده‌اند. برای مثال، برخی تحقیقات نشان داده‌اند که نبود شبکه خدمات پس از فروش می‌تواند اعتماد مصرف‌کنندگان را کاهش دهد و در نتیجه نرخ پذیرش فناوری را محدود کند (مهن و همکاران، ۲۰۲۴). نتایج این پژوهش نشان داد که موانع اقتصادی، به‌ویژه هزینه اولیه بالای سیستم و محدودیت‌های مالی خانوارها، مهم‌ترین چالش در نفوذ سیستم‌های خورشیدی خانگی در بازار ایران محسوب می‌شوند. این یافته با نتایج برخی مطالعات داخلی همخوانی دارد. برای مثال، پژوهش‌های انجام‌شده در استان اردبیل و مناطق روستایی کشور (جامی اودولو و یزدانی، ۲۰۲۱) نشان داده‌اند که هزینه‌های اولیه بالا، کمبود حمایت‌های مالی و ضعف سیاست‌های تشویقی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده پذیرش فناوری‌های خورشیدی هستند. همچنین نتایج مطالعه (زمردیان و تحصیل‌دوست، ۲۰۱۹) که مشکلات اقتصادی و ضعف در سیاست‌گذاری را به عنوان مهم‌ترین موانع توسعه انرژی‌های پاک در روستاهای ایران معرفی کرده‌اند، با یافته‌های این تحقیق همسو است. علاوه بر این، مطالعاتی که با رویکرد گذار اجتماعی-فنی به بررسی توسعه سیستم‌های فتوولتائیک در ایران پرداخته‌اند (رحیمی‌راد و همکاران، ۲۰۱۸) نیز بر نقش ساختارهای نهادی و سیاست‌های انرژی در کندی گسترش این فناوری‌ها تأکید کرده‌اند.

با این حال، تفاوت کلیدی شرایط ایران با سایر بازارهای نوظهور، در میزان تأثیر فاکتورهای کلان اقتصادی است. در بازارهای پایدار، مدل‌های استاندارد تأمین مالی خرد به راحتی پاسخگوی نیاز بازار هستند. اما در ایران، نرخ بالای تورم و نوسانات نرخ ارز سبب می‌شود بانک‌های تجاری تمایلی به ارائه تسهیلات بلندمدت با نرخ بهره پایین نداشته باشند. این واقعیت نشان می‌دهد چرا متغیرهایی نظیر نوسان نرخ ارز در غربالگری دلفی تأیید شده و مدل‌های رایج لیزینگ خورشیدی به دلیل عدم ثبات مالی کارایی ندارند. همچنین از جنبه روش‌شناسی، برخلاف مطالعات پیشین در ایران که صرفاً به ارائه فهرستی از موانع پرداخته‌اند، در این تحقیق رابطه میان موانع واقعی و اثربخشی راهکارها از طریق یک زنجیره ریاضی منسجم (وزن‌های فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به عنوان ورودی معیارهای تصمیم‌گیری مارکوس فازی) برقرار شده است که تضمین می‌کند راهکارهای پیشنهادی دقیقاً منطبق بر رفع سنگین‌ترین موانع طراحی شده‌اند.

بر اساس نتایج خروجی مدل مارکوس فازی، سه بسته سیاستی ساختاریافته به همراه مکانیسم اجرایی، متولیان و شاخص‌های کلیدی عملکرد ارائه می‌شود:

بسته اول: ابزارهای نوین تامین مالی خرد

مکانیزم اجرایی: پیاده‌سازی مدل تامین مالی روی قبض (On-bill financing) یا پرداخت از محل صرفه‌جویی. در این طرح، سرمایه اولیه نصب سیستم توسط یک صندوق مشترک (با مشارکت ساتبا و بانک‌های عامل) تامین شده و اقساط آن به صورت ماهانه بر روی قبض برق مصرف‌کننده درج می‌گردد، به طوری که رقم قسط ماهیانه همواره کمتر یا مساوی با ارزش ریالی برق صرفه‌جویی/تولید شده باشد.

متولیان اصلی: وزارت نیرو، شرکت توانیر (شرکت‌های توزیع برق استانی)، ساتبا و بانک‌های عامل تخصصی. شاخص‌های کلیدی عملکرد: تعداد نیروگاه‌های خانگی نصب‌شده در ماه، نرخ نکول اقساط، میزان جذب سرمایه بخش خصوصی به صندوق انرژی.

بسته دوم: ثبات بخشی مقرراتی و توسعه بازار انشعابی

مکانیزم اجرایی: تدوین یک فرمول قیمت‌گذاری تضمینی (FIT) ۲۰ ساله متصل به شاخص تورم رسمی کشور تا ریسک کاهش ارزش پول ملی برای سرمایه‌گذار خانگی خنثی شود. هم‌زمان، ایجاد پنجره واحد الکترونیکی جهت کاهش زمان فرآیند بوروکراتیک تایید فنی، اتصال به شبکه و عقد قرارداد خرید تضمینی به کمتر از ۴۸ ساعت. متولیان اصلی: ساتبا، سازمان برنامه و بودجه کشور، شرکت‌های توزیع نیروی برق. شاخص‌های کلیدی عملکرد: زمان متوسط صدور مجوز و اتصال به شبکه، ظرفیت تجمیعی نصب‌شده خانگی (مگاوات)، شاخص نااطمینانی سرمایه‌گذاران خرد.

بسته سوم: تضمین کیفیت و ارتقای زنجیره خدمات پشتیبانی

مکانیزم اجرایی: الزام قانونی شرکت‌های عرضه‌کننده به ارائه گارانتی عملکردی حداقل ۵ ساله و قرارداد پشتیبانی دوره گارانتی (SLA). موازی با آن، راه‌اندازی مرکز ملی تست و تایید صلاحیت تجهیزات وارداتی و بومی جهت صدور برچسب استاندارد استاندارد خورشیدی و جلوگیری از ورود قطعات بی‌کیفیت به بازار. متولیان اصلی: سازمان ملی استاندارد ایران (INSO)، ساتبا، سندیکای صنعت برق و انجمن‌های علمی انرژی خورشیدی. شاخص‌های کلیدی عملکرد: متوسط زمان تعمیر خرابی‌ها، درصد قطعات خورشیدی تاییدشده در بازار، شاخص رضایت‌مندی خریداران خورشیدی خانگی.

در نهایت، این پژوهش نشان داد که در بازار ایران، نفوذ سیستم‌های خورشیدی خانگی بیش از آنکه تحت تاثیر محدودیت‌های فنی قرار داشته باشد، با موانع اقتصادی-مالی و عدم قطعیت در خدمات پس از فروش و کیفیت قطعات مواجه است. بدون پیاده‌سازی مدل‌های تامین مالی منعطف مانند خرید اقساطی بلندمدت و یارانه‌های هدفمند برای دهک‌های خاص، ظرفیت توسعه این سیستم‌ها در بخش خانوار به شدت محدود خواهد ماند. اولویت‌بندی راهکارها اثبات کرد که پیوند زدن ابزارهای تسهیل مالی با استانداردهای سخت‌گیرانه کیفیت و نگهداری، کلید اصلی باز کردن قفل نفوذ بازار سیستم‌های خورشیدی خانگی در ایران است.

نوآوری روش شناختی این پژوهش در ارائه یک مدل تصمیم‌گیری فازی سه‌مرحله‌ای (FDM-FAHP-Fuzzy MARCOS) است که توانست با مدیریت عدم قطعیت و ابهام در نظرات خبرگان (ناشی از نوسانات شدید اقتصادی کشور)، به نتایج باثبات و قابل اتکایی دست یابد. این مدل ترکیبی می‌تواند به عنوان الگویی کارآمد برای اولویت‌بندی و تدوین سیاست‌های بهینه‌سازی انرژی در سایر کشورهای در حال توسعه با اقتصادهای بی‌ثبات مورد استفاده قرار گیرد.

این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز مواجه بوده است. نخست اینکه ارزیابی‌های این پژوهش بر پایه دیدگاه پزل خبرگان استوار بوده و با وجود استفاده از منطق فازی، سوگیری‌های ذهنی کاملاً حذف‌شدنی نیستند. دوم اینکه مدل ارائه شده ایستا بوده و رفتار پویای متغیرها را در طول زمان در نظر نمی‌گیرد.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، از رویکردهای پویایی‌شناسی سیستم‌ها یا نقشه‌نگاری شناختی فازی جهت شبیه‌سازی اثر متقابل و زمانی سیاست‌ها (نظیر نرخ تورم، ارز و رفتار خریدار) استفاده شود. همچنین، انجام پژوهش‌های پیمایشی گسترده در سطح مصرف‌کنندگان نهایی می‌تواند نتایج حاصل از دیدگاه خبرگان را از منظر رفتار واقعی خریدار صحت‌سنجی کند.

منابع:

- Aklin, M., Bayer, P., Harish, S.P. and Urpelainen, J. (2018) 'Economics of household technology adoption in developing countries: evidence from solar technology adoption in rural India', *Energy Economics*, 72, pp. 35–46.
- allahyaribeik, sara, Houshmandi, saeed, Saraei, Alireza. "Investigation and Analysis of a Solar-Wind Hybrid System for Natural Resource Conservation with Energy Storage for Konjedkar (Zilayi) Village, Khuzestan Province." *Journal of Renewable Natural Resources Research*, vol. 16, no. 1, 2025, pp. 1-10. <https://doi.org/10.71916/jrn.2025.1207402>
- Chang, D.Y. (1996) 'Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP' *European Journal of Operational Research*, 95(3), pp. 649–655. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)
- Dong, L., Hardman, S., Firestone, J., & Bunch, D. S. (2026). Clean technology adoption preferences: integrated analysis of co-adoption of electric vehicles and solar panels. *Transportation Letters*, 18(2), 219-237.
- Effah, E., Gyamfi, S., Diawuo, F.A. and Asuamah, E.Y. (2025b) 'Socio-economic factors influencing the adoption of solar home systems: the case study of Ghana', *Scientific African*, 28, e02727. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02727>
- Effah, E., Gyamfi, S., Diawuo, F.A. and Atinsia, M.A. (2025a) 'Post technical assessment and field manual for solar home systems in island communities: The case of Ghana', *Solar Comp.*, 14, 100107. <https://doi.org/10.1016/J.SOLCOM.2025.100107>
- Ehsani, A. and Zahedi, A. E. (2026). Maturity model of construction companies by implementing a lean-agile approach using multi-criteria decision-making. (e238723). *Journal of Structural and Construction Engineering*, 13(05), e238723. <https://doi.org/10.22065/jsce.2026.543824.3809>
- George AA, Ghosh D (2026;), "Powering sustainability: a D-BWM approach to overcoming barriers and advancing solar power adoption among Indian households". *International Journal of Energy Sector Management*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/IJESM-05-2025-0034>
- Ghamkhari, S M and Pour Ali Ganji, L. (2023). Investigating the effect of perceived usefulness, ease of use, enjoyment, trust and social influence on intention to use with the mediating role of consumer attitude (Case of study: Household solar electricity customers in Yazd city). *Journal of Intelligent Marketing Management*, 4(2), 66-87.
- Ghazinoory, S., Akhlaghi, M.M., Shafiei Alavijeh, A., Hosseinalizadeh, R. and Nasri, S. (2025) 'Systematic failures in the development of photovoltaic systems: The case study of Iran's solar energy', *Energy Strategy Reviews*, 57, 101637.
- Hajpoor, S. and Shahraki, A. (2025) 'Marcos model for ranking civil project contractors', *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 54(117), pp. 73–82. <https://doi.org/10.22034/ceej.2023.54561.2207>
- Hosseijnizadeh N, Ghaedi M, (2020). 'Identify the obstacles of investment with emphasis on assigning of government land (Case study: solar and small scale power plants in Kerman province)', *Journal of Development strategy*, 15(4), pp.176-191. magiran.com/p2094337
- Hsu, C. C., & Sandford, B. A. (2007). The Delphi technique: making sense of consensus. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 12(1), 1-8. <https://doi.org/10.7275/pdap-t984>
- International Energy Agency (IEA) (2023) *Solar PV global supply chains*. Paris: IEA.
- International Energy Agency (IEA) (2024a) *Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030*. Paris: IEA.
- International Energy Agency (IEA) (2024b) *World energy outlook 2024*. Paris: IEA.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023) *Renewable energy policies and regulatory frameworks for solar PV*. Abu Dhabi: IRENA.
- Islam, R. and Islam, N. (2017) 'Evaluation of Solar Home System (SHS) implementation in Harirampur subdistrict', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, pp. 1281–1285. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.043>

- Jami Odulo, M. and Yazdani, M.H. (2021) 'Analysis and prioritization of non-use of solar energy in residential areas of Ardabil with emphasis on environmental sustainability', *Journal of Environmental Science Studies*, 6(3), pp. 4004–4012.
- Karimzadeh, S. and Salehi, S. (2022) 'A social study of the possibilities of transitioning from conventional fuels to renewables among Iranian villagers (Case study: Solar panels)', *Quarterly Journal of Environmental Education and Sustainable Development*, 11(1), pp. 91–111.
- Khattak, A. K., Saad, M., & Haq, M. H. U. (2026). EXPLORING PUBLIC PERCEPTION AND ATTITUDE TOWARDS HOUSEHOLD SOLAR ENERGY SYSTEMS. *International review of business and social sciences*, 6(1), 1-16.
- Liu, G., Li, M., Zhou, B., Chen, Y. and Liao, S. (2018) 'General indicator for techno-economic assessment of renewable energy resources', *Energy Conversion and Management*, 156, pp. 416–426.
- Mahn, D., Best, R., Wang, C. and Abiona, O. (2024) 'What drives solar energy adoption in developing countries? Evidence from household surveys across countries', *Energy Economics*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107815>
- Mahu, S. A., Odoi-Yorke, F., Adu-Poku, A., Avuglah, R. K., Frimpong, E. A., Quansah, D. A., & Kemausuor, F. (2026). Overcoming Technical and Operational Barriers in Low-Voltage Mini-Grids: Two Decades of Research Trends, Progress, and Pathways for Accelerated Rural Electrification (2005–2025). *Energies*, 19(4), 933.
- Marshall, P. G., Thanarak, P., Ketjoy, N., & Prasatsap, U. (2026). Barriers to sustainable rural electrification: A PESTEL-based qualitative case study of Mae Hong Son Province, Thailand. *Energy for Sustainable Development*, 92, 101935.
- Molepo P, Mathaba TND, Aboalez K (2026);, "Barriers to the adoption of solar and wind energy technologies: a systematic literature review". *International Journal of Energy Sector Management*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/IJESM-12-2024-0001>
- Mukisa, N., Manitisa, M.S., Nduhura, P., Tugume, E. and Chalwe, C.K. (2022) 'Solar home systems adoption in Sub-Saharan African countries: Household economic and environmental benefits assessment', *Renewable Energy*, 189, pp. 836–852. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.029>
- Mustafa, M., Malik, M.O.F. and Maqsoom, A. (2024) 'Barriers to solar PV adoption in developing countries: multiple regression and analytical hierarchy process approach', *Sustainability (Switzerland)*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/su16031032>
- Naderi Mahdei, K. and Mahmoudian, H. (2016) 'Analysis of barriers and solutions for use of solar energy (a case study of Hekmatane District)', *Iranian Journal of Energy*, 19(2), p. 57.
- Ngonda, T. (2022) 'A scoping review of adopter attributes, motivations, and barriers of solar home systems adoption: Lessons for sub-Saharan Africa', *Renewable Energy and Sustainable Development*, 8(1). <https://doi.org/10.21622/resd.2022.08.1.001>
- Pamučar, D., Stević, Ž. and Sremac, S. (2021) 'A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full consistency method (FUCOM) and its application with fuzzy MARCOS', *Applied Soft Computing*, 102, 107081. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107081>
- Rahimi Rad, Z., Yahyazadefar, M., Miremadi, T. and Madhoshi, M. (2018) 'Identification and analysis of social-technical transition barriers to photovoltaic solar systems focusing on fossil fuel regime', *Journal of Technology Development Management*, 6(1), pp. 49–77.
- Rigo, P.D., Siluk, J.C.M., Lacerda, D.P., Rediske, G. and Rosa, C.B. (2020) 'A model for measuring the success of distributed small-scale photovoltaic systems projects', *Solar Energy*, 205, pp. 241–253.
- Salim, A. M., & Abu Dabous, S. (2026). A stakeholder-based framework for implementing solar home systems in public housing projects in the United Arab Emirates. *International Journal of Housing Markets and Analysis*, 19(4), 849-864.

- Salim, A.M. and Alsyouf, I. (2020) 'Renewable energy in the United Arab Emirates: status and potential', in 2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), pp. 1–5.
- SATBA (Renewable Energy and Energy Efficiency Organization). (2026). Statistical summary of the country's renewable electricity industry Retrieved from [https://amar.satba.gov.ir/fa/tablesandcharts-](https://amar.satba.gov.ir/fa/tablesandcharts)
- Sedai, A. et al. (2023) 'Renewable energy resource assessment for rural electrification: a case study in Nepal', International Journal of Low-Carbon Technologies, 18, pp. 1107–1119. <https://doi.org/10.1093/IJLCT/CTAD089>
- Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A. and Chatterjee, P. (2020) 'Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS)', Computers & Industrial Engineering, 140, 106231. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106231>
- Warburg, C., Kivevele, T., & Pogrebnaya, T. (2026). Solar technology penetration in Sub-Saharan Africa: Status, drivers, barriers, and future prospects. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 14(1), 1-29.
- World Bank (2023) Scaling solar and distributed solar development: Policy guidance for emerging markets. Washington, DC: World Bank.
- Zomorodian, Z.S. and Tahsildoost, M. (2019) 'Capacities, barriers and incentives for development of renewable energies in Iran's rural areas', Housing and Rural Environment, 38(165), pp. 17–32.