



The University of Tehran Press

Identification and Structural Analysis of Drivers Influencing the Future of Renewable Energy Technologies in Iran (Case Study: Solar Energy)

Saeid Torfi¹ | Hossein Mohebbi^{2*} | Hamid Babaei Meybodi³

1. M.Sc. in Industrial Management, Faculty of Human Sciences, Meybod University, Meybod, Iran. Email: saeidtorfi1992@gmail.com

2. Corresponding Author, Assistant Professor, Deptment of Industrial Management, Faculty of Human Sciences, Meybod University, Meybod, Iran. Email: h.mohebbi@Meybod.ac.ir

3. Associate Professor, Deptment of Industrial Management, Faculty of Human Sciences, Meybod University, Meybod, Iran. Email: babaei@Meybod.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received 01 February 2025

Revised 19 March 2025

Accepted 20 April 2025

Published Online 23 August 2025

Keywords:

Foresight,
Key Drivers,
Structural Analysis,
Solar Energy Technology.

ABSTRACT

Global developments in the energy sector and concerns related to climate change have heightened the focus on renewable energy, particularly solar energy, in developing countries such as Iran. With its high solar irradiation potential, Iran is among the nations capable of extensively utilizing this clean and inexhaustible resource. The present study aims to identify and analyze the key drivers shaping the future of solar energy technology in Iran using a structural analysis approach. The research methodology is applied in purpose, pragmatist in its paradigmatic foundation, and descriptive-survey in terms of data collection. The statistical population comprises professors, managers, and experts in the renewable energy sector. Initially, through a review of the research literature and documentary studies, a set of preliminary drivers was identified. Subsequently, semi-structured interviews with 12 experts in renewable energy and solar technology, along with the completion of uncertainty questionnaires, were employed to screen and determine the main drivers. Finally, the results of the structural analysis, conducted using MICMAC software, identified five key drivers that play a pivotal role in advancing solar energy technology in Iran: specialized human resources, government policies and support, international cooperation in solar energy technology, emerging and advanced global technologies, and transmission and distribution infrastructure. This study offers a comprehensive analytical framework grounded in foresight methodology, providing policymakers and decision-makers with the tools to identify emerging trends and uncertainties. By leveraging these insights, more effective strategies can be developed for advancing solar energy in Iran.

Cite this article: Torfi, S.; Mohebbi, H. & Babaei Meybodi, H. (2025). Identification and Structural Analysis of Drivers Influencing the Future of Renewable Energy Technologies in Iran (Case Study: Solar Energy). *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (4), 359-381. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.388342.1112>



© Saeid Torfi, Hossein Mohebbi, Hamid Babaei Meybodi
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.388342.1112>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Under the growing need to combat climate change and reduce global warming, renewable energy technologies have emerged as a sustainable solution to replace fossil fuels, addressing their environmental and economic challenges. Among these technologies, solar energy stands out due to its abundance, accessibility, and significant potential to reduce greenhouse gas emissions. While developing countries like Iran possess vast opportunities for solar energy development, the practical utilization of renewable energy remains suboptimal despite comprehensive regulations and policies. Recognizing the critical role of key drivers in shaping the future of renewable energy technologies, this study focuses on identifying and structurally analyzing these drivers, emphasizing solar energy in

Iran. The research aims to offer insights into the challenges and opportunities for technological advancement, providing a strategic framework to guide policymakers in fostering sustainable energy development.

Methodology

This research is an applied, mixed-methods study employing descriptive-survey techniques for data collection. Data gathering was conducted through both documentary research and field studies (surveys). To identify and structurally analyze the key drivers influencing the future of renewable energy technologies, with a focus on solar energy in Iran, a comprehensive literature review and structural analysis using the MICMAC software were undertaken.

The sampling was conducted via non-probabilistic purposive sampling, targeting a limited pool of individuals with relevant expertise. The final expert group comprised 12 individuals: three academic researchers specializing in futures studies and renewable energy and nine managers and experts from the solar energy industry with at least five years of experience and a minimum of a master's degree.

Data collection involved library-based research (books, dissertations, and articles) and field studies, including semi-structured interviews and questionnaires. Two distinct questionnaires were used:

1. Questionnaire A: This survey assessed the importance and uncertainty of the identified drivers using a five-point Likert scale, as evaluated by the experts.
2. Questionnaire B: This questionnaire focused on pairwise comparisons of the most significant and uncertain drivers, facilitating structural analysis through the MICMAC method.

Key Results

The present study, through the review and analysis of various articles in the field of renewable energy technologies, initially identified several preliminary drivers. Subsequently, through steps such as expert interviews, completing an uncertainty questionnaire, and applying structural analysis, five key drivers were determined:

1. Specialized human resources,
2. Government policies and support,
3. International cooperation in solar energy technology,
4. Emerging and advanced global technologies, and
5. Transmission and distribution infrastructure.

Special attention to these five key drivers can provide a clear roadmap for the development of solar energy technology in Iran. With proper investment and the adoption of targeted policies in these areas, Iran will be able to reduce its dependence on fossil fuels, enhance its energy security, and increase the share of solar energy in the country's energy portfolio. Achieving these objectives will not only yield significant economic and environmental benefits but also elevate Iran's standing in the global renewable energy sector.

Conclusion

These drivers play a decisive role in the success or failure of the future of solar energy technology from various perspectives. Therefore, it is crucial for policymakers and planners in Iran's energy sector to pay special attention to the following points:

1. Specialized Human Resources: Skilled professionals are essential for fostering innovation and maximizing the potential of solar energy technologies. In Iran, inadequate educational programs and limited research infrastructure hinder this development. Enhancing university and research institution programs and establishing international collaborations can address this gap. Empowering specialized human resources will enable technology localization and sustainable growth in renewable energy.
2. Government Policies and Support: Effective policies, such as subsidies, tax incentives, and financial support, play a critical role in encouraging private-sector investment. However, inconsistent policies in Iran deter growth in solar energy. Long-term, transparent policies, the creation of dedicated funds, and energy pricing reforms can mitigate investment risks and boost private-sector participation. Key governmental organizations, such as the Ministry of Energy and the Department of Environment, should play an active role.

3. **International Cooperation:** Collaborations can accelerate technology transfer, attract foreign investment, and facilitate joint projects. Iran faces barriers such as sanctions and political constraints, limiting access to global expertise. Strengthening ties with international organizations and friendly nations can help overcome these challenges and enhance the pace of solar technology development.
4. **Emerging and Advanced Technologies:** Innovations such as high-efficiency solar cells, advanced storage systems, and smart technologies can significantly improve solar energy performance. However, high costs and reliance on imports pose challenges for Iran. Investing in local R&D, establishing specialized research centers, and supporting startups can reduce dependence on foreign technologies and increase global competitiveness.
5. **Transmission and Distribution Infrastructure:** Efficient infrastructure is crucial for optimizing the use of generated solar energy. Iran's outdated grid systems, heavily reliant on fossil fuels, exacerbate this issue. Upgrading transmission networks, reducing energy losses, and incorporating smart systems for energy distribution are critical steps. Proper infrastructure will accelerate the establishment of solar power plants and enable both grid-connected and off-grid solutions.

The development of solar energy in Iran requires a holistic and coordinated approach, addressing all key drivers simultaneously. By investing in human resources, ensuring sustainable government support, fostering international collaborations, adopting advanced technologies, and improving infrastructure, Iran can pave the way for a robust solar energy industry. Policymakers must leverage these drivers to create a strategic roadmap for renewable energy, enhancing energy security and increasing solar energy's share in the national energy mix.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

شناسایی و تحلیل ساختاری پیشران‌های مؤثر بر آینده فناوری‌های تجدیدپذیر در ایران (مورد مطالعه: انرژی خورشیدی)

سعید طرفی^۱ | حسین محبی^{۲*} | حمید بابایی میبدی^۳

۱. کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه میبد، میبد، ایران. رایانامه: saeidtorfi1992@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه میبد، میبد، ایران. رایانامه: h.mohebbi@Meybod.ac.ir

۳. دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه میبد، میبد، ایران. رایانامه: babaei@Meybod.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

کلیدواژه:

آینده‌پژوهی،

پیشران‌های کلیدی،

تحلیل ساختاری،

فناوری انرژی خورشیدی.

تحولات جهانی در حوزه انرژی و نگرانی‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی، توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی را در کشورهای در حال توسعه مانند ایران افزایش داده است. ایران با داشتن پتانسیل بالای تابش خورشید، از جمله کشورهایی است که می‌تواند از این منبع پاک و بی‌پایان به‌طور گسترده استفاده کند. هدف پژوهش حاضر، تعیین و بررسی پیشران‌های آینده فناوری انرژی خورشیدی در ایران با رویکرد تحلیل ساختاری است. روش‌شناسی پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی، از منظر بنیان پارادایمی، دارای رویکرد پراگماتیستی و از نظر نحوه گردآوری داده‌ها توصیفی - پیمایشی است. جامعه آماری پژوهش حاضر، اساتید، مدیران و خبرگان صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. در این پژوهش، ابتدا با بررسی ادبیات پژوهش و مطالعات اسنادی، مجموعه‌ای از پیشران‌های اولیه شناسایی شدند. سپس، با استفاده از مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با ۱۲ نفر از خبرگان حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری خورشیدی و نیز تکمیل پرسشنامه‌های عدم قطعیت، پیشران‌های اصلی غربال و تعیین شدند. سرانجام، نتایج حاصل از تحلیل ساختاری با بهره‌گیری از نرم‌افزار میک‌منجر به احصای پنج پیشران کلیدی شامل منابع انسانی متخصص، سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی، همکاری‌های بین‌المللی در فناوری انرژی خورشیدی، تکنولوژی‌های نوظهور و پیشرفته جهانی و نیز زیرساخت انتقال و توزیع شد که نقشی محوری در پیشبرد فناوری انرژی خورشیدی در ایران دارند. این پژوهش، از طریق طراحی فرایندهای دقیق شناسایی، غربال‌گری و تحلیل روابط بین پیشران‌ها، می‌تواند به سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا با درک عمیق‌تری از پیشران‌ها و عدم قطعیت‌های پیش رو، استراتژی‌های مؤثرتری را برای توسعه انرژی خورشیدی در ایران اتخاذ کنند.

استناد: طرفی، سعید؛ محبی، حسین و بابایی میبدی، حمید (۱۴۰۴). شناسایی و تحلیل ساختاری پیشران‌های مؤثر بر آینده فناوری‌های تجدیدپذیر در ایران (مورد مطالعه: انرژی خورشیدی). *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۴ (۴) ۳۵۹-۳۸۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.388342.1112>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© سعید طرفی، حسین محبی، حمید بابایی میبدی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.388342.1112>



۱. مقدمه

در دنیای امروز، مدیریت انرژی به عنوان یکی از چالش‌های مهم جهانی شناخته می‌شود. کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، افزایش هزینه‌های تأمین انرژی و آلودگی سوخت‌های فسیلی، تغییرات نادرست اقلیمی و اثرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، کشورهای مختلف را به سمت توسعه و بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است [۱]. بنابراین بهترین گزینه، انتخاب انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یک رویکرد پایدار برای حل این مشکلات به منظور تأمین انرژی و کم کردن میزان کربن در زمین است [۲]، چرا که در قرن ۲۱ سیاست‌های حاکم در جهان به سمت کاهش آلاینده‌های محیطی مبتنی بر اقتصاد کم کربن و توسعه روزافزون انرژی‌های تجدیدپذیر است که این سیاست باعث می‌شود گازهای گلخانه‌ای کاهش یابد و در مصرف انرژی در جهان صرفه‌جویی چشم‌گیری صورت پذیرد [۳]. اما مزیت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در کاهش گازهای گلخانه‌ای به تنهایی انگیزه موجود برای توسعه آن نیست، بلکه امنیت انرژی در زمینه افزایش تحمل سیستم انرژی در رویارویی با آثار پیش‌بینی‌شده تغییر اقلیم، بیشتر از قبل مورد توجه قرار گرفته است [۴]. تحولات سریع در حوزه فناوری و نیاز روزافزون به منابع انرژی پایدار، جهان را به سمت استفاده گسترده‌تر از انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است.

انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع مهم تجدیدپذیر، به دلیل فراوانی، قابلیت دسترسی و پتانسیل قابل توجه در کاهش اثرات زیست‌محیطی به جایگاهی کلیدی در سیاست‌های انرژی ملی و بین‌المللی دست یافته است. اهمیت انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع اصلی انرژی تجدیدپذیر، در شرایط فعلی کشور ایران دوچندان است. از یک سو، تغییرات اقلیمی و تعهدات بین‌المللی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، و از سوی دیگر، افزایش نیاز به امنیت انرژی و کاهش وابستگی به منابع فسیلی، ضرورت بهره‌برداری از این منبع انرژی پاک را بیش از پیش آشکار می‌کند [۵]. کشور ایران، با داشتن شرایط اقلیمی مناسب و ظرفیت‌های گسترده برای تولید انرژی خورشیدی، فرصت بی‌نظیری برای توسعه این فناوری دارند، اما متأسفانه در ایران با توجه به وجود قوانین و مقررات گسترده در زمینه افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی کشور همچون: سیاست‌های کلی نظام در قسمت انرژی، قانون هدفمند کردن یارانه‌ها، قانون اصلاح الگوی مصرف، سیاست‌های جامع و کلان محیط زیست و قانون پنج‌ساله ششم توسعه، آمار موجود بیانگر آن است که انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورمان به صورت شایسته‌ای مورد استفاده واقع نشده است [۶]. همچنین، چالش‌های مدیریتی و ساختاری موجود در کشور، از جمله وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی، ناکارآمدی سیاست‌های حمایتی، و محدودیت‌های سرمایه‌گذاری، توسعه این بخش را با موانع جدی مواجه کرده است [۷]. بنابراین، توسعه فناوری‌های مرتبط با انرژی خورشیدی در ایران، نیازمند شناسایی و تحلیل دقیق عواملی است که بر آینده این فناوری‌ها تأثیرگذارند.

امکان پیش‌بینی آینده به شکل دقیق و کامل وجود ندارد، زیرا که همواره امکان بروز پدیده‌های نو و رویدادهای غافلگیرکننده‌ای وجود دارد که روندهای موجود را از بین می‌برند یا کم‌اثر می‌کنند و آن را غیر قابل پیش‌بینی می‌سازند [۳]. روند به تغییرات منظم، مستمر و یا دوره‌ای در پدیده‌ها طی بازه زمانی معینی گفته می‌شود. تغییرات یادشده می‌توانند به صورت کیفی یا کمی باشند. پیشران‌ها، مجموعه یا دسته‌ای از یک یا چند مؤلفه یا روند مرتبط هستند که با کنار هم قرار گرفتن به آینده شکل می‌دهند. در واقع، پیشران‌ها تشریح‌کننده عوامل ایجاد تغییر در یک مسئله هستند که در پاره‌ای از مواقع نیز به عنوان کلان روند از آن‌ها نام برده می‌شود. تعدادی از پژوهشگران نیز پیشران را شامل خوشه‌ای از کلان‌روندهای مرتبط با محیط استراتژیک فعالیت تعریف کرده‌اند [۸]. موضوع آینده فناوری و شناخت مؤثر آن در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی از درجه اهمیت بالایی برخوردار است که این موضوع از ناحیه سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان مورد غفلت قرار گرفته است. باید این واقعیت را پذیرفت که بحران‌های امروز، نتیجه در نظر نگرفتن تأثیرگذاری فناوری‌های نوظهور و شگفتی‌ساز بر حل چالش‌ها و مسائل است [۹]. با وجود پژوهش‌های متعدد در سطح بین‌المللی درباره اهمیت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، از جمله مطالعاتی که نشان دادند کشورها می‌توانند با سیاست‌های حمایتی قوی و زیرساخت‌های مناسب، نقش مهمی در گذار به انرژی‌های پاک ایفا کنند [۱۰] - [۱۲]، در ایران نیز تحقیقات پراکنده‌ای به چالش‌های توسعه انرژی خورشیدی، از جمله محدودیت‌های فنی، مالی و سیاست‌گذاری، اشاره کرده‌اند [۵، ۹، ۱۳ و ۱۴]. با این حال، پژوهش جامعی که با رویکردی آینده‌نگرانه و مبتنی بر تحلیل ساختاری، به شناسایی و ارزیابی پیشران‌های مؤثر بر آینده توسعه «فناوری انرژی خورشیدی» در ایران بپردازد، یافت نشد.

بنابراین، هدف این پژوهش، شناسایی و تحلیل ساختاری پیشران‌های مؤثر بر آینده فناوری‌های تجدیدپذیر، با تمرکز بر انرژی خورشیدی در ایران است. پیشران‌ها، به عنوان عوامل کلیدی تأثیرگذار بر روندها و تحولات آینده، نقش بسزایی در برنامه‌ریزی استراتژیک و توسعه فناوری ایفا می‌کنند. این مطالعه تلاش دارد با استفاده از روش‌های علمی و تحلیل ساختاری، ارتباطات میان این پیشران‌ها را بررسی کند و تصویری جامع از چالش‌ها و فرصت‌های پیش روی توسعه فناوری‌های خورشیدی ارائه دهد. این مقاله با ارائه چارچوبی تحلیلی برای شناسایی پیشران‌های مؤثر، می‌تواند به تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران کمک کند تا برنامه‌هایی کارآمدتر برای توسعه فناوری‌های تجدیدپذیر در ایران تدوین کنند. همچنین، نتایج این پژوهش می‌تواند به غنی‌سازی ادبیات علمی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و تحلیل آینده‌پژوهی کمک شایانی کند.

۲. پیشینه پژوهش

برای استخراج و شناسایی پیشران‌های مرتبط با موضوع پژوهش، از روش مرور نظام‌مند به شرح ذیل استفاده شد. گام ۱: برای مرور نظام‌مند با هدف شناسایی پیشران‌های کلیدی تأثیرگذار بر آینده فناوری انرژی خورشیدی، سؤال اصلی پژوهش به این صورت تدوین شد: «چه پیشران‌هایی بر توسعه و آینده فناوری انرژی خورشیدی تأثیرگذارند و در مطالعات پیشین چگونه تحلیل شده‌اند؟»

گام ۲: در پژوهش حاضر برای به‌روز بودن داده‌های مطالعات پیشین، محدودیت بعد زمانی ۵ ساله (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴) در نظر گرفته شد.

گام ۳: برای انتخاب مطالعات پیشین مناسب، معیارهای زیر در نظر گرفته شد:

- معیارهای ورود:

- مقالات منتشرشده در مجلات معتبر علمی (شامل علمی پژوهشی داخلی، ISI، Scopus).
- مقالاتی که به پیشران‌های فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر (به‌ویژه انرژی خورشیدی) پرداخته‌اند.
- مقالاتی که از روش‌های علمی تحلیل آینده‌پژوهی (مانند سناریونویسی، تحلیل روند، و مدل‌سازی) استفاده کرده‌اند.

- معیارهای خروج:

- مقالاتی که فقط به سیاست‌های کلی انرژی پرداخته‌اند، نه فناوری‌های خورشیدی.
- مطالعاتی که تمرکز آن‌ها بر فناوری‌های سنتی یا غیرمرتبط با آینده‌پژوهی بوده است.
- مقالاتی که فاقد داده‌های تحلیلی کافی برای استنتاج پیشران‌ها بوده‌اند.

گام ۴: جست‌وجو در پایگاه‌های اطلاعاتی زیر انجام شد:

- پایگاه‌های داخلی: SID، Magiran، Civilica، Ganj.

- پایگاه‌های بین‌المللی: Scopus، Web of Science، ScienceDirect، Google Scholar.

گام ۵: در این مرحله برای پیدا کردن مقالات مرتبط در پایگاه‌های اطلاعاتی از ترکیب کلیدواژه‌های زیر برای جست‌وجوی مقالات استفاده شد:

("Solar Energy Technology" OR "Solar Power Innovation") AND ("Drivers" OR "Foresight" OR "Scenario Planning" OR "Emerging Trends").

گام ۶: غربال‌گری مطالعات در دو مرحله انجام شد:

غربال‌گری اولیه: حذف مقالات تکراری و نامرتبط پس از بررسی عناوین و چکیده‌ها.

غربال‌گری ثانویه: بررسی دقیق‌تر مقالات بر اساس متن کامل، به منظور تأیید تناسب آن‌ها با سؤال پژوهش.

پس از غربال‌گری از حدود ۵۵ پژوهش اولیه، تعداد ۲۱ پژوهش نهایی برای تحلیل انتخاب شد. درخور یادآوری است که هیچ‌یک از این پژوهش‌ها، به احصا و تحلیل پیشران‌های مؤثر بر آینده فناوری انرژی خورشیدی در ایران در ایران نپرداخته است. از این‌رو، بر اساس روش مرور نظام‌مند، نگاه اجمالی خواهیم داشت بر مطالعات پیشین مرتبط با موضوع پژوهش.

هانگ کیائوپنگ و همکاران (۲۰۲۴) روشی برای تولید سناریوهای شدید در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه کرده‌اند. آن‌ها

ابتدا الگوریتمی برای افزایش داده‌ها طراحی کردند تا توزیع داده‌ها به سمت حالت‌های شدید تغییر کند. سپس، با استفاده از نظریه ارزش افراطی، داده‌های افزوده‌شده را با توزیع پارتوی تعمیم‌یافته (GPD) مدل‌سازی کردند. مطالعه موردی روی داده‌های واقعی نشان داد این روش در تولید سناریوهای شدید از مدل‌های پیشرفته موجود بهتر عمل کرده و به‌خوبی همبستگی‌های زمانی و مکانی سناریوهای واقعی را شبیه‌سازی می‌کند [۱۰].

فراهات و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی وضعیت پذیرش انرژی خورشیدی در کشورهای عضو شورای همکاری خلیج فارس پرداختند. این کشورها به دلیل داشتن یکی از میزان‌های بالای تابش خورشیدی در جهان، پتانسیل بالایی برای تولید انرژی از منابع خورشیدی دارند. با این حال، چالش‌هایی مانند وابستگی تاریخی به سوخت‌های فسیلی، سیاست‌های ضعیف در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از گرد و غبار بر بهره‌برداری بهینه از این انرژی تأثیر گذاشته‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد کشورهایمانند عربستان سعودی و امارات متحده عربی گام‌های بزرگی در توسعه نیروگاه‌های خورشیدی برداشته‌اند. همچنین، مطالعه یک مدل مفهومی برای کمک به دولت‌ها و سیاست‌گذاران در توسعه پروژه‌های انرژی خورشیدی پیشنهاد داده و تجزیه و تحلیل مقدماتی از کاهش ردپای کربنی با استفاده از انرژی خورشیدی در مقایسه با شبکه برق ملی این کشورها ارائه کرده است [۱۱].

موفرگا و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی راهبرد صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر با نگاهی آینده‌محور پرداخته‌اند و به لحاظ فنی و اقتصادی و تأثیرات این انرژی بر محیط زیست در آینده و بررسی چشم‌انداز این سیستم از انرژی در جمیع جهات اعم اجتماعی، سیاسی و فرهنگی در جامعه، پژوهش خود را پیش برده‌اند. سپس با بینش‌های آینده برای انتشار، نوآوری و سیاست انرژی تجدیدپذیر به نتایج قابل توجهی دست پیدا کرده‌اند و در واقع، با نگاه آینده‌نگرانه‌ای استراتژیک صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر را تبیین کرده و به پیشران‌ها و عدم قطعیت‌های کلیدی در این حوزه رسیده‌اند [۱۲].

اودیامبو و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و داده‌های تابش خورشیدی با وضوح بالا، به بررسی پتانسیل انرژی خورشیدی در منطقه دلتای رود یانگ‌تسه در چین پرداخته‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد منطقه یادشده از نظر منابع خورشیدی بسیار غنی است و پتانسیل جغرافیایی مناسب آن برای تولید انرژی خورشیدی بین ۱۴۴۶ تا ۱۶۵۸ کیلووات ساعت بر متر مربع متغیر است. این مقاله همچنین تأکید دارد که استفاده از داده‌های تابش خورشیدی از ایستگاه‌های هواشناسی محلی برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و بهینه‌سازی توسعه انرژی خورشیدی ضروری است. نتایج تحقیق یادشده نشان می‌دهند استان‌های جیانگسو و آنهویی، به دلیل پتانسیل جغرافیایی و تکنولوژیکی بالاتر، بهینه‌ترین مناطق برای استقرار نیروگاه‌های فتوولتائیک در منطقه دلتای رود یانگ‌تسه هستند [۱۵].

شورای جهانی انرژی (۲۰۱۹) که در بحث انرژی‌های تجدیدپذیر هم به‌شدت فعال است و اهتمام ویژه و بسیار بالایی را نسبت به آینده انرژی‌های تجدیدپذیر از خود نشان داده، در گزارش خود درباره آینده انرژی‌های گوناگون در سطح کلان با بررسی پیشران‌های مهم و اساسی، سه سناریوی بسیار مهم را برای افق انواع انرژی در سال ۲۰۴۰ ارائه می‌دهد [۱۶].

جیلن و همکاران (۲۰۱۹) ویژگی‌های فنی و اقتصادی یک گذار سریع انرژی به سال ۲۰۵۰ را بررسی می‌کند و تأیید می‌کند که بهره‌وری انرژی و فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر عناصر اصلی این گذار هستند. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد بهره‌وری انرژی و فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر عناصر اصلی آن گذار هستند و هم‌افزایی آن‌ها نیز به همین ترتیب مهم است. اقتصاد مطلوب، منابع در همه‌جا، فناوری مقیاس‌پذیر، و مزایای اجتماعی - اقتصادی قابل توجه زیربنای چنین انتقالی است [۱۷].

هونگ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی سناریوهای پیش روی کره جنوبی برای گذار به سیستم پایدار انرژی تا افق ۲۰۴۰ پرداخته و در نهایت با تعیین پیشران‌های کلیدی به ۴ سناریو رسیده‌اند و سهم و جایگاه انرژی تجدیدپذیر در آینده این کشور را مورد بررسی قرار داده‌اند. سناریوها با توجه به تفاوت در سطح مصرف نهایی انرژی و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر تا سال ۲۰۵۰ تعریف می‌شوند [۱۸].

عبادی و همکاران (۱۴۰۲) در تحقیقی به تعیین پیشران‌های آینده‌پژوهی برای تدوین سناریوهای توسعه انرژی تجدیدپذیر پرداخته‌اند و در پژوهش خود پس از تعیین پیشران‌های کلیدی از روش‌های آینده‌پژوهی به‌خصوص سناریونویسی استفاده کرده‌اند [۳].

رستمی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهش خود به موضوع تدوین مدل پارادایمی توسعه کارآفرینی در حوزه‌های انرژی تجدیدپذیر: کاربرست رویکرد آینده‌پژوهی پرداخته‌اند. در این پژوهش از دو نوع زاویه‌بندی داده‌ای و زاویه‌بندی تحلیل برای افزایش اعتبار یافته‌های تحقیق استفاده شده است. در راهبردهای آینده‌نگرانه بر اساس تحلیل لایه‌ای علت‌ها، تأکید اصلی بر الگوهای ذهنی است که چگونگی درک و پاسخ‌گویی به دنیای پیرامون را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بعد از این مرحله، باید به ایجاد تغییر در سیاست‌گذاری‌ها و قوانین اقدام شود و بر اساس آن ساختارها تغییر یابد [۱۹].

منصوری و ملکی (۱۴۰۲) در زمینه آینده انرژی‌های تجدیدپذیر و اهمیت امنیت انرژی ورود کرده‌اند و در موضوعی تحت عنوان «بررسی سبب انرژی‌های اولیه ایران، آینده آن، و توصیه‌هایی برای بهینه شدن»، تحقیقی را انجام داده‌اند. در این مطالعه با بررسی برخی پیشران‌ها از تکنیک سناریونویسی بهره برده‌اند. در نهایت، می‌توان گفت که بازار انرژی متأثر از سه دسته عوامل اقتصادی، تکنولوژیکی و نهادی است که دارای وابستگی متقابل‌اند و در بسیاری موارد تفکیک آن‌ها دشوار است، ولی می‌توان ادعا کرد که در کل بازار انرژی تحت تأثیر چهار عامل اصلی جمعیت، تکنولوژی، اولویت‌های زیست‌محیطی و حکمرانی بین‌المللی است [۵].

خیاطیان یزدی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی تحت عنوان «سناریوهای توسعه انرژی تجدیدپذیر در افق ۱۴۲۰» با رویکردی آینده‌پژوهانه به تدوین راهبرد و بررسی سناریوهای محتمل در این زمینه پرداخته‌اند. به منظور تعیین پیشران‌های اصلی از دو شاخص اهمیت و عدم قطعیت استفاده شده است. با توجه به شاخص‌های اهمیت و عدم قطعیت دو پیشران «فناوری‌های نوظهور» و «اقتصاد سبز و پایدار» برگزیده شدند [۹].

شیرجیان و سراج (۱۳۹۹) به موضوع آینده‌پژوهی انرژی‌های نو در جهان به منظور تحلیل و ارائه راهبردهای مناسب برای ارتقای امنیت انرژی ایران اشاره داشته‌اند و با تعیین پیشران‌های کلیدی در این زمینه سناریوهای مختلفی را طراحی کرده‌اند [۱۳].

حال، بر اساس بررسی مطالعات پیشین، شکاف اصلی تحقیقاتی این پژوهش در سه محور قابل شناسایی است:

۱) فقدان مطالعات ساختاریافته در شناسایی و تحلیل پیشران‌های کلیدی: بسیاری از مطالعات پیشین بر تحلیل کلی موانع یا مزایای انرژی‌های تجدیدپذیر تمرکز داشته‌اند و کمتر به تحلیل روابط میان پیشران‌ها و تأثیر متقابل آن‌ها پرداخته‌اند.

۲) فقدان بررسی آینده فناوری در حوزه انرژی خورشیدی: بیشتر پژوهش‌های گذشته بر آینده انرژی خورشیدی از لحاظ جنبه‌های زیست‌محیطی، سیاست‌گذاری و اقتصادی تمرکز داشته‌اند و به آینده فناوری انرژی خورشیدی نپرداخته‌اند.

۳) تمرکز ناکافی بر بافت ایران و شرایط خاص آن: با وجود پتانسیل بالای ایران در حوزه انرژی خورشیدی، پژوهش‌هایی که به طور خاص به شناسایی و تحلیل پیشران‌های تأثیرگذار بر آینده فناوری انرژی خورشیدی در ایران پرداخته، وجود نداشت.

بنابراین، این پژوهش با هدف پر کردن شکاف‌های یادشده، دو نوآوری اصلی را دنبال می‌کند:

الف) رویکرد تحلیلی و جامع به شناسایی و تحلیل پیشران‌ها: در این مطالعه از رویکردهای علمی و تحلیل ساختاری استفاده شده است تا ارتباطات میان پیشران‌ها شناسایی و تصویری جامع از روابط میان عوامل مؤثر ارائه شود. این رویکرد امکان پیش‌بینی دقیق‌تر و برنامه‌ریزی استراتژیک بهتر را فراهم می‌کند.

ب) تمرکز ویژه بر شرایط ایران: این پژوهش با بررسی سیاست‌ها، ظرفیت‌ها و چالش‌های خاص ایران در حوزه فناوری انرژی خورشیدی، تلاش می‌کند تا راهکارهایی عملی برای توسعه این فناوری ارائه دهد.

۳. روش‌شناسی

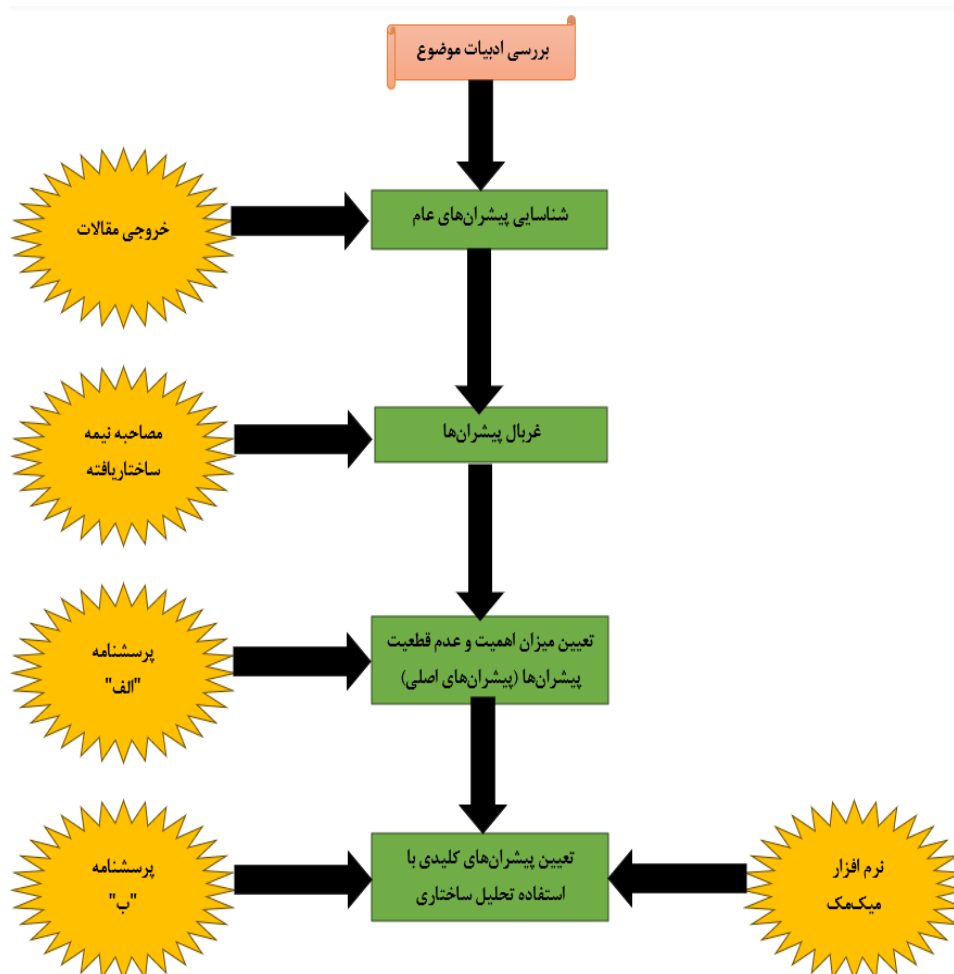
این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نوع آمیخته است. همچنین، از نظر چگونگی جمع‌آوری داده‌ها از دسته تحقیقات توصیفی - پیمایشی به حساب می‌آید. شیوه جمع‌آوری داده‌ها شامل مطالعات اسنادی و میدانی (پیمایشی) است. برای شناسایی و تحلیل ساختاری پیشران‌های مؤثر بر آینده فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر با تمرکز بر انرژی خورشیدی در ایران، از رویکرد مروری در ادبیات موضوع و روش تحلیل اثرات متقابل (تحلیل ساختاری) با استفاده از نرم‌افزار میک‌مک^۱ بهره گرفته شده است. در پژوهش حاضر نمونه آماری از طریق نمونه‌گیری غیراحتمالی قضاوتی (هدفمند) انتخاب شدند، زیرا تعداد افراد دارای ویژگی یا دسترسی به

آن‌ها در زمینه مورد مطالعه، محدود است. در پژوهش حاضر با رویکرد تحلیل ساختاری از روش نمونه‌گیری قضاوتی (هدفمند) و با شرط در دسترس بودن، نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که تا حد امکان ویژگی‌های جامعه واقعی، رعایت شود. بر اساس مطالعات پیشین در این زمینه، بین ۸ تا ۱۶ نفر خبره برای دستیابی به نتایج قابل اتکا کافی است [۲۰]. در نهایت، تعداد نهایی گروه خبرگان بر اساس نقطه اشباع نظری، ۱۲ نفر شامل ۳ نفر از اعضای هیئت علمی (آشنا به حوزه آینده‌پژوهی و انرژی‌های تجدیدپذیر) و ۹ نفر از مدیران و پژوهشگران حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه صنعت فناوری انرژی خورشیدی در بخش‌های دولتی و خصوصی (با حداقل ۵ سال سابقه تخصصی و حداقل مدرک کارشناسی ارشد) تعیین شدند. در مطالعه حاضر، با بهره‌گیری از مطالعات کتابخانه‌ای (فیش‌برداری، کتاب‌ها، پایان‌نامه‌ها و مقالات مرتبط) و مطالعات میدانی (مصاحبه نیمه‌ساختاریافته و پرسشنامه) نسبت به گردآوری داده‌ها و اطلاعاتی که احتیاج بود، اقدام شد. پرسشنامه‌های تحقیق (مطابق با پیوست) شامل دو پرسشنامه «الف» و «ب» است که از قرار زیر است:

پرسشنامه «الف»: در این پرسشنامه پیشران‌هایی که در فناوری انرژی تجدیدپذیر توسط خبرگان غربال شده‌اند، میزان اهمیت و عدم قطعیت آن‌ها با استفاده از طیف لیکرت پنج‌تایی توسط خبرگان مشخص می‌شود.

پرسشنامه «ب»: پرسشنامه دوم مربوط به تحلیل میک‌مک است که پیشران‌های اصلی که میزان اهمیت و عدم قطعیت بالایی دارند از طریق مقایسات زوجی مورد سنجش قرار می‌گیرد.

در ادامه، چارچوب انجام پژوهش در نمودار ۱ ارائه شده است که مراحل انجام آن در بخش یافته‌های پژوهش به صورت تفصیلی شرح داده خواهد شد تا روند انجام پژوهش و تحلیل داده‌ها به طور کامل مشخص شود.



نمودار ۱. چارچوب پژوهش

۴. یافته‌ها

۱) **شناسایی پیشران‌ها:** ابتدا عوامل مؤثر و نیروهای محرک توسعه فناوری انرژی خورشیدی در ایران از طریق بررسی ادبیات موضوع شناسایی شدند. این منابع شامل کتاب‌ها، مقالات علمی، گزارش‌های دولتی و اسناد بین‌المللی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر بودند. جدول ۱ پیشران‌های اولیه شناسایی شده از ادبیات موضوع و تجربیات نویسندگان را ارائه می‌دهد.

جدول ۱. شناسایی پیشران‌های اولیه از ادبیات موضوع

منبع	پیشران
[۹] و [۲۱]	زیرساخت انتقال و توزیع
محقق ساخته	رشد صنعتی
[۲۱] و [۲۲]	سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی
محقق ساخته	زیرساخت یکپارچه با شبکه
[۲۳]	مردمی‌سازی فناوری‌های نوین
محقق ساخته	عدم غفلت نسبت به فناوری
[۱۷] و [۱۹] و [۲۰]	بهره‌وری انرژی تجدیدپذیر
[۱۵] و [۲۰] و [۲۱]	انرژی جایگزین و متنوع
[۸] و [۲۲]	منابع انسانی متخصص
[۲۲] و [۲۳]	تحقیق و توسعه انرژی‌های پاک
[۱۶] و [۲۲]	تقاضای انرژی تجدیدپذیر
[۲۲] و [۲۴]	انتقال انرژی کم‌کربن
[۸] و [۲۵]	رقابت‌پذیری بین‌المللی
محقق ساخته	کاهش سطح موجودی منابع
[۴] و [۱۱]	تاب‌آوری سیستم انرژی در برابر تغییرات اقلیمی
[۳] و [۲۲]	تأثیرات زیست‌محیطی
[۶]، [۲۲]، [۲۴] و [۲۵]	تکنولوژی‌های نوظهور و پیشرفته
[۲۲] و [۲۳]	امنیت انرژی
[۲۶]	شرکت‌های دانش‌بنیان
[۱۵] و [۲۷]	ریز شبکه مبتنی بر اینورتر
[۱۰] و [۲۸]	الگوریتم‌های هوشمند
[۱۳] و [۲۹]	تحریم‌های خارجی
محقق ساخته	هزینه‌های سرمایه‌ای
[۱] و [۱۰]	هوش مصنوعی
[۲۱]، [۲۹] و [۳۰]	همکاری بین‌المللی در فناوری
[۲۲] و [۳۱]	طراحی بهینه سازمان‌ها

۲) **غربال پیشران‌ها:** پس از استخراج پیشران‌های اولیه، برای اعتبارسنجی محتوایی از طریق مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با خبرگان یک بازبینی تطبیقی انجام شد تا مشخص شود که آیا پیشران‌های اولیه با واقعیت‌های اجرایی و علمی منطبق هستند یا نیاز به اصلاح و غربال‌گری دارند. معیارهای اصلی برای غربال‌گری شامل موارد ذیل بودند:

- میزان تأثیرگذاری بر آینده فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی)؛
- میزان وابستگی به سایر پیشران‌ها و نقش کلیدی در سیستم؛
- ارتباط مستقیم با چالش‌های سیاست‌گذاری در ایران؛
- امکان سنجش و عملیاتی‌سازی در برنامه‌های توسعه‌ای.

سرانجام، این مرحله باعث اصلاح، تعدیل، ادغام و غربال‌سازی پیشران‌ها مطابق با جدول ۲ شد.

۳) **تعیین میزان اهمیت و عدم قطعیت پیشران‌ها:** در این مرحله از پرسشنامه «الف» (مطابق با پیوست) استفاده شد. در واقع، این پرسشنامه حاوی پیشران‌های غربال شده است که در آن میزان اهمیت و عدم قطعیت پیشران‌ها بر اساس طیف لیکرت

پنج‌تایی نمره‌دهی می‌شود تا خروجی آن که تعدادی پیشران اصلی است، به دست آید. برای تعیین پایایی پرسشنامه از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد که مقدار محاسبه شده ۰/۸۳+ نشانه پایایی نسبتاً مناسب ابزار جمع‌آوری داده‌هاست. با توجه به اینکه دامنه نمرات بین ۱ تا ۵ است، از این‌رو پیشران‌هایی که هم از لحاظ میزان اهمیت و هم از لحاظ میزان عدم قطعیت دارای میانگین بالای ۳ بودند، از اهمیت و عدم قطعیت بالاتری نسبت به دیگر پیشران‌ها برخوردار هستند. جدول ۳، پیشران‌های اصلی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. پیشران‌های غربال‌شده

ردیف	پیشران
۱	زیرساخت انتقال و توزیع
۲	نیروهای متخصص
۳	مردمی‌سازی فناوری‌های نوین
۴	بهره‌وری انرژی تجدیدپذیر
۵	انرژی جایگزین و متنوع
۶	تحقیق و توسعه انرژی‌های پاک
۷	تقاضای انرژی تجدیدپذیر
۸	تأثیرات زیست‌محیطی
۹	کاهش سطح موجودی منابع
۱۰	تاب‌آوری سیستم انرژی در برابر تغییرات اقلیمی
۱۱	تکنولوژی‌های نوظهور و پیشرفته
۱۲	شرکت‌های دانش‌بنیان
۱۳	همکاری بین‌المللی در فناوری
۱۴	هوش مصنوعی و شبکه‌های هوشمند
۱۵	تحریم‌های خارجی
۱۶	رشد صنعتی
۱۷	سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی
۱۸	هزینه‌های سرمایه‌ای

جدول ۳. پیشران‌های اصلی

نماد	پیشران
VAR01	زیرساخت انتقال و توزیع
VAR02	منابع انسانی متخصص
VAR03	بهره‌وری انرژی تجدیدپذیر
VAR04	تحقیق و توسعه انرژی‌های پاک
VAR05	تقاضای انرژی تجدیدپذیر
VAR06	تأثیرات زیست‌محیطی
VAR07	تاب‌آوری سیستم انرژی در برابر تغییرات اقلیمی
VAR08	تکنولوژی‌های نوظهور و پیشرفته جهانی
VAR09	همکاری‌های بین‌المللی در فناوری انرژی خورشیدی
VAR10	هوش مصنوعی و شبکه‌های هوشمند
VAR11	رشد صنعتی
VAR12	سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی

۴) تعیین پیشران‌های کلیدی با استفاده از تحلیل ساختاری: در این مرحله، پیشران‌های اصلی به صورت مقایسات زوجی در پرسشنامه «ب» (مطابق با پیوست) مورد بررسی قرار گرفتند و داده‌های پرسشنامه «ب» وارد نرم‌افزار میک‌مک شد. سرانجام، تعدادی پیشران که به عنوان مهم‌ترین پیشران‌های پژوهش حاضر یا پیشران‌های کلیدی هستند، استخراج می‌شود. به این‌صورت که در این مرحله، ۱۲ پیشران مهم تأییدشده از مرحله قبل، به صورت ماتریسی وارد نرم‌افزار

میک‌مک می‌شوند تا پیش‌ران‌های کلیدی برای تدوین سناریوها استخراج شوند. برای این منظور، پرسشنامه تحلیل ساختاری، با ماتریس اثرات مستقیم 12×12 طراحی شد و در اختیار خبرگان قرار گرفت. از خبرگان خواسته شد تا تأثیر عناصر (پیش‌ران) هر سطر را بر عناصر هر ستون با اعداد ۰ تا ۳ (بدون تأثیر، تأثیر کم، تأثیر متوسط و تأثیر زیاد) و یا حرف P (تأثیر بالقوه) امتیازدهی کنند. سرانجام، پرسشنامه‌های جمع‌آوری شده از خبرگان در قالب یک ماتریس اثرات متقاطع مطابق با جدول ۴ وارد نرم‌افزار میک‌مک شد. بر اساس شاخص‌های آماری، با دو بار چرخش داده‌ای، تحلیل ساختاری داده‌ها از مطلوبیت و بهینه‌شدگی ۱۰۰ درصد برخوردار شد که بیانگر روایی بالای پرسشنامه و پاسخ‌های آن بود.

جدول ۴. ماتریس اثرات متقاطع

	1 : Var01	2 : Var02	3 : Var03	4 : Var04	5 : Var05	6 : Var06	7 : Var07	8 : Var08	9 : Var09	10 : Var10	11 : Var11	12 : Var12
1 : Var01	0	1	3	2	3	3	3	2	1	1	3	1
2 : Var02	3	0	3	3	1	1	2	2	2	2	3	1
3 : Var03	1	1	0	1	2	3	3	1	1	1	2	1
4 : Var04	3	1	3	0	1	2	2	2	1	2	2	1
5 : Var05	1	1	2	1	0	3	2	2	2	1	1	2
6 : Var06	0	0	1	1	2	0	2	1	0	1	1	2
7 : Var07	1	0	1	1	1	2	0	1	1	1	2	1
8 : Var08	3	2	3	3	2	3	3	0	2	2	3	2
9 : Var09	2	2	3	2	2	2	2	3	0	2	3	2
10 : Var10	2	1	2	2	1	2	1	2	1	0	2	1
11 : Var11	1	1	1	2	3	3	2	1	1	1	0	1
12 : Var12	3	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	0

© LIPSOR-EPTA-MICMAC

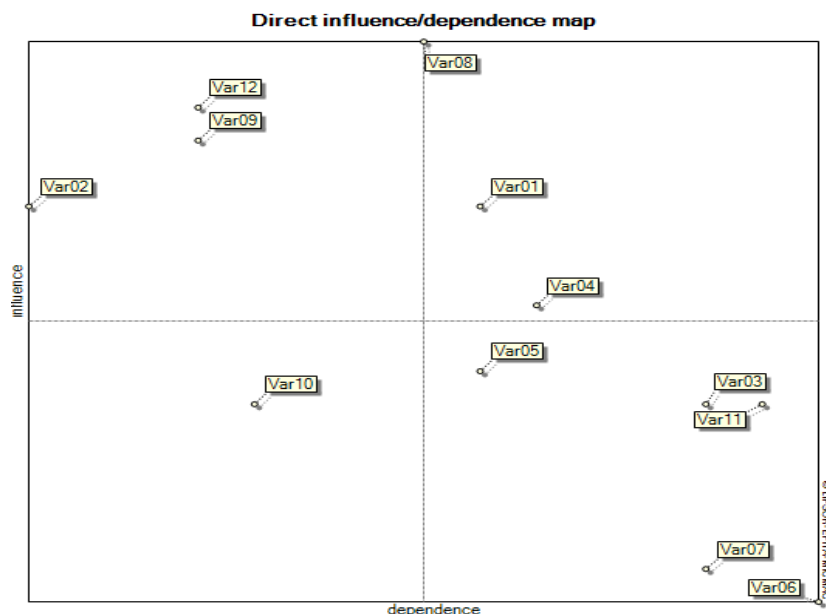
جدول ۵ که از نرم‌افزار میک‌مک استخراج شده است، نشان می‌دهد درجهٔ پرشدگی ماتریس $88/8$ درصد است یعنی عوامل ایجادشده تأثیر زیادی روی هم گذاشته‌اند. از مجموع 128 رابطهٔ قابل ارزیابی در این ماتریس، 16 رابطه، عددشان صفر بوده است که به این معناست عوامل بر همدیگر تأثیر نگذاشته یا از همدیگر تأثیر نپذیرفته‌اند. 48 رابطه عددشان یک بوده است؛ به این معنا تأثیر کمی نسبت به هم داشته‌اند. 51 رابطه عددشان دو بوده است؛ به این معنا که روابط تأثیرگذار متوسطی داشته‌اند. 29 رابطه عددشان سه بوده است؛ به این معنا که از تأثیرگذاری و تأثیرپذیری زیادی برخوردار بوده‌اند.

جدول ۵. مشخصات کلی از داده‌ها

Indicator	Value
Matrix size	12
Number of iterations	2
Number of zeros	16
Number of ones	48
Number of twos	51
Number of threes	29
Number of P	0
Total	128
Fill rate	88/88889%

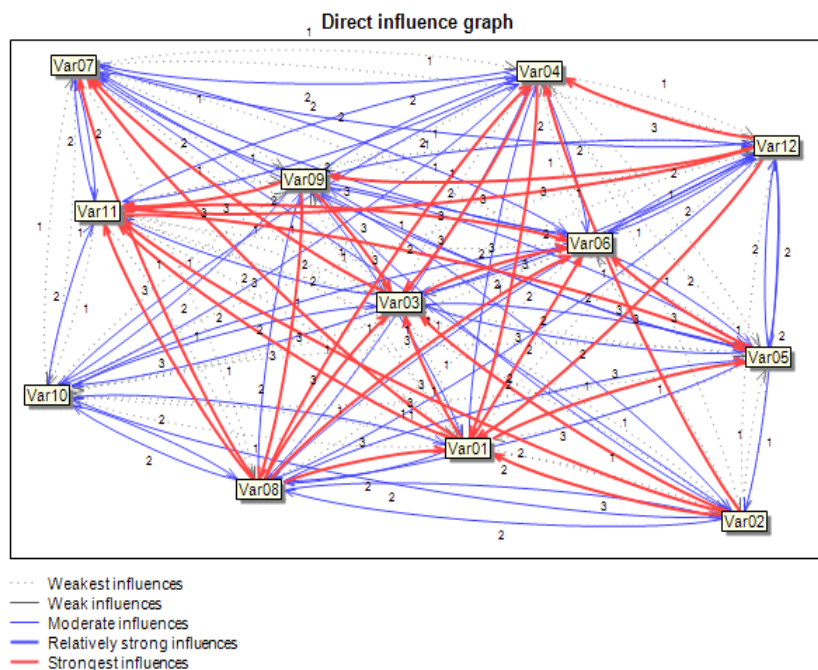
۴-۱) پراکندگی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری مستقیم متغیرها: همان‌گونه که در نقشهٔ پراکندگی حاصل از نرم‌افزار

میک‌مک در نمودار ۲ مشهود است، متغیرهای محرک و تأثیرگذار پژوهش متغیرهای ۱۲، ۹، ۲ و ۸ هستند، زیرا این متغیرها بیشترین تأثیرگذاری را دارند. متغیرهای ۱ و ۴ به دلیل قرار گرفتن در ربع دوم، متغیر پیوندی محسوب می‌شوند (یعنی هم از سایر پیش‌ران‌ها، تأثیر می‌پذیرند و هم تأثیر می‌گذارند). همچنین، متغیرهای ۵، ۳، ۱۱ و ۷ و ۶ متغیرهای تأثیرپذیر هستند. متغیر ۱۰ نیز به دلیل قرارگیری در ربع چهارم متغیر خودمختار محسوب می‌شود. بنابراین، پیش‌ران‌های محرک و کلیدی پژوهش شامل پنج متغیر ۱۲، ۹، ۲، ۸ و ۱ هستند (متغیر ۱ نیز به دلیل قرار گرفتن در بالای قطر ربع دوم، به عنوان پیش‌ران کلیدی محسوب می‌شود).



نمودار ۲. پراکندگی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری مستقیم متغیرها

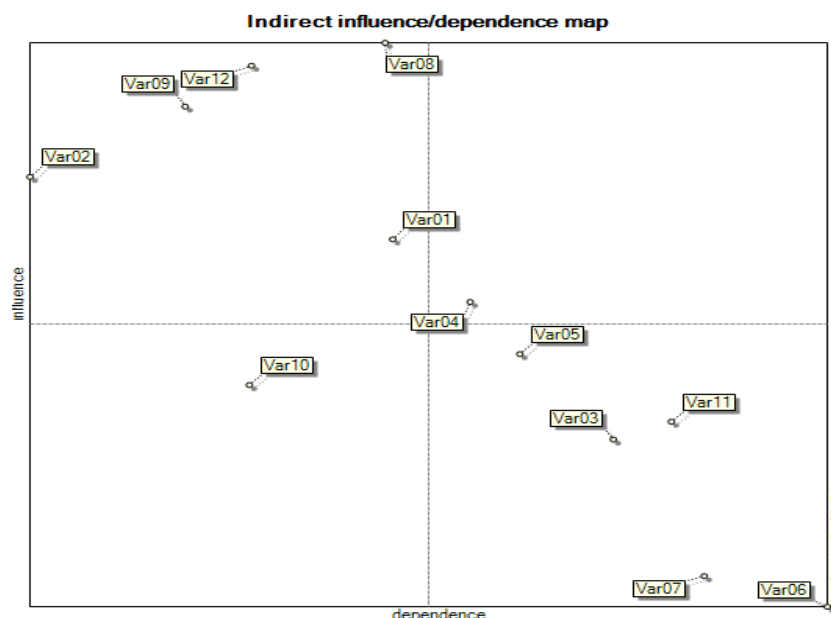
نمودار ۳، که نمودار تأثیرگذاری مستقیم نام دارد، نشان‌دهنده تأثیرات فوری و مستقیم متغیرها بر یکدیگر است. در این مدل، تنها تأثیراتی که یک متغیر مستقیم بر متغیر دیگر دارد نمایش داده می‌شود و معمولاً تعداد خطوط و ارتباطات کمتر است، زیرا فقط تأثیرات اولیه میان متغیرها در نظر گرفته می‌شود [۳۲]. بنابراین، نمودار تأثیرگذاری مستقیم برای تصمیم‌گیری‌های کوتاه‌مدت مفید است، زیرا نشان می‌دهد کدام متغیرها به صورت فوری و مستقیم تأثیرگذار هستند.



نمودار ۳. تأثیرگذاری مستقیم بین متغیرها

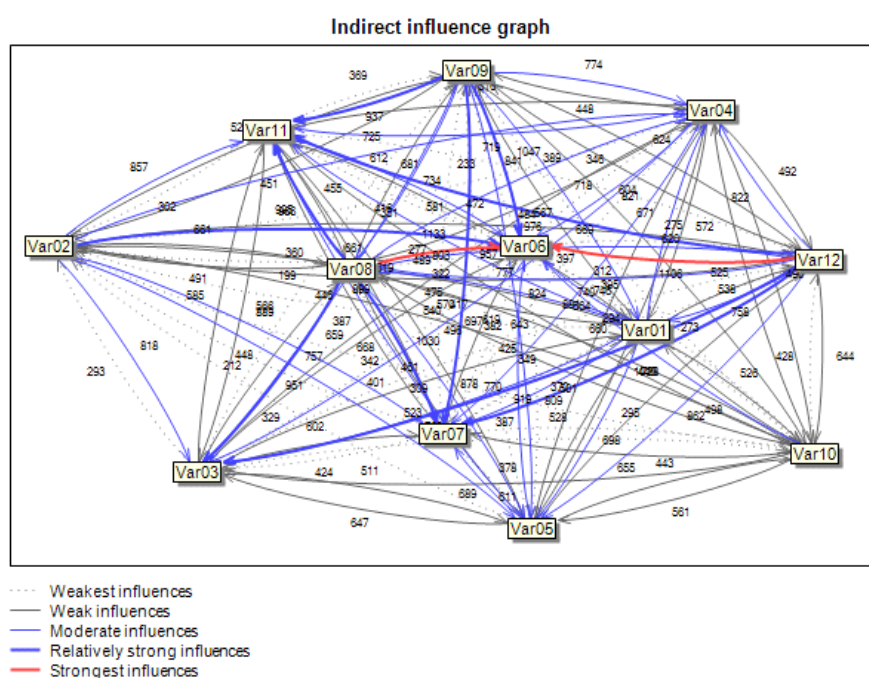
۲-۴) پراکندگی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری غیرمستقیم متغیرها: در نمودار ۴، پراکندگی متغیرهای تأثیرگذار و تأثیرپذیر غیرمستقیم مشهود است که در هر چهار ربع متغیرها به گونه‌ای خاص تقسیم شده‌اند. در واقع، این نمودار به خلاف نمودار ۲، که تأثیرات مستقیم را به نمایش گذاشته بود، تأثیرات غیرمستقیم را نشان می‌دهد که به نوبه خود این نوع از پراکندگی

نیز مهم است و برای تحلیل دقیق‌تر روابط بین متغیرها می‌تواند حائز اهمیت باشد. در این نمودار، برخی متغیرها دارای بیشترین ارتباطات و تأثیرگذاری بر سایر متغیرها هستند که نشان از نقش کلیدی آن‌ها دارد. به طور مشخص متغیرهای ۸، ۱۲، ۹، ۲ و ۱ بیشترین تأثیرگذاری را بر سایر متغیرها دارند.



نمودار ۴. پراکندگی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری غیرمستقیم متغیرها

نمودار ۵، که نمودار تأثیرگذاری غیرمستقیم نام دارد، نشان‌دهنده تأثیرات غیرمستقیم میان متغیرها در تحلیل ساختاری است؛ یعنی اثراتی که از طریق یک یا چند واسطه رخ می‌دهند. در این نمودار، اثرات تجمعی و سیستماتیک میان متغیرها مورد بررسی قرار می‌گیرد [۳۲]. نمودار تأثیرگذاری غیرمستقیم در تحلیل‌های استراتژیک و بلندمدت اهمیت دارد، زیرا اثرات تجمعی و پنهان متغیرها را مشخص می‌کند.



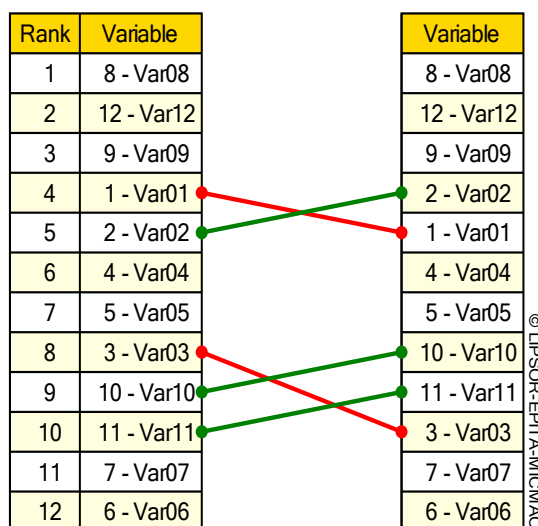
نمودار ۵. تأثیرگذاری غیرمستقیم بین متغیرها

برای یک برنامه‌ریزی جامع، باید از هر دو نمودار به صورت ترکیبی استفاده کرد: ابتدا متغیرهای تأثیرگذار در کوتاه‌مدت را شناسایی کرد (از نمودار تأثیرگذاری مستقیم) و سپس نقش آن‌ها در بلندمدت را بررسی کرد (از نمودار تأثیرگذاری غیرمستقیم).

۳-۴) رتبه‌بندی دو فهرستی بر اساس میزان اثرگذاری و تأثیرپذیری: نمودارهای ۶ و ۷ که بخشی از خروجی نرم‌افزار میک‌مک هستند، رتبه‌بندی متغیرها را به ترتیب براساس میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری نسبت به یکدیگر نشان می‌دهد. در این نمودارها خطوط قرمز نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه رتبه‌بندی بین دو طرف جدول است، که بیانگر این است که برخی متغیرها از نظر تأثیرگذاری و وابستگی رفتار متفاوتی دارند.

در نمودار ۶، متغیرها بر اساس میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر سایر متغیرها رتبه‌بندی شده‌اند. متغیرهای با رتبه‌های بالاتر، تأثیر بیشتری بر دیگر پیشران‌ها دارند و معمولاً نقش عوامل کلیدی را ایفا می‌کنند. یافته‌های حاصل از تحلیل ساختاری انجام‌شده توسط نرم‌افزار میک‌مک بیانگر آن است که به ترتیب متغیر هشتم: تکنولوژی‌های نوظهور و پیشرفته، متغیر دوازدهم: سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی، متغیر نهم: همکاری‌های بین‌المللی در فناوری، متغیر دوم: منابع انسانی متخصص و متغیر اول: زیر ساخت انتقال و توزیع، در زمره متغیرهای به شدت تأثیرگذار هستند که به عنوان پیشران‌های کلیدی آینده فناوری انرژی خورشیدی در ایران تعیین می‌شوند. بنابراین، برای آینده‌نگاری فناوری انرژی خورشیدی، سیاست‌گذاران باید روی این پنج پیشران کلیدی با توجه به روندهای آن تمرکز کنند.

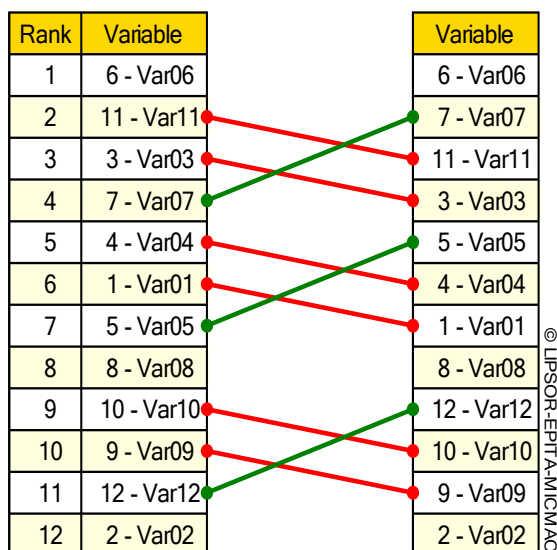
Classify variables according to their influences



نمودار ۶. رتبه‌بندی متغیرهای تأثیرگذار

در نمودار ۶، متغیرها بر اساس میزان تأثیرپذیری یا وابستگی آن‌ها بر سایر متغیرها رتبه‌بندی شده‌اند. متغیرهایی که در این رتبه‌بندی در جایگاه‌های بالاتری قرار دارند، بیشترین تأثیر را از سایر عوامل دریافت می‌کنند و معمولاً خروجی‌های سیستم محسوب می‌شوند. یافته‌های حاصل از تحلیل ساختاری انجام‌شده توسط نرم‌افزار میک‌مک بیانگر آن است که به ترتیب متغیر ششم: تأثیرات زیست‌محیطی، متغیر هفتم: تاب‌آوری سیستم انرژی در برابر تغییرات اقلیمی، متغیر یازدهم: رشد صنعتی، متغیر سوم: بهره‌وری انرژی تجدیدپذیر و متغیر پنجم: تقاضای انرژی تجدیدپذیر، در زمره متغیرهای به شدت وابسته به پیشران‌های کلیدی هستند که می‌توانند به عنوان شاخص‌های پایش توسعه فناوری انرژی خورشیدی در ایران به کار روند.

Classement par dépendance



نمودار ۷. رتبه‌بندی متغیرهای تأثیرپذیر

۴-۴) **تعیین پیشران‌های کلیدی:** در این مرحله، با توجه به میزان تأثیرگذاری مستقیم و غیرمستقیم پیشران‌ها، به‌ترتیب پنج پیشران کلیدی تأثیرگذار در آینده فناوری انرژی خورشیدی در ایران مطابق با جدول ۶ که در واقع سناریوهای آینده فناوری انرژی خورشیدی، حول محور این پنج پیشران تدوین می‌شوند، تعیین شدند.

جدول ۶. پیشران‌های کلیدی

اولویت	پیشران	نماد
اول	تکنولوژی‌های نوظهور و پیشرفته جهانی	VAR08
دوم	سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی	VAR12
سوم	همکاری‌های بین‌المللی در فناوری انرژی خورشیدی	VAR09
چهارم	منابع انسانی متخصص	VAR02
پنجم	زیرساخت انتقال و توزیع	VAR01

۵. بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با بررسی و مطالعه مقالات گوناگون در حوزه آینده انرژی‌های تجدیدپذیر، ابتدا به تعدادی پیشران اولیه دست یافت. پس از آن، با انجام مراحل همانند مصاحبه با خبرگان، تکمیل پرسشنامه عدم قطعیت و با استفاده از تحلیل ساختاری به پنج پیشران کلیدی شامل ۱. تکنولوژی‌های نوظهور و پیشرفته جهانی، ۲. سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی، ۳. همکاری‌های بین‌المللی در فناوری انرژی خورشیدی، ۴. منابع انسانی متخصص و ۵. زیرساخت انتقال و توزیع، دست یافت. ترکیب این عوامل، مسیرهای آینده متعددی را پیش روی این صنعت قرار می‌دهد که می‌تواند به شکوفایی یا رکود آن منجر شود.

یافته‌های این پژوهش با برخی مطالعات پیشین در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر همخوانی دارد، اما در برخی جنبه‌ها، تفاوت‌هایی نیز مشاهده شد. برای مثال، در پژوهش کاظمیان و همکاران (۱۳۹۶) [۳۳]، تکنولوژی‌های پیشرفته انرژی خورشیدی به عنوان یکی از پیشران‌های کلیدی معرفی شده است و بیان می‌کند که انرژی خورشیدی در ایران با روند جهانی قابل مقایسه نیست؛ یا در مطالعه‌ای دیگر، صالحی شیبستری و همکاران (۱۴۰۲) [۶] به بررسی فرصت‌ها، فناوری‌های آینده و لزوم توسعه انرژی خورشیدی در ایران پرداختند. آن‌ها بیان کردند که با توجه به میزان تابش خورشید در ایران، انرژی خورشیدی در میان سایر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر دارای پتانسیل بالایی برای توسعه در کشور است. این گزارش به بررسی فناوری‌های نوین در

حوزه پل‌های خورشیدی اختصاص دارد و ویژگی‌های این فناوری‌ها را به همراه عوامل فعال‌کننده و محدودکننده آن‌ها بررسی می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر در مورد وضعیت فعلی و آینده ایران در انرژی‌های تجدیدپذیر با تأکید بر انرژی خورشیدی، یافته‌ها نشان داد نخستین و مهم‌ترین پیشران هر تغییری، موافقت و حمایت دولت است، مشابه یافته‌های این پژوهش که سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی به عنوان پیشرانی مهم شناسایی شد. این امر در مورد انرژی‌های تجدیدپذیر نیز صادق است و ایجاد سازمان توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی به عنوان سازمان متولی توسعه این نوع انرژی، نخستین گام محسوب می‌شود. همچنین در پژوهش حاضر، منابع انسانی متخصص به عنوان یکی از پیشران‌های کلیدی توسعه فناوری انرژی خورشیدی در ایران شناسایی شد. این یافته با نتایج پژوهش‌های عبادی و همکاران (۱۴۰۲) [۳] و خیاطیان یزدی و همکاران (۱۴۰۰) [۹] که به بررسی سناریوهای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در چارچوب آینده‌پژوهی پرداختند، همخوانی دارد. در آن تحقیق، ۸ عامل اصلی به عنوان پیشران‌های کلیدی مؤثر انتخاب شدند که یکی از آن‌ها به اهمیت منابع انسانی متخصص اشاره دارد. پیشران زیرساخت انتقال و توزیع نیز در این پژوهش به عنوان پیشران کلیدی شناسایی شد. رازقی و ناصری (۱۴۰۲) [۱۴] نیز در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی و تحلیل سناریوهای مختلف برای استفاده از منابع تجدیدپذیر در سیستم انرژی پرداختند و لازمه اجرای سناریوها را آماده‌سازی زیرساخت‌های انتقال و توزیع برای تولید انرژی دانستند. بنابراین، مقایسه نتایج این پژوهش با تحقیقات پیشین نشان می‌دهد پیشران‌های شناسایی‌شده در این مطالعه، همسو با برخی یافته‌های قبلی است. این همسویی نشان‌دهنده اعتبار و دقت نتایج این پژوهش است که با ارائه تحلیل ساختاری و استفاده از نرم‌افزار میک‌مک، به درک عمیق‌تری از روابط بین این پیشران‌ها دست یافته است. این رویکرد می‌تواند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در تدوین استراتژی‌های مؤثر برای توسعه فناوری انرژی خورشیدی در ایران کمک کند.

با وجود تلاش برای ارائه تحلیلی جامع از پیشران‌های مؤثر بر آینده فناوری انرژی خورشیدی در ایران، این پژوهش با چند محدودیت مواجه است. نخست، شناسایی و تحلیل پیشران‌ها مبتنی بر نظرات خبرگان و استفاده از روش‌های ساختاری بوده است، که هرچند موجب افزایش دقت و انسجام یافته‌ها می‌شود، اما ممکن است تحت تأثیر سوگیری‌های شناختی و دیدگاه‌های محدود خبرگان قرار گیرد. دوم، ماهیت پویای فناوری‌های نوظهور و تغییرات سریع در سیاست‌های انرژی در سطح ملی و بین‌المللی، امکان تأثیرگذاری عواملی را که در این پژوهش در نظر گرفته نشده‌اند، افزایش می‌دهد. سوم، محدودیت‌های دسترسی به داده‌های دقیق و به‌روز در حوزه سرمایه‌گذاری‌های داخلی و بین‌المللی مرتبط با انرژی خورشیدی، ممکن است بر دقت تحلیل‌های آینده‌پژوهانه تأثیرگذار باشد. علاوه بر این، چالش‌های ناشی از عدم شفافیت سیاست‌های حمایتی و موانع حقوقی و اقتصادی، می‌تواند نتایج پژوهش را در گذر زمان دستخوش تغییر سازد. در نهایت، هرچند این پژوهش از رویکردهای علمی و روش‌های ساختاری برای تحلیل پیشران‌ها بهره برده است، اما بررسی تأثیرات متقابل پیشران‌ها بر یکدیگر در یک مدل پویا و شبیه‌سازی‌شده می‌تواند مسیرهای آینده را با دقت بیشتری مشخص کند، که این امر می‌تواند به عنوان یک مسیر پژوهشی برای مطالعات آتی پیشنهاد شود.

در نهایت، با توجه به اهمیت روزافزون انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌ویژه انرژی خورشیدی در تأمین نیازهای انرژی کشور، توجه ویژه به این پنج پیشران کلیدی می‌تواند نقشه راه روشنی برای توسعه فناوری انرژی خورشیدی در ایران فراهم کند. در صورت سرمایه‌گذاری مناسب و اتخاذ سیاست‌های هدفمند در این حوزه‌ها، ایران قادر خواهد بود ضمن کاهش وابستگی به منابع فسیلی، امنیت انرژی خود را تقویت کند و سهم انرژی خورشیدی را در سبد انرژی کشور افزایش دهد. تحقق این اهداف نه تنها منافع اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی به همراه خواهد داشت، بلکه جایگاه ایران را در عرصه انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح جهانی ارتقا خواهد داد. این پیشران‌ها از جنبه‌های گوناگون، نقشی تعیین‌کننده در موفقیت یا ناکامی آینده فناوری انرژی خورشیدی دارند که لازم است سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان حوزه انرژی در ایران براساس اولویت پیشران‌های کلیدی به‌ترتیب به نکات ذیل توجه ویژه‌ای کنند:

۱) تکنولوژی‌های نوظهور و پیشرفته جهانی مانند سلول‌های خورشیدی با بازده بالا، سیستم‌های ذخیره‌سازی پیشرفته و فناوری‌های هوشمند می‌توانند عملکرد و کارایی انرژی خورشیدی را به طور قابل توجهی بهبود بخشند. با این حال، هزینه بالای

این تکنولوژی‌ها و وابستگی به واردات، چالشی برای ایران است. دستیابی به تکنولوژی‌های نوین می‌تواند ایران را از وابستگی به فناوری خارجی رها کند و قدرت رقابت‌پذیری کشور را در بازار جهانی افزایش دهد. در واقع، فناوری‌های نوینی که در ساخت پنل‌های خورشیدی استفاده می‌شود، بسیار حائز اهمیت است و سبب افزایش راندمان تولید الکتریسیته توسط انرژی خورشیدی می‌شود. سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه داخلی، ایجاد مراکز تحقیقاتی تخصصی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و حمایت از شرکت‌های نوپا و استارت‌آپ‌های فناورانه می‌تواند راهکارهای عملی به منظور توسعه و بومی‌سازی این پیشران کلیدی باشند. همچنین، تدوین سیاست‌هایی برای جذب متخصصان ایرانی مقیم خارج و همکاری با دانشگاه‌های معتبر جهانی می‌تواند به توسعه و انتقال دانش فنی کمک کند.

۲) سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی نقش محوری در هدایت و تنظیم بازار انرژی‌های تجدیدپذیر دارند. سیاست‌های حمایتی از جمله ارائه یارانه‌ها، تسهیلات مالیاتی، و برنامه‌های تشویقی می‌توانند بخش خصوصی را برای سرمایه‌گذاری در این حوزه ترغیب کنند. در ایران، نبود سیاست‌های پایدار و قابل اعتماد، اغلب مانع رشد سرمایه‌گذاری در انرژی خورشیدی شده است. حمایت دولت می‌تواند ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش دهد و بخش خصوصی را برای مشارکت گسترده‌تر جذب کند. تدوین سیاست‌های شفاف و پایدار، تسهیلات مالیاتی، ایجاد صندوق‌های حمایتی ویژه برای توسعه انرژی خورشیدی و اصلاح نظام قیمت‌گذاری انرژی برای رقابتی‌تر کردن انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند راهکارهای عملی به منظور توسعه این پیشران کلیدی باشند. در این زمینه وزارت نیرو، وزارت صمت و سازمان محیط زیست باید با هماهنگی یکدیگر، چارچوبی منسجم و مشوق‌های کافی برای تسریع توسعه انرژی خورشیدی فراهم آورند.

۳) همکاری‌های بین‌المللی در فناوری انرژی خورشیدی می‌تواند به انتقال دانش و فناوری، دسترسی به سرمایه‌گذاری خارجی، و تسهیل پروژه‌های مشترک منجر شود. در حال حاضر، ایران با چالش‌هایی نظیر تحریم‌ها و محدودیت‌های سیاسی مواجه است که مانع بهره‌گیری از این فرصت‌ها می‌شود. بهره‌گیری از تجارب کشورهای پیشرو می‌تواند سرعت توسعه فناوری‌های خورشیدی را افزایش دهد. تلاش برای پیوستن به سازمان‌ها و کنسرسیوم‌های بین‌المللی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و همکاری‌های لازم با کشورهای دوست و همسو با ایران و نیز بهبود روابط بین‌المللی برای جذب سرمایه و دانش می‌تواند راهکارهای عملی در جهت توسعه این پیشران کلیدی باشند. به بیانی دیگر، دیپلماسی انرژی در ایران باید به گونه‌ای تنظیم شود که مسیر تعاملات فناورانه و جذب سرمایه‌گذاری خارجی هموار شود.

۴) منابع انسانی متخصص و مهارت‌محور نقش حیاتی در توسعه فناوری انرژی‌های خورشیدی دارند. برای ایجاد نوآوری و بهره‌گیری بهینه از ظرفیت‌های موجود، نیاز به نیروی کاری است که به‌خوبی با تکنولوژی‌های روز آشنا باشند. در ایران، ضعف در برنامه‌های آموزشی و کمبود زیرساخت‌های تحقیقاتی، مانعی بر سر راه توسعه این پیشران است. تربیت نیروی انسانی ماهر می‌تواند شکاف میان دانش تئوریک و کاربردی را پر کرده و بستری برای توسعه پایدار فناوری خورشیدی فراهم کند. تقویت برنامه‌های آموزشی در دانشگاه‌ها و مؤسسه‌های تحقیقاتی مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر و گسترش همکاری‌های علمی با دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی بین‌المللی می‌تواند راهکارهای عملی در جهت توسعه این پیشران کلیدی باشند. بنابراین، با توانمندسازی نیروی انسانی متخصص، کشور ایران خواهد توانست به سمت بومی‌سازی فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر حرکت کند.

۵) زیرساخت انتقال و توزیع یکی از محدودیت‌ها و چالش‌های اصلی توسعه انرژی خورشیدی است. شبکه‌های انتقال قدیمی و ناکارآمد می‌توانند مانع بهره‌برداری کامل از انرژی تولیدشده شوند. در ایران، این موضوع به دلیل تمرکز بر زیرساخت‌های فسیلی برجسته‌تر است. زیرساخت‌های کارآمد تضمین‌کننده استفاده بهینه از انرژی خورشیدی تولیدشده و جذب سرمایه‌گذاری‌های جدید خواهند بود. نوسازی شبکه‌های انتقال برق، کاهش تلفات انرژی در مسیر انتقال و ایجاد زیرساخت‌های هوشمند برای مدیریت توزیع انرژی خورشیدی می‌تواند راهکارهای عملی در جهت توسعه این پیشران کلیدی باشند. در واقع، با ایجاد زیرساخت‌های مناسب، می‌توان به ساخت نیروگاه‌های خورشیدی سرعت بخشید و با توجه به منطقه مورد نظر، نیروگاه‌های متصل به شبکه یا منفصل از شبکه ایجاد کرد. همچنین، با توسعه نیروگاه‌های خورشیدی متصل به شبکه و نیروگاه‌های مستقل در مناطق دورافتاده و دارای پتانسیل بالقوه انرژی خورشیدی می‌توان به توزیع عادلانه انرژی کمک کرد.

بنابراین، توسعه انرژی خورشیدی در ایران نیازمند یک رویکرد جامع و هماهنگ است که در آن هر یک از این پیشران‌ها باید به طور همزمان تقویت شوند. تنها از طریق تربیت نیروی انسانی متخصص، حمایت‌های دولتی پایدار، تقویت همکاری‌های بین‌المللی، دسترسی به فناوری‌های نوین و بهبود زیرساخت‌ها می‌توان به رشد پایدار این صنعت دست یافت. در واقع این پیشران‌های کلیدی، نیروهای محرکه آینده فناوری انرژی خورشیدی در ایران هستند که اگر سیاست‌گذاران حوزه انرژی به آن پیشران‌ها دقت ویژه‌ای کنند، می‌توانند نقشه راه درستی برای آینده انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی)، امنیت انرژی و افزایش سهم سبد انرژی خورشیدی در ایران ترسیم و تبیین کنند.

۶. پیشنهادها

با توجه به یافته‌های پژوهش، پیشنهادهای زیر برای سیاست‌گذاران، صنعتگران و پژوهشگران حوزه فناوری انرژی خورشیدی در ایران ارائه می‌شود:

- ایجاد و تقویت مراکز تحقیق و توسعه (R&D) در حوزه انرژی خورشیدی: سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه فناوری‌های پیشرفته مانند سلول‌های خورشیدی با راندمان بالا، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های هوشمند می‌تواند به کاهش وابستگی به فناوری‌های خارجی و ارتقای رقابت‌پذیری ایران در این صنعت کمک کند.
 - اصلاح سیاست‌های حمایتی و تدوین یک چارچوب پایدار: دولت باید با تدوین سیاست‌های حمایتی پایدار، نظیر ارائه یارانه‌ها، تسهیلات مالیاتی و قراردادهای خرید تضمینی برق، شرایط جذابی برای سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در انرژی خورشیدی فراهم کند. شفافیت در سیاست‌گذاری و ایجاد مکانیزم‌های نظارتی برای تضمین اجرای مؤثر این سیاست‌ها نیز ضروری است.
 - توسعه همکاری‌های بین‌المللی و انتقال فناوری: ایجاد بسترهای مناسب برای همکاری‌های علمی و صنعتی با کشورهای پیشرو در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، نظیر مشارکت در کنسرسیوم‌های بین‌المللی و پروژه‌های مشترک، می‌تواند به انتقال دانش و فناوری و همچنین، جذب سرمایه‌گذاری خارجی در این حوزه کمک کند.
 - توانمندسازی و آموزش نیروی انسانی متخصص: با توجه به اهمیت نیروی انسانی در توسعه فناوری‌های نوین، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های آموزشی در دانشگاه‌ها و مؤسسه‌های تحقیقاتی بر اساس نیازهای روز صنعت انرژی خورشیدی اصلاح شود و دوره‌های آموزشی عملی و کارآموزی برای تربیت نیروی انسانی ماهر گسترش یابد.
 - به‌روزرسانی و توسعه زیرساخت‌های انتقال و توزیع برق: نوسازی شبکه برق کشور و ایجاد زیرساخت‌های هوشمند برای مدیریت بهینه توزیع انرژی خورشیدی می‌تواند از هدررفت انرژی جلوگیری کند و بهره‌وری نیروگاه‌های خورشیدی را افزایش دهد. همچنین، توسعه شبکه‌های برق منطقه‌ای و ایجاد نیروگاه‌های خورشیدی مستقل از شبکه (Off-grid) برای مناطق دارای پتانسیل بالقوه انرژی خورشیدی می‌تواند دسترسی پایدار به انرژی را تضمین کند.
- در پایان نیز پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی به شرح ذیل ارائه می‌شود:
- بررسی آینده توسعه فناوری انرژی خورشیدی در ایران با روش تحلیل سناریو و آینده‌پژوهی؛
 - استفاده از روش پویایی سیستم‌ها برای بررسی تعامل و تأثیر متقابل پیشران‌های توسعه فناوری انرژی خورشیدی در ایران؛
 - بررسی رفتار ذی‌نفعان مختلف (سرمایه‌گذاران، سیاست‌گذاران، مصرف‌کنندگان) در توسعه فناوری‌های انرژی خورشیدی با استفاده از مدل‌سازی عامل‌محور؛
 - تحلیل تأثیر متغیرهای اجتماعی، اقتصادی و فناورانه بر پذیرش فناوری‌های خورشیدی در ایران با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری؛
 - تحلیل بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های خورشیدی با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری؛
 - بررسی عوامل ریسک سرمایه‌گذاری در حوزه انرژی خورشیدی با مدل‌های شبیه‌سازی؛
 - تحلیل نقش و تعاملات بازیگران کلیدی (شرکت‌های فناوری، دولت، پژوهشگران) در توسعه فناوری‌های خورشیدی در ایران با استفاده از روش تحلیل شبکه اجتماعی؛
 - تحلیل سیاست‌های انرژی خورشیدی با استفاده از روش‌های اقتصادسنجی.

منابع

- [1] Akhlaghi MM, Shafiei Alavijeh A, Hosseinalizadeh R, Nasri S, Ghazinoory S. Systematic failures in the development of photovoltaic systems: The case study of Iran's solar energy. *Energy Strategy Reviews*. 2025; 57:101637.
- [2] Herbst JM, Grant-Smith D. Tapping into new power opportunities and challenges for growing community renewable energy. 1st ed. London: Imprint Routledge; 2020.
- [3] Ebadi H, Mohammadi Dechashmeh M, Safaipoor M, Sajjadian N. Compilation of renewable energy development scenario in Ahvaz metropolis. *Future Cities Vision Quarterly*. 2023;4(16):59-79. [Persian].
- [4] Ren B. Advancing the Global Renewable Energy Transition. Paris: France. Sadorsky P. Some future scenarios for renewable energy. 2017; 43(1):1091-1104.
- [5] Mansouri S, Maleki A. Analysis of Iran's primary energy portfolio, its future and recommendations for optimization. *Strategic Management and Future Research Quarterly*. 2023;2(6):103-115. [Persian].
- [6] Salehi Shabestari A, Khakzad Shahandeshti A, Pirmohammadi M. Investigating opportunities, future technologies and the necessity of developing solar energy in Iran. 31st Annual International Conference of Iranian Mechanical Engineering and 9th Conference of Iranian Power Plant Industry. 2023. [Persian].
- [7] Fartash K, Khayatian-Yazdi MS, Ghorbani A. Photovoltaic Technological Niche Development in Iran with Strategic Niche Management Perspective. *Science and Technology Policy Quarterly*. 2020;13(1):37-54.
- [8] Keshavarzturk A, Barat N. Future studies in urban planning and management. *Information Technology Management and Document Center*. 2012;(22). [Persian].
- [9] Khayatiyan-Yazdi MS, Fartash K, Ghorbani A. Renewable energy development scenarios in the horizon of 1420 with a futures research approach. *Management Futures Research Quarterly*. 2021;31(127). [Persian].
- [10] Hongqiao P, Yuanyuan L, Hui S, Zhengmin Z, Yuliang L. Extreme scenario generation for renewable energies. *IET Smart Grid*. 2024; 7(2):130-141.
- [11] Farahat A, Labban A, Mashat A, Hasanean H, Kambezidis H. Status of solar-energy adoption in GCC, Yemen, Iraq, and Jordan: Challenges and carbon-footprint analysis. *Clean Technologies*. 2024.
- [12] Marfuga I, Maria F, William M, Agata D. Who finances renewable energy in Europe? Examining temporality, authority and contestation in solar and wind subsidies in Poland, the Netherlands and the United Kingdom. *Energy Strategy Reviews*. 2021; 38(8):1-16.
- [13] Shirijian M, Seraj H. Future research on new energies in the world in order to analyze and provide appropriate strategies to enhance Iran's energy security. *Quarterly Journal of Defense Economics*. 2020;5(16):150-115. [Persian].
- [14] Razeghi M, Naseri A. Simulation and analysis of different scenarios for the use of renewable resources in the energy system of Fars province, emphasizing the role of cooling. *Journal of Sustainable Energy Systems*. 2023;2(2):143-165.
- [15] Odhiambo MO, Abbas A, Wang X, Mutinda G. Solar energy potential in the Yangtze River Delta region: A GIS-based assessment. *Energies*. 2020;14(1):143.
- [16] WEC. World Energy Scenarios: Exploring Innovation Pathways to 2040. London: UK; 2019.31:1-6.
- [17] Gielen D, Boshell F, Saygin D, Bazilian MD, Wagner N, Gorini R. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*. 2019; 24:38-50.
- [18] Honga J, Kima J, Sona W, Shina H, Kima N, Leeb W, et al. Long-term energy strategy scenarios for South Korea: Transition to a sustainable energy system. *Energy Policy*. 2019; 127:425-437.
- [19] Rostami S, Anousheh M, Darvishi-Sehtalabi F, Keshavarz-Torq A, Mohammad-Hosseini B. Developing a paradigmatic model of entrepreneurship development in the field of renewable energies: Applying a futures research approach. *Journal of Entrepreneurship Studies and Sustainable Agricultural Development*. 2023;10(3):116-95. [Persian].

- [20] Qiyasi Fard, N., Mohebbi, H., Nabi Meybodi, M. Analysis of barriers to entrepreneurship development in deprived areas using Delphi and ANP methods. *Journal of Entrepreneurship Development*, 2023; 16(1): 61-76. [Persian].
- [21] O'Sullivan M, Overland I, Sandalow D. The geopolitics of renewable energy. Columbia Center on Global Energy Policy and Harvard Belfer Center for Science and International Affairs, Working Paper. 2017;17(27):1-55.
- [22] Ghafarpour R. Optimal design of renewable energy systems for border bases considering inter-base fuel supply system. *Scientific Journal of Modern Science and Technologies of Modern Defense*. 2020;11(2):135-143. [Persian].
- [23] Research Center of the Islamic Consultative Assembly. Emphasis on the transfer and popularization of modern defense technologies as a driver for other industries in the country. Iranian Students News Agency (ISNA). 2022. [Persian].
- [24] Cheung T, Oßenbrugge J. Governing urban energy transitions and climate change: Actions relations and local dependencies in Germany. *Energy Research & Social Science*. 2020; 69:101728.
- [25] Ghaemi Rad M, Shahin A. Development of solar energy technologies in Iran: SWOT and DEMATEL methods. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*. 2017; 2(4):97-130.
- [26] Mehdizadeh-Bahmanabad A, Payandeh R, Shaishasal M. Identifying the drivers of technological cooperation between large companies and knowledge-based companies; The case study of Iran's National Copper Industry Company. *Improvement Management*. 2024;18(1):1-26. [Persian].
- [27] Toscan A, Siqueira J, Tokura L, Nogueira C, Vidotto M. Photovoltaic solar energy in Brazil: A review. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*. 2024.
- [28] Cotten A, Forehand DI. Multi-objective optimisation of a sloped-motion, multibody wave energy converter concept. *Renewable Energy*. 2022; 194:307-320.
- [29] Shokri M, Esmaili-Ardakani A. Political economy of renewable energies and Iran's future scenarios in the perspective of energy transition in 2050. *Iranian Energy Economics Research Journal*. 2022;12(45):11-39. [Persian].
- [30] Abbasiguderzi A, Maleki A. Policymaking of the Islamic Republic of Iran in the optimal use of renewable energy sources. *Strategic Studies of Public Policy*. 2017; 7(23):159-174. [Persian].
- [31] Mohammadi-de-Cheshmeh M, Safai-pour M, Sajjadian N, Ebadi H. Feasibility study of the development of urban renewable energies in Ahvaz with a passive defense approach. *Scientific Journal of Geography and Environmental Planning*. 2023;35(1):19-44. [Persian].
- [32] Mohebbi, H., Amiri, Y. Structural Leveling of strategic objectives in Iran Alloy Steel Company. *Journal of Strategic Management Studies*, 2021; 12(45): 205-224. [Persian].
- [33] Kazemian G, Rasouli A, Khazaei M.M. The position of new renewable energies in making cities sustainable (case study: Tehran). *Research and Urban Planning*. 2017;8(29):99-118. [Persian].

پیوست

پرسشنامه الف: تعیین میزان اهمیت و عدم قطعیت پيشران‌ها

عدم قطعیت					میزان اهمیت					پیشران‌ها
خ. زیاد	زیاد	متوسط	کم	خ. کم	خ. زیاد	زیاد	متوسط	کم	خ. کم	
										زیرساخت انتقال و توزیع
										رشد صنعتی
										سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی
										تحریم خارجی
										مردمی‌سازی فناوری‌های نوین
										عدم غفلت نسبت به فناوری
										بهره‌وری انرژی
										انرژی جایگزین و متنوع
										منابع انسانی متخصص
										تحقیق و توسعه انرژی‌های پاک
										تقاضای انرژی تجدیدپذیر
										هزینه‌ها سرمایه‌ای
										هوش مصنوعی
										کاهش سطح موجودی منابع
										تاب‌آوری انرژی در برابر تغییرات اقلیمی
										تکنولوژی‌های نوظهور و پیشرفته
										شرکت‌های دانش‌بنیان
										همکاری بین‌المللی در فناوری

پرسشنامه ب: تحلیل ساختاری (میکمک)

	Var01	Var02	Var03	Var04	Var05	Var06	Var07	Var08	Var09	Var10	Var11	Var12
Var01												
Var02												
Var03												
Var04												
Var05												
Var06												
Var07												
Var08												
Var09												
Var10												
Var11												
Var12												

Var01؛ زیر ساخت انتقال و توزیع

Var02؛ منابع انسانی متخصص

Var03؛ بهره‌وری انرژی تجدیدپذیر

Var04؛ تحقیق و توسعه انرژی‌های پاک

Var05؛ تقاضای انرژی تجدیدپذیر

Var06؛ تأثیرات زیست محیطی

Var07؛ تاب‌آوری انرژی در برابر تغییرات اقلیمی

Var08؛ دستیابی به تکنولوژی‌های نوظهور و پیشرفته

Var09؛ همکاری بین‌المللی در فناوری

Var10؛ هوش مصنوعی و شبکه‌های هوشمند

Var11؛ رشد صنعتی

Var12؛ سیاست‌ها و حمایت‌های دولتی

0=ارتباطی ندارد

1=ارتباط ضعیف

2=ارتباط متوسط

3=ارتباط قوی

P=ارتباط بالقوه