

Prioritizing Renewable-Digital Hybrid Technology Bundles for Iran's Energy Transition: A Causal Network-Based Fuzzy DANP Framework in the Industry 4.0 Era

Yasser Emamian¹, SeyedMoslem Mousavi Dorcheh ^{*1}

1. Assistant Professor, Development Studies, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran

*. Corresponding Author: mousavi@irost.ir

Received: 26 December 2025

Revised: 18 May 2026

Accepted: 18 May 2026

Abstract

Iran's energy sector faces the dual challenges of supply-demand imbalance and the imperative for a low-carbon transition. Evaluating modern energy technologies within the Industry 4.0 and Energy 4.0 paradigms necessitates approaches capable of modeling the complex causal relationships among technical, economic, environmental, and social criteria, particularly with a focus on digitalization. This study aims to develop and apply an integrated Fuzzy DANP-based framework for prioritizing renewable-digital hybrid technology bundles in Iran. This applied research adopts a mixed-method (survey-analytical) approach. The study population comprised experts in energy, information technology, industrial policy-making, and academia in the fields of energy and information technology in Iran. Twelve participants were selected via purposive sampling based on criteria including a minimum of 10 years of specialized experience. Data collection instruments included fuzzy pairwise comparison and performance evaluation questionnaires. For data analysis, the Fuzzy DANP method (integrating Fuzzy DEMATEL and Fuzzy ANP) was employed to model the causal network relationships among criteria and calculate dependency-based weights. Fuzzy data were aggregated and finalized using the Center of Area (COA) defuzzification method. The causal network analysis (Fuzzy DEMATEL) identified 'Digitalization Capability' as a key causal factor with a Prominence-Cause (D-R) value of $+1.96 \pm 0.23$, significantly influencing economic and environmental criteria. Based on the dependency-based weights derived from Fuzzy ANP, the final ranking of hybrid bundles was: Solar-Digital Bundle (Score: 0.823), Wind-Digital Bundle (0.761), and Hydro-Digital Bundle (0.654). Sensitivity analysis, involving $\pm 20\%$ variations in the weights of key causal criteria, confirmed the stability of this ranking. The proposed framework, by revealing the central role of digitalization as a systemic driver, provides a more powerful and practical tool for policymakers. The findings suggest that Iran's energy policy should move beyond merely supporting renewable technologies and focus on fostering investment in integrated smart hybrid bundles, particularly solar-digital systems.

Keywords: Energy Transition; Industry 4.0; Fuzzy DANP; Renewable-Digital Hybrid Technology Bundles; Multi-Criteria Decision Making (MCDM); Digitalization Capability; Causal Network Analysis.

Citation: Emamian, Y., & Mousavi Dorcheh, S. M. (2026). Prioritizing Renewable-Digital Hybrid Technology Bundles for Iran's Energy Transition: A Causal Network-Based Fuzzy DANP Framework in the Industry 4.0 Era. *Journal of Technology Development Management*, 13(2), 41–66. <https://doi.org/10.22104/jtdm.2026.8090.3489>

اولویت‌بندی بسته‌های فناوری هیبریدی تجدیدپذیر-دیجیتال در گذار انرژی ایران: یک چارچوب

مبتنی بر شبکه‌ی علی DANP فازی در عصر صنعت نسل چهارم

یاسر امامیان^۱؛ سید مسلم موسوی درچه^{۱*}

۱. استادیار پژوهشکده مطالعات فناوری‌های نوین، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

*. نویسنده مسئول: mousavi@irost.ir

پذیرش: ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۵

بازنگری: ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۵

دریافت: ۵ دی ۱۴۰۴

چکیده

بخش انرژی ایران با چالش‌های دوگانه ناترازی عرضه-تقاضا و ضرورت گذار به سمت منابع کم‌کربن مواجه است. ارزیابی فناوری‌های نوین در عصر صنعت و انرژی نسل چهارم نیازمند رویکردهایی است که بتوانند روابط علی پیچیده بین معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی، به ویژه با محوریت دیجیتال‌سازی، را مدل‌سازی کنند. هدف این پژوهش، ارائه و کاربرد یک چارچوب یکپارچه مبتنی بر دنپ فازی برای اولویت‌بندی بسته‌های فناوری هیبریدی تجدیدپذیر-دیجیتال در ایران است. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، ترکیبی است. جامعه آماری، خبرگان صنعت انرژی، فناوری اطلاعات، سیاست‌گذاری صنعتی و دانشگاه در حوزه انرژی، فناوری اطلاعات در ایران بودند و با روش نمونه‌گیری هدفمند و معیارهایی چون حداقل ۱۰ سال سابقه تخصصی، ۱۲ نفر به عنوان نمونه انتخاب شدند. ابزار پژوهش، پرسشنامه‌های مقایسات زوجی فازی و ارزیابی عملکرد بود. داده‌های فازی با روش مرکز ثقل تجمیع و نهایی شدند. تحلیل شبکه علی نشان داد معیار قابلیت دیجیتال‌شدگی با شاخص تاثیرگذاری (D-R) مثبت $1,96 \pm 0,23$ ، یک علت کلیدی است که بر معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی تاثیر معناداری می‌گذارد. بر اساس وزن‌های وابسته به روابط استخراج‌شده از دنپ فازی، رتبه‌بندی نهایی بسته‌های هیبریدی به ترتیب خورشیدی-دیجیتال (امتیاز ۰,۸۲۳)، بادی-دیجیتال (۰,۷۶۱) و آبی-دیجیتال (۰,۶۵۴) بدست آمد. تحلیل حساسیت با تغییر $\pm 20\%$ وزن معیارهای شبکه علی، پایداری این رتبه‌بندی را تأیید کرد. چارچوب پیشنهادی، با آشکارسازی نقش محوری دیجیتال‌سازی به عنوان یک محرک سیستمی، ابزار قدرتمند و عملی‌تری در اختیار سیاست‌گذاران می‌گذارد. یافته‌ها حاکی از آن است که سیاست‌گذاری انرژی ایران باید از حمایت صرف از فناوری‌های تجدیدپذیر فراتر رفته و بر توسعه و تسهیل سرمایه‌گذاری در بسته‌های هیبریدی هوشمند، به ویژه بسته خورشیدی-دیجیتال، متمرکز شوند.

کلمات کلیدی: گذار انرژی، صنعت نسل چهارم، دنپ فازی، بسته فناوری هیبریدی تجدیدپذیر-دیجیتال،

تصمیم‌گیری چندمعیاره، قابلیت دیجیتال‌شدگی، تحلیل شبکه علی.

مقدمه

امنیت و پایداری سیستم انرژی، یکی از ارکان اساسی توسعه اقتصادی و اجتماعی در جهان معاصر محسوب می‌شود. با این حال، بسیاری از اقتصادهای در حال توسعه، از جمله ایران، با چالش‌های عمیقی در این حوزه روبرو هستند. از یک سو، رشد فزاینده تقاضای انرژی تحت تاثیر توسعه صنعتی و بهبود سطح زندگی و از سوی دیگر، وابستگی شدید به منابع فسیلی پایان‌پذیر، سیستم انرژی این کشورها را در برابر شوک‌های بیرونی و فشارهای زیست‌محیطی آسیب‌پذیر ساخته است (بای^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). در مواجهه با این چالش‌های دوگانه، گذار به سمت یک سبد انرژی متنوع، کم‌کربن و تاب‌آور به یک ضرورت راهبردی تبدیل شده است. در این گذار، فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر به دلیل پتانسیل بالا در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ایجاد امنیت انرژی و تحریک رشد اقتصادی از طریق ایجاد مشاغل جدید، نقشی محوری ایفا می‌کنند (ورچوتا^۲ و همکاران، ۲۰۲۰).

انتخاب و توسعه بهینه این فناوری‌ها، امری پیچیده و چندبعدی است. گزینه‌های مختلفی مانند نیروگاه‌های خورشیدی، بادی، آبی و زیست‌توده، هر یک دارای مشخصات فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی متمایزی هستند. مقایسه و رتبه‌بندی این گزینه‌ها مستلزم در نظر گرفتن همزمان معیارهای متنوعی از قبیل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، قیمت تمام‌شده تولید برق، پتانسیل منابع داخلی، میزان اشتغال‌زایی، قابلیت اطمینان و تاثیرات زیست‌محیطی است. این پیچیدگی ذاتی، لزوم به کارگیری رویکردهای نظام‌مند تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) را برای کمک به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان انرژی بیش از پیش آشکار می‌سازد (لینکو^۳ و همکاران، ۲۰۰۶).

همزمان، ظهور و گسترش پارادایم صنعت نسل چهارم یا چهارمین انقلاب صنعتی، منظر کاملاً جدیدی را در مدیریت و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی گشوده است (جیموال^۴ و همکاران، ۲۰۲۱). این پارادایم بر پایه یکپارچه‌سازی فناوری‌های دیجیتال پیشرفته‌ای مانند اینترنت اشیا، داده‌های بزرگ، هوش مصنوعی و سیستم‌های سایبر-فیزیکی استوار است (ژو^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). ادغام این فناوری‌ها با زیرساخت‌های انرژی، خلق شبکه‌های هوشمند و سیستم‌های انرژی یکپارچه دیجیتال را ممکن ساخته که در آن، تولید، انتقال، توزیع و مصرف انرژی با کارایی و انعطاف‌پذیری بی‌سابقه‌ای مدیریت می‌شود (بونیللا^۶ و همکاران، ۲۰۱۸). پژوهش‌های اخیر نشان

¹ Bai

² Vrchota

³ Linkov

⁴ Jamwal

⁵ Xu

⁶ Bonilla

می‌دهند که فناوری‌های صنعت نسل چهارم می‌توانند به عنوان عوامل میانجی قدرتمندی عمل کنند که کارایی عملیاتی و زیست‌محیطی فناوری‌های تجدیدپذیر را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند (شهباز^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). برای نمونه، استفاده از حسگرهای اینترنت اشیا و تحلیل داده‌های بزرگ می‌تواند نگهداری پیش‌بینانه توربین‌های بادی را ممکن ساخته و تولید آن‌ها را بهینه کند (آگراوال^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). یکپارچه‌سازی دیجیتال حتی می‌تواند تا ۴۰٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی ایجاد کند (فرقالی^۳ و همکاران، ۲۰۲۳).

این همگرایی، منجر به شکل‌گیری مفهومی می‌شود که در این پژوهش با عنوان بسته فناوری هیبریدی تجدیدپذیر-دیجیتال مورد بررسی قرار می‌گیرد (برای تعریف مبسوط مفهومی، رجوع شود به بخش ۲.۳). به طور خلاصه، یک بسته هیبریدی، ترکیبی هدفمند از یک فناوری تجدیدپذیر پایه (مانند مزرعه خورشیدی) با یک یا چند فناوری دیجیتال مکمل (مانند سامانه‌های نظارت و کنترل هوشمند) است که در کنار یکدیگر، ارزش و عملکردی برتر از مجموع اجزای خود خلق می‌کنند (موسا^۴ و همکاران، ۲۰۲۲). ارزیابی و اولویت‌بندی این بسته‌های هیبریدی، در مقایسه با ارزیابی فناوری‌های منفرد، به مراتب پیچیده‌تر است. این پیچیدگی ناشی از ماهیت چندلایه و به هم پیوسته معیارهای ارزیابی، وجود وابستگی‌ها و روابط علی بین این معیارها مانند تاثیر قابلیت دیجیتال‌شدگی بر هزینه عملیاتی و قابلیت اطمینان و همچنین نقش محوری عدم قطعیت در قضاوت‌های انسانی است (چارفدین و اوملای^۵، ۲۰۲۳ و الکاران^۶ و همکاران، ۲۰۲۴).

علیرغم این پیچیدگی، اکثر مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره متداول در حوزه برنامه‌ریزی انرژی، از ساختارهای ایستا و سلسله‌مراتبی ساده بهره می‌برند که در آن معیارها مستقل از یکدیگر فرض شده و روابط علی و شبکه‌ای بین آن‌ها نادیده گرفته می‌شود (فورستناو^۷ و همکاران، ۲۰۲۰). این شکاف روش‌شناختی می‌تواند منجر به ارائه تصویری ناقص و گمراه‌کننده از اولویت‌های فناورانه شده و در نهایت، به اتخاذ تصمیمات سرمایه‌گذاری زیربینه بیانجامد.

هدف اصلی این پژوهش، پر کردن این شکاف از طریق توسعه و ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری شبکه‌ای علی، یکپارچه و قوی برای اولویت‌بندی بسته‌های فناوری هیبریدی تجدیدپذیر-دیجیتال است. هسته تحلیلی این چارچوب، روش آزمایش و ارزیابی تصمیم‌گیری مبتنی بر فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی می‌باشد. این روش با تلفیق

¹ Shahzad

² Agrawal

³ Farghali

⁴ Moussa

⁵ Charfeddine & Umlai

⁶ Alkaraan

⁷ Furstenu

منطق فاز ۱ برای مدلسازی عدم قطعیت در نظرات خبرگان و روش دنپ فاز ۱ برای شناسایی و کمی‌سازی روابط علی و ساختار شبکه‌ای میان معیارها، ظرفیت منحصربه‌فردی برای مواجهه با مسائل پیچیده در محیط‌های دارای ساختار وابستگی متقابل مانند صنعت انرژی در عصر صنعت نسل چهارم دارا است (کاور^۲ و همکاران، ۲۰۲۵ و ماسومی^۳ و همکاران، ۲۰۲۳). این پژوهش به طور مشخص در پی پاسخ به سؤالات زیر است:

۱. وزن‌ها و روابط شبکه علی میان معیارهای کلیدی ارزیابی بسته‌های هیبریدی تجدیدپذیر-دیجیتال در بخش انرژی ایران کدامند؟

۲. با در نظرگیری این روابط پیچیده، اولویت‌نهایی بسته‌های هیبریدی مبتنی بر فناوری‌های خورشیدی، بادی و آبی چگونه است؟

۳. یافته‌های حاصل از این چارچوب شبکه علی در مقایسه با نتایج رویکردهای ایستای مرسوم چه تفاوت‌های بنیادینی دارد و چه پیامدهای سیاستی برای برنامه‌ریزان انرژی ایران به همراه می‌آورد؟

ساختار این مقاله بدین شرح است: بخش دوم به مرور ادبیات نظری در سه محور فناوری‌های تجدیدپذیر، صنعت نسل چهارم و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌پردازد. بخش سوم، گام به گام چارچوب پیشنهادی دنپ فاز ۱ را تشریح می‌کند. در بخش چهارم، این چارچوب در یک مطالعه موردی برای اولویت‌بندی در بخش انرژی ایران به کار گرفته شده و یافته‌ها ارائه می‌گردند. بخش پنجم به بحث درباره نتایج، مقایسه آن‌ها و استخراج پیامدها اختصاص دارد و نهایتاً بخش ششم، نتیجه‌گیری نهایی، محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادهایی برای مطالعات آتی را ارائه می‌دهد.

مبانی نظری

فناوری‌های تجدیدپذیر و معیارهای ارزیابی آن‌ها در عصر گذار انرژی

ارزیابی فناوری‌های انرژی در عصر حاضر، فراتر از تحلیل‌های هزینه-فایده سنتی رفته و باید پایداری را به عنوان یک پارادایم یکپارچه دربرگیرنده ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فناورانه در نظر گیرد (بای و همکاران، ۲۰۲۰). در ایران، تحلیل داده‌های فنی-اقتصادی نشان می‌دهد که نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و آبی بزرگ به ترتیب از اولویت برخوردارند که این امر ناشی از معیارهایی چون قیمت تمام‌شده، پتانسیل منابع داخلی، اشتغال‌زایی و اثرات زیست‌محیطی است. معیارهای اقتصادی همچنان محور اصلی تصمیم‌گیری‌ها هستند. بر اساس برآوردهای فنی این پژوهش، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و آبی در ایران به ترتیب

¹ Fuzzy DANP

² Kaur

³ Masoomi

حدود ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۷۰۰ دلار بر کیلووات و قیمت تمام‌شده تولید، به ترتیب ۵،۱۹، ۲،۵۷ و ۵،۰۱ سنت بر کیلووات‌ساعت می‌باشد. علاوه بر این، معیارهایی مانند حجم بازار جهانی و نرخ رشد بازار نیز اهمیت یافته‌اند. تحلیل آمارهای بین‌المللی نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۲۸، ظرفیت نصب شده خورشیدی^۱، بادی و آبی به ترتیب ۱۷۶، ۳۵۱ و ۱۱۷۷ گیگاوات افزایش خواهد یافت که بیانگر رشد سریع و جذابیت سرمایه‌گذاری در این بازارها است.

در بعد زیست‌محیطی، تمرکز از صرفاً کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به سمت ارزیابی چرخه عمر کامل فناوری‌ها، مصرف آب، اشغال زمین و تاثیرات آن بر تنوع زیستی معطوف شده است (ورچوتا و همکاران، ۲۰۲۰). بررسی مقایسه‌ای نشان می‌دهد نیروگاه‌های بادی و خورشیدی از لحاظ انتشار آلاینده‌های عملیاتی، عملکرد بهتری نسبت به نیروگاه‌های آبی بزرگ دارند.

معیارهای فنی و قابلیت اطمینان نیز با چالش‌های جدیدی روبرو شده‌اند. متناوب بودن ذاتی منابعی مانند خورشید و باد، معیارهای قابلیت پیش‌بینی تولید، انعطاف‌پذیری سیستم و نیاز به فناوری‌های ذخیره‌سازی یا تولید پشتیبان را به اولویت تبدیل کرده است (چارفدین و اوملای، ۲۰۲۳). بر اساس ارزیابی پتانسیل‌های ملی در این پژوهش، منابع بادی و خورشیدی ایران به ترتیب حدود ۴۰۰۰۰ و ۵۶۰۰۰۰ گیگاوات‌ساعت در سال برآورد می‌شوند که نشان‌دهنده غنای قابل توجه این منابع برای توسعه پایدار انرژی است.

در نهایت، معیارهای اجتماعی مانند میزان اشتغال‌زایی مستقیم و غیرمستقیم، عدالت در توزیع منافع و هزینه‌ها و پذیرش محلی، به عنوان عوامل تعیین‌کننده در موفقیت یا شکست پروژه‌های بزرگ انرژی شناخته می‌شوند (جیموآل و همکاران، ۲۰۲۱). یکپارچه‌سازی این معیارهای چندگانه و گاه متعارض، نیازمند چارچوب‌های تصمیم‌گیری است که بتوانند این پیچیدگی را مدیریت کنند.

صنعت نسل چهارم و ظهور چارچوب انرژی نسل چهارم در بخش انرژی

انقلاب چهارم صنعتی مبتنی بر یکپارچه‌سازی فناوری‌های دیجیتال پیشرفته‌ای مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، داده‌های بزرگ و سیستم‌های سایبر-فیزیکی است. این تحول تنها به مراکز تولید محدود نمانده و به طور فزاینده‌ای بخش انرژی را نیز تحت تاثیر قرار داده است، به طوری که پارادایم جدیدی با عنوان انرژی نسل چهارم^۲ شکل گرفته است (الشتیوی^۳ و همکاران، ۲۰۲۴؛ رادویل و اوربوناس^۴، ۲۰۲۵). انرژی نسل چهارم چارچوبی

در این مقاله نوع فتوولتائیک مد نظر است.^۱

^۲ Energy 4.0

^۳ Al-Shetwi

^۴ Radvilé & Urbonas

برای سیستم‌های انرژی هوشمند، غیرمتمرکز، انعطاف‌پذیر و داده‌محور است که در آن، فناوری‌های دیجیتال به عنوان هسته اصلی، امکان بهره‌برداری بهینه از منابع تجدیدپذیر متغیر، مدیریت هوشمند شبکه و مشارکت فعال مصرف‌کنندگان را فراهم می‌آورند (ژو^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). در این چارچوب، دیجیتال‌سازی صرفاً یک ابزار نیست، بلکه یک کاتالیزور تحول‌آفرین است که مدل‌های کسب‌وکار، روابط بازار و معماری سیستم انرژی را دگرگون می‌سازد (دکرل و فسلر^۲، ۲۰۲۳). شایان ذکر است که دامنه کاربرد فناوری‌های دیجیتال نسل چهارم (همچون اینترنت اشیا، دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی) منحصر به سیستم‌های تجدیدپذیر هیبریدی نیست. این فناوری‌ها هم اکنون در نیروگاه‌های مرسوم فسیلی، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، و حتی نیروگاه‌های کوچک مقیاس پراکنده نیز به منظور افزایش راندمان، کاهش خاموشی‌های ناخواسته و بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری به کار گرفته می‌شوند (آتاه^۳ و همکاران ۲۰۲۴؛ استیندل^۴ و همکاران ۲۰۲۰). با این حال، در این پژوهش تمرکز بر نقش تسهیل‌کننده و هم‌افزای دیجیتال‌سازی در کنار فناوری‌های تجدیدپذیر است، زیرا چالش متناوب بودن و عدم قطعیت تولید در منابع تجدیدپذیر، ارزش افزوده دیجیتال را به مراتب برجسته‌تر می‌سازد. مطالعات نشان می‌دهند ادغام این فناوری‌ها می‌تواند کارایی عملیاتی را افزایش و هزینه‌های انرژی را به‌طور قابل توجهی در محدوده ۱۰ تا ۴۰ درصد کاهش دهد (فرقالی و همکاران، ۲۰۲۳؛ جاود^۵ و همکاران، ۲۰۲۳).

با این حال، پیاده‌سازی عملی راه‌حل‌های دیجیتال نسل چهارم در سیستم‌های انرژی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه نظیر ایران، با موانع ساختاری، نهادی و فنی متعددی مواجه است. مطالعات پیشین به این موانع توجه جدی داشته‌اند. حسینی و همکاران (۱۴۰۳) با رویکرد فراترکیب و مدل‌سازی ساختاری-تفسیری، موانع پیاده‌سازی صنعت نسل ۴ را در زنجیره تأمین پایدار و اقتصاد دایره‌ای شناسایی کردند و نشان دادند که عواملی نظیر فقدان کارکنان متخصص، آموزش ناکافی در زمینه مفاهیم پایداری، هزینه بالای یکپارچه‌سازی سیستم و نگرانی‌های امنیت سایبری از مهم‌ترین موانع علی‌محسوب می‌شوند. کریمیان خوزانی و همکاران (۱۴۰۴) با تمرکز بر حکمرانی گذار فناورانه در بخش انرژی تجدیدپذیر ایران، تعارضات و روابط قدرت میان بازیگران کلیدی را تحلیل کرده و نشان دادند که ضعف نهادی، نبود هماهنگی بین‌بخشی و چالش‌های مالی-ساختاری از موانع ریشه‌ای پیاده‌سازی فناوری‌های نوین هستند. همچنین گلیج و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای میدانی در شمال ایران، موانع تأسیس بنگاه‌های انرژی تجدیدپذیر را بررسی کردند و دریافتند که موانع فرهنگی به‌طور قابل توجهی مانع ارائه ارزش و

¹ Zhao

² Dekeyrel & Fessler

³ Attah

⁴ Steindl

⁵ Javed

موانع اقتصادی عمدتاً بر ایجاد و کسب ارزش تأثیر می‌گذارند. در سطحی وسیع‌تر، علایی و همکاران (۱۴۰۴) با رویکرد فراترکیب و مرور نظام‌مند منابع بین‌المللی، چالش‌های گذار به صنعت ۴.۰ از منظر توسعه پایدار را احصا کرده و بر ضرورت تقویت زیرساخت‌های دیجیتال، توسعه مهارت‌های نیروی کار و توجه به نقش تحریم‌ها و نابرابری‌های منطقه‌ای در سیاست‌گذاری ایران تأکید کردند. اگرچه مدلسازی جامع این موانع از حوصله این پژوهش خارج است، اما چارچوب پیشنهادی با شناسایی قابلیت دیجیتال‌شدگی به عنوان یک عامل علی کلیدی، به طور غیرمستقیم اهمیت رفع این موانع را برای موفقیت بسته‌های هیبریدی آشکار می‌سازد.

بسته فناوری و نوآوری هیبریدی: مبانی نظری ادغام تجدیدپذیر-دیجیتال

در ادبیات مدیریت فناوری و نوآوری، مفهوم بسته فناوری^۱ به مجموعه‌ای از فناوری‌های مکمل اشاره دارد که به صورت هم‌افزا^۲ عمل می‌کنند تا چالش‌های پیچیده نظام‌مند را حل کنند (رادویل و اوربونس، ۲۰۲۵). در حوزه انتقال انرژی پایدار، این بسته‌ها اغلب شکل نوآوری هیبریدی^۳ به خود می‌گیرند. نوآوری هیبریدی در اینجا به مدل‌ها یا راه‌حل‌هایی اطلاق می‌شود که به طور هدفمند فناوری‌های دیجیتال پیشرفته مانند نرم‌افزار، پلتفرم و داده را با فناوری‌های فیزیکی پایه (سخت‌افزار تجدیدپذیر) ترکیب می‌کنند تا ارزش و عملکردی برتر از مجموع اجزای منفرد خلق شود (سولک و بوروسکی^۴، ۲۰۲۴؛ اشبايف^۵ و همکاران، ۲۰۲۴). بر این اساس، بسته فناوری هیبریدی تجدیدپذیر-دیجیتال^۶ مورد بررسی در این پژوهش، به عنوان مصداقی عینی از این چارچوب نظری تعریف می‌گردد:

یک سیستم یکپارچه متشکل از یک فناوری پایه تجدیدپذیر مانند نیروگاه خورشیدی، بادی یا آبی به همراه یک یا چند فناوری دیجیتال مکمل و مرتبط مانند سیستم‌های پایش و کنترل هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا، پلتفرم‌های پیش‌بینی تولید با AI، یا مکانیزم‌های تجارت انرژی غیرمتمرکز مبتنی بر بلاکچین. منطق این ترکیب، ایجاد هم‌افزایی در ابعاد مختلف است به طوری که مؤلفه دیجیتال، کارایی، قابلیت اطمینان، بهره‌وری اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی مؤلفه فیزیکی تجدیدپذیر را افزایش می‌دهد. این دیدگاه، لزوم ارزیابی یکپارچه این بسته‌ها را به جای بررسی مجزای فناوری‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها توجیه می‌کند.

¹ Technology Bundle

² Synergistic

³ Hybrid Innovation

⁴ Sulek & Borowski

⁵ Eshbayev

⁶ Renewable-Digital Hybrid Technology Bundle

تصمیم‌گیری چندمعیاره در برنامه‌ریزی انرژی: تکامل و شکاف‌های روش‌شناختی

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای دهه‌ها ابزار اصلی سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان انرژی در مواجهه با مسائل پیچیده تخصیص منابع و ارزیابی فناوری بوده‌اند. روش‌های کلاسیکی مانند فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی^۱، روش ترجیح بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل^۲ و روش الکتراه^۳، به دلیل ساختار سیستماتیک و توانایی در ترکیب معیارهای کیفی و کمی، به طور گسترده‌ای به کار گرفته شده‌اند (پوهکار و رامچاندرا^۴، ۲۰۰۴ و لینکو^۵ و همکاران، ۲۰۰۶).

با این حال، ادبیات اخیر نقدهای مهمی به کفایت این روش‌های مرسوم در مواجهه با پیچیدگی‌های سیستم‌های انرژی مدرن وارد کرده است. نخستین نقد، ذات ایستا بودن این مدل‌هاست. آن‌ها عموماً یک تصویر ثابت از سیستم را در نظر می‌گیرند و قادر به شبیه‌سازی تعاملات شبکه علی، بازخوردها و تکامل زمانی معیارها و گزینه‌ها نیستند (چارفدین و اوملای، ۲۰۲۳). به عنوان مثال، کاهش هزینه فناوری خورشیدی در اثر یادگیری و صرفه‌های مقیاس، یا تاثیر افزایش نفوذ آن بر نیاز به ذخیره‌سازی، در یک مدل ایستا به خوبی نمایانده نمی‌شود.

نقد دوم، فرض ساده‌انگارانه استقلال معیارها در بسیاری از این روش‌هاست. در واقعیت سیستم‌های انرژی، معیارها در شبکه‌ای از روابط علی و معلولی درهم تنیده شده‌اند. برای نمونه، قابلیت دیجیتال‌شدگی (یک معیار فناورانه) می‌تواند به طور مستقیم بر قابلیت اطمینان (یک معیار فنی) و هزینه عملیاتی (یک معیار اقتصادی) تاثیر بگذارد. روش‌های سلسله‌مراتبی سنتی قادر به مدل‌سازی این وابستگی‌های متقابل نیستند (فورستناو و همکاران، ۲۰۲۰).

سومین شکاف، مدل‌سازی ناکافی عدم قطعیت است. قضاوت‌های انسانی که مبنای مقایسات زوجی در روش‌هایی مانند فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی هستند، ذاتاً مبهم و نادقیق هستند. اگرچه منطق فازی برای دهه‌ها به عنوان راه‌حلی برای این مشکل معرفی شده، اما ادغام عمیق آن با روش‌های مدل‌سازی روابط شبکه‌ای و دارای ساختار وابستگی متقابل هنوز یک چالش روش‌شناختی پیش‌رو است (بای و همکاران، ۲۰۲۰).

این شکاف‌ها نشان می‌دهد که برای ارزیابی بسته‌های فناوری هیبریدی تجدیدپذیر-دیجیتال در بستر پیچیده انرژی نسل چهارم، به چارچوبی نیاز است که بتواند به طور همزمان (۱) وابستگی‌های متقابل و روابط شبکه علی

¹ AHP

² TOPSIS

³ ELECTRE

⁴ Pohekar & Ramachandran

⁵ Linkov

بین معیارها به ویژه نقش دیجیتال سازی و (۲) عدم قطعیت ذهنی در قضاوتها را در یک مدل یکپارچه پوشش دهد. روش ترکیبی دنپ فازی به دلیل قابلیت ذاتی آن در مدلسازی شبکه های علی^۱ و محاسبه وزن های وابسته در ساختارهای شبکه ای^۲، در کنار مدیریت عدم قطعیت^۳، پاسخی روش شناختی به این نیاز شناسایی شده در ادبیات محسوب می شود.

روش پژوهش

فلسفه و مزایای چارچوب پیشنهادی

چارچوب پیشنهادی این پژوهش بر این فلسفه استوار است که تصمیم گیری در مورد فناوری های پیچیده در محیط های شبکه علی مانند بخش انرژی در عصر صنعت نسل چهارم نیازمند رویکردی است که بتواند ساختار درهم تنیده سیستم را آشکار کند. برخلاف مدل های خطی که یک مسیر شبکه علی مستقیم را فرض می کنند، در سیستم های واقعی، معیارها در حلقه های شبکه علی تقویت کننده یا متعادل کننده با یکدیگر تعامل دارند. روش ترکیبی دنپ فازی با تلفیق سه روش^۴، این قابلیت را فراهم می آورد. مزیت اصلی این چارچوب، علی بودن وزن های نهایی است. به این معنا که وزن هر معیار نه بر اساس اهمیت ذاتی ایستای آن، بلکه بر اساس جایگاه آن در شبکه روابط علی و میزان اثرگذاری و اثرپذیری آن از دیگر معیارها محاسبه می شود. این ویژگی، چارچوب را برای ارزیابی بسته های هیبریدی که در آن فناوری دیجیتال به عنوان یک عامل واسطه گر و تقویت کننده بر سایر معیارها اثر می گذارد، ایده آل می سازد.

گام های اجرایی چارچوب

اجرای چارچوب در پنج گام متوالی و یکپارچه صورت می پذیرد.

گام ۱: تشکیل گروه تصمیم گیری و تعیین معیارها، زیرمعیارها و گزینه ها

اولین گام، تشکیل یک گروه خبره متشکل از متخصصان حوزه انرژی، فناوری اطلاعات و سیاست گذاری است. وظیفه این گروه، تأیید و تکمیل ساختار سلسله مراتبی شبکه ای معیارها و گزینه ها است. در این پژوهش، معیارهای اصلی در چهار دسته اقتصادی، فنی، زیست محیطی و اجتماعی-نهادی با الهام از چارچوب های پایه و با در نظر گیری بعد دیجیتال شدگی به عنوان یک زیرمعیار فراگیر در همه دسته ها تعریف می گردد. گزینه ها نیز سه بسته فناوری

¹ DEMATEL

² ANP

³ Fuzzy Logic

⁴ Fuzzy Logic, DEMATEL و ANP

هیبریدی خواهند بود: (۱) بسته هیبریدی خورشیدی-دیجیتال، (۲) بسته هیبریدی بادی-دیجیتال و (۳) بسته هیبریدی آبی-دیجیتال.

انتخاب این سه گزینه مبتنی بر دو منطق اصلی است: نخست، سهم قاطع و مسلط این سه فناوری در پتانسیل منابع و برنامه‌های توسعه ملی و بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران و دوم نمایندگی آن‌ها از طیف متنوعی از ویژگی‌های فنی که برای تحلیل شبکه‌ای علی حائز اهمیت است. از متناوب بودن ذاتی تولید خورشیدی و بادی گرفته تا پایداری و قابلیت برنامه‌ریزی تولید آبی.

جدول ۱: معیارها و زیرمعیارهای ارزیابی اولیه

معیار اصلی	زیرمعیارهای منتخب
اقتصادی	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ^۱ ، قیمت تمام‌شده تولید ^۲ ، هزینه یکپارچه‌سازی با شبکه، حجم بازار جهانی، نرخ رشد بازار
فنی	پتانسیل منابع داخلی، قابلیت اطمینان و پیش‌بینی‌پذیری، قابلیت دیجیتال‌شدگی و یکپارچه‌سازی با سیستم‌های هوشمند، نقش در پایداری‌سازی شبکه
زیست‌محیطی	کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در چرخه عمر، مصرف آب، اشغال زمین، انتشار آلاینده‌های عملیاتی
اجتماعی-نهادی	ایجاد اشتغال (مستقیم و غیرمستقیم)، پیچیدگی فناوریانه و نیاز به مهارت، پذیرش اجتماعی، امکان توسعه صنعت داخلی، امنیت تأمین انرژی

گام ۲: تشکیل ماتریس مقایسات زوجی فازی و محاسبه ماتریس روابط شبکه علی اولیه^۳

در این گام، از خبرگان خواسته می‌شود تا میزان تاثیر مستقیم هر معیار/زیرمعیار بر دیگری را با استفاده از اعداد زبانی فازی (مثلاً: تاثیر بسیار کم، کم، متوسط، زیاد، بسیار زیاد) ارزیابی کنند. این ارزیابی‌ها به ماتریس مستقیم فازی اولیه تبدیل می‌شوند. سپس، با نرمال‌سازی و فازی‌زدایی این ماتریس‌ها، ماتریس روابط علی نرمال‌شده (N) محاسبه می‌شود. در نهایت، ماتریس روابط کلی (T) از رابطه $T = N(I - N)^{-1}$ به دست می‌آید که در آن I ماتریس واحد است. از این ماتریس، دو شاخص کلیدی استخراج می‌گردد: شاخص تاثیرگذاری (D) که مجموع سطرهای ماتریس T است و نشان‌دهنده میزان تاثیری است که یک معیار بر کل سیستم می‌گذارد؛ و شاخص تاثیرپذیری (R) که مجموع ستون‌های T است و نشان‌دهنده میزان تاثیری است که یک معیار از کل سیستم می‌پذیرد. با محاسبه (D+R) و (D-R)، میزان مرکزیت و نقش علی/معلولی هر معیار مشخص می‌شود. معیارهایی با (D-R) مثبت، عامل علی و معیارهایی با (D-R) منفی، عامل معلولی محسوب می‌شوند.

¹ CAPEX

² LCOE

³ Fuzzy DEMATEL

گام ۳: تشکیل ماتریس ابری^۱ و محاسبه وزن‌های شبکه علی نهایی

در این مرحله، از روابط وابستگی شناسایی شده در گام قبل برای ساخت ماتریس ابری اولیه غیروزی (W) استفاده می‌شود. این ماتریس، وابستگی‌های درونی بین خوشه‌های معیارها و همچنین وابستگی‌های بین عناصر مختلف را منعکس می‌کند. سپس، این ماتریس با در نظرگیری وزن خوشه‌ها به ماتریس ابری وزنی (W_w) تبدیل می‌گردد. در نهایت، با به توان رساندن این ماتریس تا زمانی که به تعادل برسد، ماتریس ابری محدود (W^{lim}) حاصل می‌آید. وزن‌های نهایی و شبکه علی هر معیار و زیرمعیار، از سطرهای مربوطه در این ماتریس نهایی استخراج می‌شوند.

گام ۴: ارزیابی گزینه‌ها و محاسبه امتیاز نهایی

پس از تعیین وزن‌های شبکه علی، عملکرد هر یک از سه بسته هیبریدی (گزینه) نسبت به هر زیرمعیار، توسط خبرگان ارزیابی می‌شود. امتیاز نهایی هر گزینه از جمع وزنی امتیازات آن در همه زیرمعیارها، با استفاده از وزن‌های علی به دست آمده از ماتریس ابری محدود محاسبه می‌شود.

گام ۵: تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی نتایج

در گام نهایی، برای اطمینان از پایداری و قابلیت اطمینان نتایج، تحلیل حساسیت انجام می‌گیرد. در این تحلیل، وزن‌های معیارهای کلیدی (به ویژه معیارهای با نقش علی قوی) در یک بازه معقول تغییر داده می‌شود و تاثیر این تغییرات بر رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها بررسی می‌گردد. همچنین، نتایج با دیدگاه‌های کیفی خبرگان و در صورت امکان، با خروجی‌های یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مرسوم مانند فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مقایسه می‌شود تا اعتبار همگرا چارچوب پیشنهادی سنجیده شود.

اجرای چارچوب در بستر انرژی ایران: تنظیمات و داده‌ها

برای اعمال چارچوب فوق در بخش انرژی ایران، ساختار معیارها و گزینه‌ها با در نظرگیری ویژگی‌های بومی و داده‌های قابل دسترس طراحی می‌شود. داده‌های کمی اولیه مورد نیاز برای تحلیل مانند CAPEX، LCOE، پتانسیل منابع، نرخ رشد بازار و شاخص اشتغال‌زایی از طریق بررسی اسناد ملی، گزارش‌های صنعتی و پایگاه‌های داده معتبر بین‌المللی گردآوری و در قالب جدول ۲ خلاصه شده‌اند. این داده‌ها مبنای کمی‌سازی معیارها و تشکیل ماتریس‌های اولیه در چارچوب دنپ فازی قرار گرفتند.

¹ Supermatrix

جدول ۲: داده‌های کمی کلیدی برای ارزیابی فناوری‌های تجدیدپذیر در ایران

واحد	آبی (بزرگ)	بادی	خورشیدی	زیرمعیار / فناوری
دلار/کیلووات	700	1000	500	CAPEX
سنت/کیلووات‌ساعت	5.01	2.57	5.19	LCOE
گیگاوات‌ساعت/سال	~135,000	~40,000	~560,000	پتانسیل منابع داخلی
درصد	3.8	5.8	7.1	نرخ رشد بازار جهانی
رتبه کیفی	متوسط	بسیار بالا	بالا	اشتغال‌زایی
شاخص (۱۰۰-۰)	40	45	25	امنیت تأمین انرژی

گروه خبره این پژوهش متشکل از ۱۲ نفر از متخصصان حوزه‌های انرژی، فناوری اطلاعات و ارتباطات و سیاست‌گذاری صنعتی بود. ترکیب این گروه به صورت هدفمند و با در نظر گرفتن تقارن نسبی تخصص‌ها به شرح زیر بود: ۵ نفر متخصص در حوزه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر (شامل دو نفر با سابقه اجرایی مستقیم در نیروگاه‌های خورشیدی و بادی)، ۴ نفر متخصص در حوزه فناوری اطلاعات و دیجیتال‌سازی صنعتی (با تمرکز بر اینترنت اشیا، داده‌های بزرگ و سیستم‌های کنترل هوشمند) و ۳ نفر سیاست‌گذار و برنامه‌ریز انرژی با سابقه فعالیت در وزارت نیرو و سازمان برنامه و بودجه. این توزیع عمداً به سمت تخصص فناوری انرژی و دیجیتال سنگین‌تر است تا قضاوت درباره قابلیت دیجیتال‌شدگی با دقت بیشتری صورت گیرد. معیارهای انتخاب خبرگان عبارت بودند از: حداقل ۱۰ سال سابقه کاری تخصصی در حوزه مرتبط، داشتن حداقل یک انتشار علمی به صورت مقاله یا کتاب در زمینه انرژی یا فناوری و سابقه مشارکت در پروژه‌های کلان ملی. نظرات این خبرگان در قالب پرسشنامه‌های مقایسات زوجی فازی جمع‌آوری شد. برای تجمیع نظرات و تشکیل ماتریس‌های نهایی، از میانگین حسابی اعداد فازی مثلی ارائه شده توسط تمامی خبرگان استفاده گردید. در نهایت، برای تبدیل اعداد فازی به قطعی^۱ از روش مرکز ثقل^۲ (COA) بهره گرفته شد.

یافته‌ها

وزن‌های معیارها و نقشه روابط شبکه علی

پس از اجرای گام‌های چارچوب دنپ فازی بر اساس داده‌های گردآوری‌شده از خبرگان، ماتریس روابط کلی (T) و ماتریس ابری محدود (W^{lim}) محاسبه گردید. نتایج حاصل از تحلیل دیمتل در جدول (۳) خلاصه شده است.

¹ Defuzzification

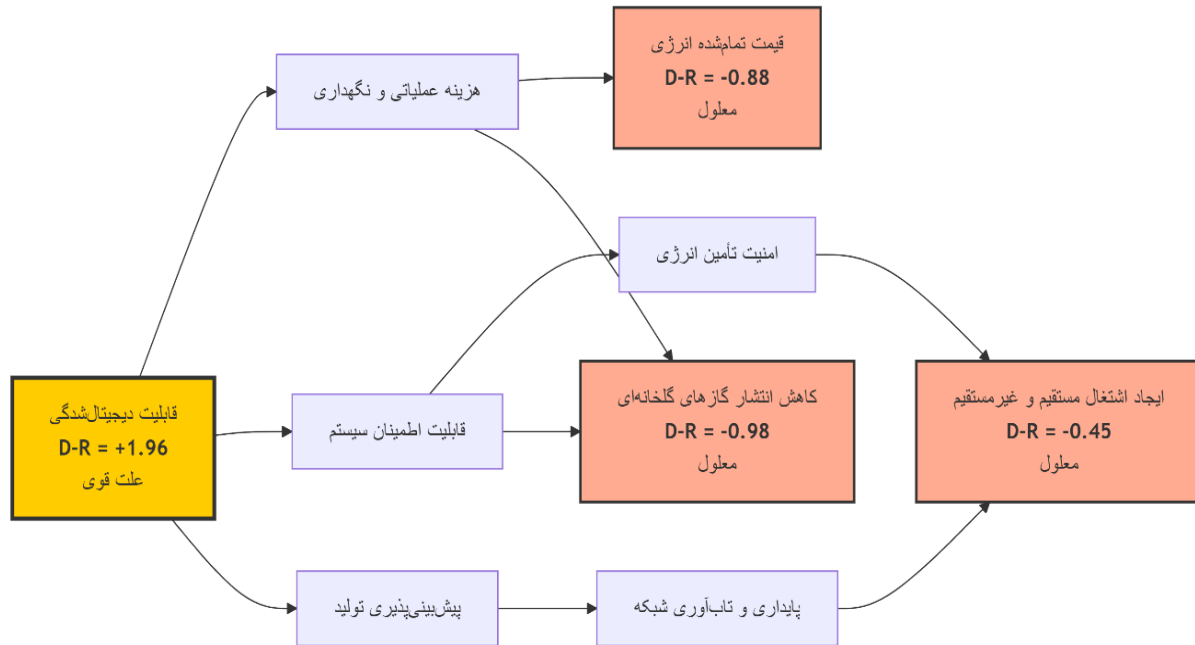
² Center of Area

شاخص‌های (D+R) نشان‌دهنده میزان مرکزیت و اهمیت هر معیار در شبکه روابط است، در حالی که شاخص (D-R) نقش علی آن را مشخص می‌کند.

جدول ۳: شاخص‌های تاثیرگذاری (D)، تاثیرپذیری (R)، مرکزیت (D+R) و نقش علی (D-R) معیارهای کلیدی

وضعیت	D-R	D+R	R	D	معیار (خوشه)
علت قوی	+۱,۹۶ (۰,۲۳)	۷,۷۸ (۰,۲۸)	۲,۹۱ (۰,۲۵)	۴,۸۷ (۰,۳۱)	قابلیت دیجیتال‌شدگی
معلول	-۰,۸۸ (۰,۲۰)	۷,۳۲ (۰,۳۰)	۴,۱۰ (۰,۳۲)	۳,۲۲ (۰,۲۸)	قیمت تمام‌شده تولید
علت ضعیف	+۰,۵۰ (۰,۱۸)	۶,۶۰ (۰,۲۵)	۳,۰۵ (۰,۲۴)	۳,۵۵ (۰,۲۶)	پتانسیل منابع داخلی
معلول	-۰,۹۸ (۰,۱۹)	۶,۷۸ (۰,۲۶)	۳,۸۸ (۰,۲۹)	۲,۹۰ (۰,۲۲)	کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای
معلول	-۰,۴۵ (۰,۱۶)	۵,۹۵ (۰,۲۴)	۳,۲۰ (۰,۲۷)	۲,۷۵ (۰,۲۱)	ایجاد اشتغال

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، معیار قابلیت دیجیتال‌شدگی دارای بالاترین مقدار مرکزیت (۷,۷۸) و همچنین مثبت‌ترین مقدار نقش علی (+۱,۹۶) است. این نتیجه به وضوح تأیید می‌کند که در سیستم ارزیابی بسته‌های هیبریدی، فناوری دیجیتال یک عامل علی کلیدی محسوب می‌شود که بر سایر معیارهای اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی تاثیر می‌گذارد. در مقابل، معیارهای قیمت تمام‌شده تولید و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارای نقش معلولی هستند، به این معنا که بیشتر تحت تاثیر دیگر عوامل (به ویژه قابلیت دیجیتال‌شدگی) قرار می‌گیرند. نقشه شبکه روابط علی استخراج‌شده از تحلیل در شکل ۱ به صورت شماتیک ترسیم شده است. این نقشه به وضوح جایگاه قابلیت دیجیتال‌شدگی را به عنوان یک علت مرکزی و قوی در سیستم نشان می‌دهد که به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر معیارهای اقتصادی مانند قیمت تمام‌شده، زیست‌محیطی (کاهش انتشار) و اجتماعی (اشتغال‌زایی) اثرگذار است. این یافته، توجیه‌کننده وزن بالای این معیار در تحلیل نهایی است.



شکل ۱: شبکه روابط علی بین معیارهای کلیدی

وزن‌های نهایی شبکه علی معیارها

وزن‌های نهایی استخراج‌شده از ماتریس ابری محدود (W^{lim}) که حاصل تلفیق روابط شبکه‌ای و مقایسات زوجی فازي است، در جدول (۴) ارائه شده‌اند. این وزن‌ها به دلیل در نظرگیری وابستگی‌های متقابل، با وزن‌های حاصل از یک روش سلسله‌مراتبی ایستا تفاوت ماهوی دارند.

جدول ۴: وزن‌های شبکه علی نهایی معیارهای اصلی و زیرمعیار منتخب

وزن سراسری	وزن محلی	زیرمعیار منتخب	وزن علی	معیار اصلی
۰,۱۷۱ (۰,۰۲۵)	۰,۴۸۲ (۰,۰۵۶)	قابلیت دیجیتال‌شدگی	۰,۳۵۴ (۰,۰۴۲)	فنی
۰,۱۵۸ (۰,۰۲۲)	۰,۵۵۰ (۰,۰۶۱)	قیمت تمام‌شده تولید	۰,۲۸۸ (۰,۰۳۷)	اقتصادی
۰,۱۱۵ (۰,۰۱۸)	۰,۶۱۰ (۰,۰۶۸)	کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای	۰,۱۸۹ (۰,۰۲۸)	زیست‌محیطی
۰,۰۷۶ (۰,۰۱۴)	۰,۴۵۰ (۰,۰۵۲)	ایجاد اشتغال	۰,۱۶۹ (۰,۰۲۵)	اجتماعی-نهادی

بر اساس جدول (۴)، معیار فنی با وزن ۰,۳۵۴ بیشترین اهمیت را در ارزیابی بسته‌های هیبریدی دارد و در درون این خوشه، قابلیت دیجیتال‌شدگی با وزن سراسری ۰,۱۷۱ مهم‌ترین زیرمعیار در کل ساختار تصمیم‌گیری شناسایی شده است. این یافته، مجدداً بر نقش محوری ادغام فناوری دیجیتال صحنه می‌گذارد. نکته جالب توجه،

وزن نسبتا بالای معیار زیست محیطی (۰,۱۸۹) در مقایسه با معیار اجتماعی-نهادی است که نشان دهنده حساسیت روزافزون تصمیم گیران به ابعاد پایداری است.

رتبه بندی نهایی بسته های فناوری هیبریدی

امتیاز نهایی هر یک از سه بسته هیبریدی پس از اعمال وزن های شبکه علی استخراج شده بر ارزیابی عملکرد آنها محاسبه شد. عملکرد هر بسته در زیرمعیارها بر اساس داده های فنی-اقتصادی گردآوری شده در این پژوهش (جدول ۲) و همچنین ارزیابی خبرگان از قابلیت دیجیتال شدگی هر فناوری، کمی سازی شد. نتایج نهایی رتبه بندی در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵: امتیاز و رتبه نهایی بسته های فناوری هیبریدی

بسته فناوری هیبریدی	امتیاز نهایی	رتبه	تحلیل کوتاه بر اساس یافته های پژوهش
بسته هیبریدی خورشیدی- دیجیتال	0.823	۱	برتری این بسته عمدتا ناشی از هزینه سرمایه گذاری اولیه به نسبت پایین تر، پتانسیل خورشیدی بسیار عالی در اکثر نقاط کشور و قابلیت بالای یکپارچه سازی با سیستم های دیجیتال نظارت و کنترل غیرمتمرکز است. این بسته در معیارهای اقتصادی و فنی امتیاز بالایی کسب کرد.
بسته هیبریدی بادی-دیجیتال	0.761	۲	این بسته به دلیل پتانسیل بادی قابل توجه در مناطق خاص کشور و قابلیت اطمینان نسبی بالاتر در مقایسه با خورشید در رتبه دوم قرار گرفت. با این حال، هزینه سرمایه گذاری اولیه بالاتر و چالش های پیش بینی پذیری تولید امتیاز کلی آن را کاهش داد. قابلیت دیجیتال شدگی آن نیز عمدتا بر پیش بینی هوشمند تولید متمرکز بود.
بسته هیبریدی آبی-دیجیتال	0.654	۳	اگرچه نیروگاه های آبی از بیشترین قابلیت اطمینان و قابلیت ارائه خدمات جانبی شبکه برخوردارند، اما این بسته به دلیل محدودیت شدید پتانسیل توسعه جدید منابع آبی در کشور، هزینه سرمایه گذاری اولیه بسیار بالا و ملاحظات پیچیده اجتماعی-زیست محیطی مرتبط با احداث سدهای جدید، در رتبه سوم قرار گرفت. دیجیتال شدگی این بسته بیشتر بر بهینه سازی عملیات و نگهداری متمرکز است.

همانطور که نتایج جدول ۵ نشان می دهد، بسته هیبریدی خورشیدی-دیجیتال با امتیاز ۰,۸۲۳ در رتبه نخست قرار گرفت. این رتبه بندی، همسو با جهت گیری جهانی در توسعه انرژی خورشیدی و همچنین تأکید بر توسعه غیرمتمرکز و هوشمند است. رتبه دوم بسته بادی-دیجیتال نیز نشان می دهد این فناوری می تواند به عنوان مکملی حیاتی در کنار خورشید در مناطقی با پتانسیل بادی بالا عمل کند.

تحلیل حساسیت

برای اطمینان از استحکام و قابلیت اطمینان رتبه‌بندی نهایی، تحلیل حساسیت بر روی معیارهای کلیدی انجام شد. با توجه به نقش علی قوی معیار قابلیت دیجیتال‌شدگی و اهمیت معیارهای هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و پتانسیل منابع داخلی، وزن این معیارها در بازه‌ای معقول تغییر داده شد و تاثیر آن بر امتیاز و رتبه نهایی بسته‌های هیبریدی بررسی گردید. بدین منظور، وزن این معیار در بازه‌ای معقول ($\pm 20\%$) و همچنین در یک آزمون حدی (کاهش 30%) تغییر داده شد و تاثیر آن بر امتیاز و رتبه نهایی بسته‌های هیبریدی بررسی گردید. نتایج این تحلیل به طور خلاصه در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶: نتایج تحلیل حساسیت بر رتبه بسته‌های هیبریدی با تغییر وزن معیار قابلیت دیجیتال‌شدگی

نتیجه‌گیری	آبی- دیجیتال	بادی- دیجیتال	خورشیدی- دیجیتال	وزن تعدیل‌شده قابلیت دیجیتال‌شدگی	سناریو
رتبه‌بندی مرجع	۰,۶۵۴ (۳)	۰,۷۶۱ (۲)	۰,۸۲۳ (۱)	۰,۱۷۱	پایه
رتبه‌بندی پایدار است. امتیازها کاهش یافته ولی ترتیب تغییر نکرده است.	۰,۶۴۳ (۳)	۰,۷۴۹ (۲)	۰,۸۰۵ (۱)	(کاهش ۲۰ درصد) ۰,۱۳۷	سناریو ۱: کاهش ۲۰ درصد وزن
رتبه‌بندی پایدار است. افزایش وزن، برتری بسته اول را تشدید می‌کند.	۰,۶۶۵ (۳)	۰,۷۷۳ (۲)	۰,۸۴۱ (۱)	(افزایش ۲۰ درصد) ۰,۲۰۵	سناریو ۲: افزایش ۲۰ درصد وزن
رتبه‌بندی حتی در تغییر شدید نیز پایدار می‌ماند.	۰,۶۳۶ (۳)	۰,۷۴۱ (۲)	۰,۷۹۲ (۱)	(کاهش ۳۰ درصد) ۰,۱۲۰	سناریو ۳: کاهش ۳۰ درصد وزن (آزمون حدی)

برای کمی‌سازی دقیق‌تر تاثیر عدم قطعیت در وزن معیار کلیدی قابلیت دیجیتال‌شدگی بر نتایج نهایی، تحلیل حساسیت ساختاریافته‌ای در سه سناریو انجام شد (جدول ۶). همانطور که مشاهده می‌شود، نه تنها تغییرات $\pm 20\%$ که بازه‌ای معقول از عدم قطعیت در قضاوت خبرگان محسوب می‌شود، بلکه حتی یک آزمون حدی (سناریو ۳) با کاهش 30% وزن این معیار، منجر به تغییر در ترتیب رتبه‌بندی نمی‌شود. این پایداری قوی، دو نکته مهم را آشکار می‌سازد: نخست، برتری بسته هیبریدی خورشیدی-دیجیتال تا حد زیادی تابع وزن مطلق این معیار نیست، بلکه از ساختار برهم‌کنش ذاتی بین قابلیت دیجیتال‌شدگی و ویژگی‌های فنی-اقتصادی فناوری خورشیدی مانند مدولاریته و هزینه پایین یکپارچه‌سازی ناشی می‌شود. دوم، نتایج نشان می‌دهد که جهت تاثیر افزایش اهمیت دیجیتال‌سازی (سناریو ۲)، شکاف امتیازی بین رتبه اول و دوم را بیشتر می‌کند، که مؤید این دیدگاه راهبردی

است که تسریع در دیجیتال سازی بخش انرژی، نه تنها مزیت نسبی فناوری های غیرمتمرکز را کاهش نمی دهد، بلکه آن را تقویت می کند.

به طور کلی، تحلیل حساسیت تأیید کرد که رتبه بندی نهایی ارائه شده در برابر تغییرات معقول در وزن معیارهای کلیدی پایدار است.

تجزیه و تحلیل یافته ها

شکاف سیاستگذاری و اجرا در ایران: درس هایی از پروژه های عملیاتی

یکی از انتقادات وارد بر مطالعات اولویت بندی فناوری در ایران، نادیده گرفتن شکاف عمیق بین سیاستگذاری رسمی و نتایج اجرایی است. بررسی سطحی اسناد بالادستی (مانند سند چشم انداز ۱۴۰۴، قانون برنامه ششم و هفتم توسعه، و مصوبات شورای عالی انرژی) نشان می دهد که توسعه انرژی های تجدیدپذیر همواره به عنوان یک اولویت راهبردی مطرح بوده است. با این حال، پروژه های عملیاتی شده - به ویژه در حوزه نیروگاه های بادی و خورشیدی - غالباً با چالش هایی نظیر توقف نیمه کاره، عدم تحقق ظرفیت اسمی و نبود زیرساخت دیجیتال پشتیبان مواجه بوده اند. برای نمونه، سامانه های نظارت هوشمند (SCADA) در بسیاری از نیروگاه های بادی موجود یا نصب نشده و یا به دلیل نبود استانداردهای یکپارچه داده، کارایی مطلوب را ندارند. از سوی دیگر، مدل های اقتصادی - مالی فعلی (مانند قراردادهای تضمینی خرید برق تجدیدپذیر) انگیزه های قوی برای سرمایه گذاری در لایه دیجیتال فراتر از الزامات حداقلی ایجاد نمی کنند. نتایج چارچوب حاضر که قابلیت دیجیتال شدگی را به عنوان یک محور علی معرفی می کند، به طور ضمنی تأکید می کند که رفع این شکاف مستلزم بازطراحی بسته های تشویقی به گونه ای است که دیجیتال سازی نه یک گزینه جانبی، بلکه یک جزء الزامی و پاداش گیر در پروژه های تجدیدپذیر باشد. تحلیل عمیق تر این شکاف و تطبیق آن با مدل های پیاده سازی نیازمند پژوهش مستقل و موردپژوهی است، اما یافته های این مقاله می تواند مبنایی برای تدوین چنین پژوهش هایی قرار گیرد.

تحلیل یافته های کلیدی در چارچوب ادبیات نظری

یافته های این پژوهش را می توان در پرتو ادبیات نوظهور حوزه انرژی نسل چهارم و نوآوری هیبریدی تفسیر و تحلیل کرد. نخستین و کلیدی ترین یافته، شناسایی معیار قابلیت دیجیتال شدگی به عنوان یک عامل علی قوی در شبکه معیارها است. این نتیجه مستقیماً با تأکید ادبیات بر نقش کاتالیزوری و تحول آفرین دیجیتال سازی در انتقال انرژی همسو است (دکرل و فسler، ۲۰۲۳؛ رادویل و اوربوناس، ۲۰۲۵). این یافته نشان می دهد که در عصر انرژی نسل چهارم، فناوری دیجیتال دیگر یک مزیت رقابتی جانبی یا یک هزینه اضافی نیست، بلکه یک سرمایه گذاری

زیرساختی و محرک راهبردی است که اثرات آن در بهبود شاخص‌های اقتصادی (کاهش هزینه عملیاتی)، فنی (افزایش قابلیت اطمینان) و زیست‌محیطی (بهینه‌سازی مصرف) سیستم ظاهر می‌شود.

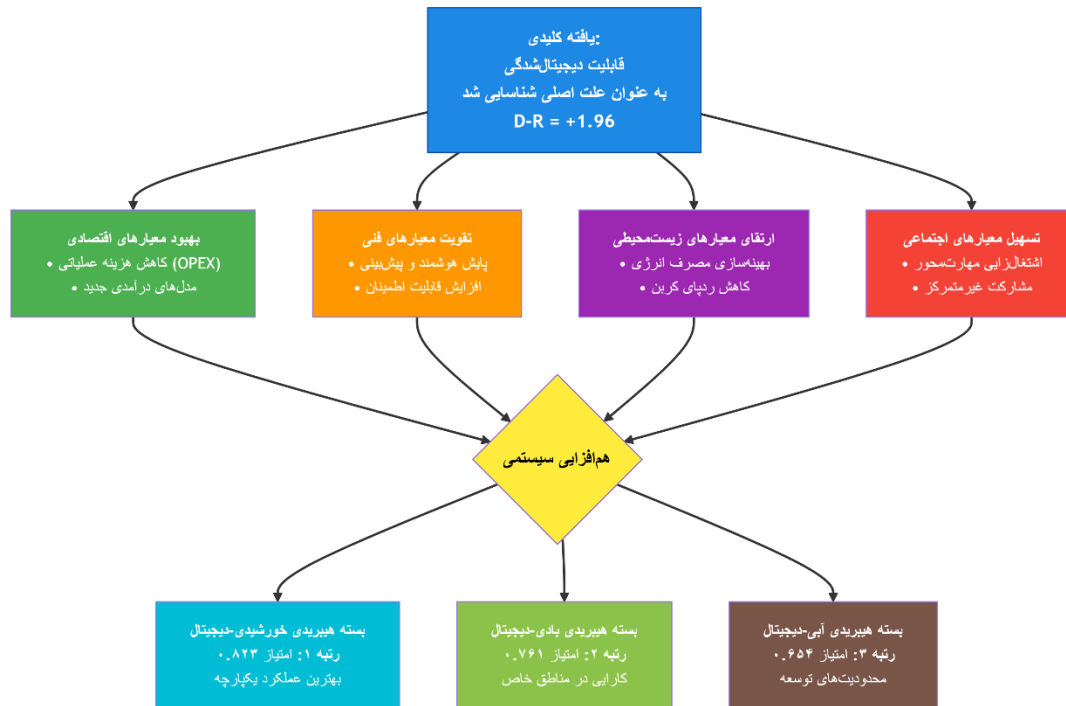
دومین یافته مهم، اولویت بسته هیبریدی خورشیدی-دیجیتال است. این نتیجه نه تنها با پتانسیل جغرافیایی ایران، بلکه با جهت‌گیری فناوریانه جهانی به سمت سیستم‌های انرژی غیرمتمرکز، مدولار و هوشمند که میزبانی از راه‌حل‌های دیجیتال را به طور ذاتی تسهیل می‌کنند، همخوانی کامل دارد (ژو و همکاران، ۲۰۲۳). برتری این بسته در مطالعه حاضر، عمدتاً ناشی از هم‌افزایی بین هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نسبتاً پایین فناوری خورشیدی و قابلیت بالای یکپارچه‌سازی آن با سیستم‌های دیجیتال نظارت و کنترل غیرمتمرکز است. این امر، مدل‌های کسب‌وکار نوآورانه‌ای مانند تولید-مصرف^۱ و مشارکت شرکت‌های کوچک و متوسط^۲ را ممکن می‌سازد.

مقایسه این یافته‌ها با مطالعات پیشین که صرفاً به اولویت‌بندی فناوری‌های تجدیدپذیر منفرد پرداخته‌اند، گویای یک تفاوت بنیادین است. در آن مطالعات، معیارهای اقتصادی کلاسیک مانند قیمت تمام شده تولید، وزن غالب را داشته‌اند. در حالی که در چارچوب وابسته به روابط این پژوهش، معیارهای فناوریانه مرتبط با دیجیتال‌سازی (با وزن علی ۰,۳۵۴ برای خوشه فنی) اهمیت بیشتری یافته‌اند. این تغییر موازنه، تأییدی روش‌شناختی بر گذار از چارچوب‌های عملیاتی قدیمی تولید متمرکز به چارچوب‌های عملیاتی جدید سیستم‌های هوشمند یکپارچه است.

در نهایت، برآوردهای کمی این پژوهش از پتانسیل صرفه‌جویی هزینه و افزایش کارایی ناشی از ادغام دیجیتال، در دامنه ۱۰-۴۰ درصد قرار دارد که با یافته‌های مطالعات مروری بین‌المللی مطابقت دارد (فرقالی و همکاران، ۲۰۲۳؛ الشتیوی و همکاران، ۲۰۲۴). این همخوانی، اعتبار بیرونی چارچوب پیشنهادی و قابلیت تعمیم نسبی یافته‌های آن به سایر بافت‌های جغرافیایی با شرایط مشابه را تقویت می‌کند.

^۱ Prosumer

^۲ SMEs



شکل ۲: مدل مفهومی هم‌افزایی در بسته هیبریدی خورشیدی-دیجیتال بر تر: نقش دیجیتال‌سازی به عنوان هسته شبکه علی

همانطور که در مدل مفهومی ارائه‌شده در شکل ۲ نمایش داده شده است، شناسایی قابلیت دیجیتال‌شدگی به عنوان یک عامل علی قوی در مرکز شبکه، به این معناست که سرمایه‌گذاری در فناوری‌های دیجیتال، به‌طور سیستماتیک و همزمان بر تمامی ابعاد ارزیابی یک بسته هیبریدی (اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی) تاثیر می‌گذارد. این نقش هسته‌ای، توجیهی قوی برای اولویت‌دهی به بسته‌هایی است که ذاتاً پذیرای این یکپارچه‌سازی هستند، نظیر بسته خورشیدی-دیجیتال که در شکل ۲ به عنوان نتیجه نهایی این هم‌افزایی سیستماتیک نشان داده شده است.

مهم‌ترین تمایز نتایج این پژوهش با خروجی‌های حاصل از مدل‌های ایستایی مانند فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی ساده، در وزن‌های تخصیص یافته به معیارها است. در یک مدل ایستا، وزن معیار قابلیت دیجیتال‌شدگی عمدتاً بر اساس قضاوت مستقیم خبرگان درباره اهمیت آن تعیین می‌شود. اما در چارچوب شبکه علی حاضر، وزن نهایی این معیار (۰.۱۷۱) حاصل تاثیرات شبکه‌ای و علی آن بر سایر معیارها است. این وزن علی احتمالاً از وزن حاصل از یک مدل ایستا بالاتر خواهد بود، زیرا مدل ایستا قادر به محاسبه اهرم اثرگذاری این معیار نیست.

این تفاوت به تغییر یک چارچوب عملیاتی یکپارچه در تصمیم‌گیری منجر می‌شود: در مدل قدیمی، سرمایه‌گذاری روی دیجیتال‌سازی ممکن است به عنوان یک هزینه یا امتیاز اضافی دیده شود. در حالی که در مدل علی، این سرمایه‌گذاری به عنوان یک سرمایه‌گذاری زیرساختی و محرک که بازدهی آن در بهبود سایر شاخص‌ها مانند کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان نمایان می‌شود، تلقی می‌گردد.

از نظر نظری، این پژوهش نشان می‌دهد که ادغام روش‌های دیمتل و فرآیند تحلیل شبکه در یک چارچوب فازی، می‌تواند شکاف موجود در مدل‌سازی مسائل پیچیده، چندبعدی و وابسته در حوزه مدیریت فناوری و انرژی را پر کند. این چارچوب قابلیت تعمیم به سایر حوزه‌های تصمیم‌گیری در عصر صنعت نسل چهارم مانند انتخاب زنجیره تأمین هوشمند یا فناوری‌های اقتصاد چرخشی را دارد.

پیامدهای عملی و سیاستی برای برنامه‌ریزان انرژی ایران

از نظر عملی و سیاستی، یافته‌های این مطالعه پیامدهای روشنی برای برنامه‌ریزان انرژی ایران دارد:

۱. اولویت سرمایه‌گذاری: باید بر توسعه تلفیقی و همزمان فناوری‌های خورشیدی و راه‌حل‌های دیجیتالی مرتبط متمرکز شد. حمایت‌ها نباید صرفاً معطوف به نصب پنل باشد، بلکه باید بسته‌های کامل شامل سامانه‌های هوشمند کنترلی، نظارتی و بازارگری را مورد تشویق قرار دهد.
۲. سیاست‌گذاری برای SMEها: با توجه به ماهیت غیرمتمرکز و مدولار بسته برتر (خورشیدی-دیجیتال)، سیاست‌ها باید تسهیل مشارکت شرکت‌های کوچک و متوسط در تولید پراکنده و ارائه خدمات ارزش‌افزوده دیجیتال را در دستور کار قرار دهند تا شکاف دیجیتالی کاهش یابد.
۳. بازنگری در مکانیسم‌های حمایتی: یارانه‌ها و مشوق‌های مالی باید به گونه‌ای هوشمند طراحی شوند که نه تنها هزینه اولیه، بلکه قابلیت دیجیتال‌شدگی و یکپارچه‌سازی پروژه‌ها را نیز پاداش دهند.
۴. توسعه نقشه راه فناوری: برای فناوری بادی، نقشه راه باید بر روی افزایش قابلیت پیش‌بینی‌پذیری از طریق راه‌حل‌های دیجیتال پیشرفته مانند بینایی ماشین و هوش مصنوعی و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری متمرکز شود.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارائه یک چارچوب شبکه علی برای اولویت‌بندی بسته‌های فناوری هیبریدی تجدیدپذیر-دیجیتال در بخش انرژی ایران انجام شد. چارچوب پیشنهادی که بر پایه روش ترکیبی دنپ فازی استوار است،

توانست شکاف روش‌شناختی موجود در مدل‌های ایستای تصمیم‌گیری چندمعیاره را مورد توجه قرار دهد. یافته‌های کلیدی پژوهش را می‌توان در سه محور زیر خلاصه نمود:

- شناسایی عوامل شبکه‌های کلیدی: تحلیل دیمتال فازی نشان داد که معیار قابلیت دیجیتال‌شدگی به عنوان یک عامل علی قوی در شبکه معیارها عمل می‌کند.
- اولویت‌بندی شبکه‌های هیبریدی: با اعمال وزن‌های علی استخراج‌شده از دنپ فازی، رتبه‌بندی نهایی بسته‌های هیبریدی به ترتیب خورشیدی-دیجیتال (رتبه ۱)، بادی-دیجیتال (رتبه ۲) و آبی-دیجیتال (رتبه ۳) به دست آمد.
- پایداری و اعتبار نتایج: تحلیل حساسیت تأیید کرد که رتبه‌بندی نهایی در برابر تغییرات معقول در وزن معیارهای کلیدی پایدار است.

علیرغم دقت روش‌شناختی، این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه است:

- محدودیت ذهنی داده‌ها: بخشی از داده‌های ورودی مبتنی بر قضاوت خبرگان است.
- دینامیک زمانی محدود: چارچوب حاضر یک تحلیل مقطعی ارائه می‌دهد.
- عمق تحلیل فناوری دیجیتال: فناوری دیجیتال به صورت یک بسته یکسان برای همه گزینه‌ها در نظر گرفته شد.

با توجه به یافته‌ها و محدودیت‌های فوق، پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

۱. ادغام با سناریوسازی: ترکیب چارچوب دنپ فازی با سناریوسازی برای بررسی تأثیر تحولات آتی مانند پیشرفت‌های سریع در هوش مصنوعی یا تغییرات قیمت جهانی نفت بر اولویت‌ها.
۲. تطبیق برای سطح خرد: بکارگیری این چارچوب برای تصمیم‌گیری در سطح خرد، مانند انتخاب بسته بهینه برای یک صنعت انرژی‌بر خاص یا یک منطقه جغرافیایی.
۳. توسعه شاخص‌های دیجیتال: توسعه یک دسته شاخص کمی برای اندازه‌گیری قابلیت دیجیتال‌شدگی فناوری‌های انرژی.
۴. تلفیق با ارزیابی چرخه عمر: ادغام این چارچوب با ارزیابی چرخه عمر (LCA) برای لحاظ کردن دقیق‌تر اثرات زیست‌محیطی در کل زنجیره ارزش.

سپاسگزاری

ما از همه همکارانی که بینش‌ها و تخصص خود را ارائه دادند و به این تحقیق کمک زیادی کردند، سپاسگزاریم. همچنین از داوران ناشناس به خاطر پیشنهادات ارزشمندشان برای بهبود مقاله تشکر می‌کنیم.

منابع

- Agrawal, R., Wankhede, V. A., Kumar, A., Upadhyay, A., & Garza-Reyes, J. A. (2021). Progress and trends in integrating industry 4.0 within circular economy: A comprehensive literature review and future research propositions. *Business Strategy and the Environment*, 30(4), 1778–1803. <https://doi.org/10.1002/bse.2910>
- Alaei, M., Safdari Ranjbar, M., & Faham, E. (2025). The transition to industry 4.0 from a sustainable development perspective: A meta-synthesis of opportunities, challenges, and policy requirements. *Journal of Technology Development Management*, 13(1). [In Persian] <https://doi.org/10.22104/jtdm.2026.7637.3415>
- Alkaraan, F., Elmarzouky, M., Hussainey, K., & Venkatesh, V. G. (2024). Reinforcing green business strategies with industry 4.0 and governance towards sustainability: Natural-resource-based view and dynamic capability. *Business Strategy and the Environment*, 33(2), 730–748. <https://doi.org/10.1002/bse.3665>
- Al-Shetwi, A. Q., Hannan, M. A., Jern, K. P., & Rahman, M. S. A. (2024). Latest advancements in smart grid technologies and their transformative role in shaping the power systems of tomorrow: An overview. *Progress in Energy*. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ada198> .
- Attah, R. U., Eyo-Udo, N. L., & Oladeinde, M. H. (2024). Digital transformation in the energy sector: Comprehensive review of sustainability impacts and economic benefits. *International Journal of Advanced Economics*, 6(12). <https://doi.org/10.51594/ijae.v6i12.1751> .
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 107776. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>

- Bassey, K. E., Oladipo, S. S., & Ekechukwu, D. E. (2024). Economic impact of digital twins on renewable energy investments. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(7). <https://doi.org/10.51594/estj.v5i7.1318> .
- Bonilla, S. H., Silva, H. R. O., da Silva, M. T., Gonçalves, R. F., & Sacomano, J. B. (2018). Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. *Sustainability*, 10(10), 3740. <https://doi.org/10.3390/su10103740>
- Charfeddine, L., & Umlai, M. I. (2023). ICT sector, digitization and environmental sustainability: A systematic review of the literature from 2000 to 2022. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 181, 113482. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113482>
- Dekeyrel, S., & Fessler, M. (2023). Digitalisation: An enabler for the clean energy transition. *Journal of Energy & Natural Resources Law*. <https://doi.org/10.1080/02646811.2023.2254103> .
- Eshbayev, O., Bakhramova, M., & Turayev, S. (2024). Advancing green technology systems through digital economy innovations: A study on sustainable. *E3S Web of Conferences*, 576. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457602009> .
- Furstenau, L. B., Sott, M. K., Kipper, L. M., Machado, Ê. L., López-Robles, J. R., Dohan, M. S., ... & Imran, M. A. (2020). Link between sustainability and industry 4.0: Trends, challenges and new perspectives. *IEEE Access*, 8, 140079–140096. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012812>
- Goleij, R., Aghajani, H., & Soltanzadeh, J. (2024). Factors hindering the establishment of renewable energy businesses in Northern Iran. *Journal of Technology Development Management*, 12(2), 102-138. [In Persian] <https://doi.org/10.22104/jtdm.2024.6460.3222>
- Hosseini, S. K., Momeni, M., & Haji Gholam Saryazdi, A. (2025). Identification and ranking of barriers to implementing the 4th generation industry based on supply chain sustainability and circular economy. *Journal of Technology Development Management*, 12(4), 85-120. [In Persian] <https://doi.org/10.22104/jtdm.2025.7298.3380>
- Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., & Giallanza, A. (2021). Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: A systematic review and future research directions. *Applied Sciences*, 11(12), 5725. <https://doi.org/10.3390/app11125725>

- Javed, S., Frincu, M., Alghamdi, A., & Noor, A. (2023). An approach towards demand response optimization at the edge in smart energy systems using local clouds. *Smart Energy*, 11, 100123. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100123> .
- Karimian Khouzani, H., Tabatabaeian, S. H., Mousavi Dorcheh, S. M., & Shojaei, S. M. H. (2025). Analyzing conflicts and power relations of effective actors in technological transition governance: A case study of renewable energy in Iran. *Journal of Technology Development Management*, 13(1). [In Persian] <https://doi.org/10.22104/jtdm.2025.7199.3369>
- Kaur, S., Kumar, R., & Singh, K. (2025). Sustainable component-level prioritization of PV panels, batteries, and converters for solar technologies in hybrid renewable energy systems using objective-weighted MCDM models. *Energies*, 18(20), 5410. <https://doi.org/10.3390/en18205410>
- Linkov, I., Satterstrom, F. K., Kiker, G. A., Batchelor, C., Bridges, T. S., & Ferguson, E. (2006). From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications. *Environment International*, 32(8), 1072–1093. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.06.013>
- Masoomi, B., Sahebi, I. G., & Ghobakhloo, M. (2023). Do industry 5.0 advantages address the sustainable development challenges of the renewable energy supply chain? *Sustainable Production and Consumption*, 43, 430–451. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.018>
- Moussa, M. A., El-Banna, M., & El-Saadawi, M. M. (2022). A hybrid renewable energy production system using a smart controller based on fuzzy logic. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (3), 47–53. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.07>
- Otoum, S., Al Ridhawi, I., & Mouftah, H. T. (2022). A federated learning and blockchain-enabled sustainable energy trade at the edge: A framework for Industry 4.0. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(22), 22724–22735. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3140430>
- Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>

- Radvilė, E., & Urbonas, R. (2025). Digital transformation in energy systems: A comprehensive review of AI, IoT, blockchain, and decentralised energy models. *Energetika*. <https://doi.org/10.6001/energetika.2025.71.1.1> .
- Shahzad, M. F., Liu, H., & Zahid, H. (2024). Industry 4.0 technologies and sustainable performance: Do green supply chain collaboration, circular economy practices, technological readiness and environmental dynamism matter? *Journal of Manufacturing Technology Management*, 35(2), 221–245. <https://doi.org/10.1108/JMTM-05-2024-0236>
- Steindl, G., Stagl, M., Kasper, L., Kastner, W., & Hofmann, R. (2020). Generic digital twin architecture for industrial energy systems. *Applied Sciences*, 10(24), 8903. <https://doi.org/10.3390/app10248903>
- Sulek, A., & Borowski, P. F. (2024). Business models on the energy market in the era of a low-emission economy. *Energies*, 17(13), 3235. <https://doi.org/10.3390/en17133235> .
- Vallarta-Serrano, S. I., Tahmassebi, N., & Gandomi, A. H. (2023). Integrated sustainability assessment framework of industry 4.0 from an energy systems thinking perspective: Bibliometric analysis and systematic literature review. *Energies*, 16(14), 5440. <https://doi.org/10.3390/en16145440> .
- Vrchota, J., Pech, M., Řehoř, P., & Mařík, J. (2020). Sustainability outcomes of green processes in relation to industry 4.0 in manufacturing: Systematic review. *Sustainability*, 12(15), 5968. <https://doi.org/10.3390/su12155968>
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Zhao, N., You, F., & Li, Z. (2023). Emerging information and communication technologies for smart energy systems and renewable transition. *Advances in Applied Energy*, 12, 100125. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100125>