



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2026.2089502.2047



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

A Framework for Sustainable Circular Energy Supply Chain Management with an Industry 4.0 Approach: Application of the Fuzzy-ISM Method

Ali Ehsani^{1*}, Amir Ehsan Zahedi¹

¹ Assistant Professor, Department of Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, Arak University, Arak, Iran

Received: 12 Jun 2026 Accepted: 22 Jul 2026

Abstract

With the expansion of sustainability requirements, the transition to a circular economy in the energy industry become a strategic necessity. The aim of the research is to provide a framework for explaining the relationships between factors affecting the sustainable circular energy supply chain based on Industry 4.0. The research is qualitative-quantitative. The population is managers of the Iranian oil and petrochemical industry, 22 people interviewed using snowball sampling. Fuzzy Interpretive Structural Modeling used to analyze the relationships. Industry 4.0 technologies and supply chain digitalization play the main driving role of the system, data management and smart decision-making play an intermediary role. Governance and policy-making act as the institutional infrastructure, and operational performance and supply chain resilience as the final output of the system. Oil and petrochemical industry managers make targeted investments in digital energy technologies, integrate ESG requirements into energy supply chain strategy, and develop digital human resources skills.

Keyword: Circular Economy, Industry 4.0, Energy Supply Chain, Sustainability, Oil and Petrochemical Industry

* a-zahedimoghadam@araku.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Ehsani, A., Zahedi, A.E., "A Framework for Sustainable Circular Energy Supply Chain Management with an Industry 4.0 Approach: Application of the Fuzzy-ISM Method", Journal of Farayandno – Vol. 21 – No. 94, pp. 41-58, In Persian, (2026).



DOI: 10.22034/farayandno.2026.2089502.2047



This journal is an open access journal licensed under an
Attribution-Non Commercial 4.0
International Licenses (CC BY-NC 4.0).

ارائه چهارچوبی برای مدیریت زنجیره تأمین انرژی چرخشی پایدار با رویکرد صنعت ۴/۰: کاربرد روش Fuzzy-ISM در صنایع نفت و پتروشیمی ایران

علی احسانی^{۱*}، امیراحسان زاهدی^۱

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

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۲ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۳۱

چکیده

با گسترش الزامات پایداری و فشارهای زیست‌محیطی، گذار به اقتصاد چرخشی در صنعت انرژی به یک ضرورت راهبردی تبدیل شده است. هدف پژوهش، ارائه چهارچوبی برای تبیین روابط بین عوامل مؤثر بر زنجیره تأمین انرژی چرخشی پایدار مبتنی بر صنعت ۴/۰ است. پژوهش از نظر ماهیت داده‌ها، آمیخته کیفی-کمی است. جامعه آماری، مدیران صنعت نفت و پتروشیمی ایران هستند که به روش نمونه‌گیری گلوله‌برفی با ۲۲ نفر مصاحبه شد. برای تحلیل روابط از مدل‌سازی ساختاری تفسیری فازی استفاده شد. نتایج نشان داد فناوری‌های صنعت ۴/۰ و دیجیتال‌سازی زنجیره تأمین نقش پیش‌ران اصلی سیستم را دارند، در حالی که مدیریت داده و تصمیم‌گیری هوشمند نقش واسطه‌ای دارند. حکمرانی و سیاست‌گذاری به عنوان زیرساخت نهادی عمل کرده و عملکرد عملیاتی و تاب‌آوری زنجیره تأمین به عنوان خروجی نهایی سیستم تحت تأثیر سایر عوامل قرار دارند. پیشنهاد می‌شود مدیران صنعت نفت و پتروشیمی به سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های دیجیتال انرژی، یکپارچه‌سازی الزامات ESG در راهبرد زنجیره تأمین انرژی و توسعه مهارت‌های دیجیتال نیروی انسانی بپردازند.

کلمات کلیدی: اقتصاد چرخشی، صنعت ۴/۰، زنجیره تأمین انرژی، پایداری، صنعت نفت و پتروشیمی

* a-zahedimoghadam@araku.ac.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، صنعت نفت، گاز و پتروشیمی به‌عنوان ستون فقرات اقتصاد انرژی در بسیاری از کشورها، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه و نفت‌خیز، با چالش‌های فزاینده‌ای در حوزه پایداری، بهره‌وری منابع و الزامات زیست‌محیطی مواجه شده است [۱]. الگوی غالب تولید و مصرف در این صنعت، که مبتنی بر منطق «استخراج-تولید-مصرف-دفع» است، اگرچه در کوتاه‌مدت رشد اقتصادی و تأمین انرژی را ممکن ساخته، اما در بلندمدت منجر به افزایش شدت انرژی، اتلاف منابع، تولید گسترده پسماندهای خطرناک و تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است. در چنین شرایطی، بازاندیشی در مدل‌های سنتی زنجیره تأمین انرژی و حرکت به‌سوی الگوهای نوین مدیریتی که بتوانند همزمان اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را محقق سازند، به یک ضرورت راهبردی تبدیل شده است [۲]. یکی از رویکردهای نوظهور و اثرگذار در پاسخ به این چالش‌ها، اقتصاد چرخشی است که با هدف کاهش وابستگی به منابع اولیه، افزایش طول عمر مواد و تجهیزات و بازگردانی پسماندها به چرخه ارزش، تلاش می‌کند منطق خطی تولید را به منطق حلقوی تبدیل کند. برخلاف اقتصاد خطی، اقتصاد چرخشی بر مفاهیمی نظیر بازیافت، بازتولید، بازاستفاده، احیای مواد و طراحی چرخه‌عمرمحور تأکید دارد [۳]. در صنعت نفت و پتروشیمی، این رویکرد می‌تواند به‌صورت‌هایی چون کاهش فلرینگ گاز، احیای کاتالیست‌های مصرف‌شده، بازیافت حرارت اتلافی، مدیریت هوشمند پسماندهای شیمیایی و بهینه‌سازی چرخه عمر تجهیزات نمود پیدا کند. با این حال، پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در صنایع انرژی‌محور به دلیل پیچیدگی فرآیندها، سرمایه‌بر بودن فناوری‌ها و درهم‌تنیدگی بازیگران زنجیره تأمین، با موانع ساختاری و مدیریتی متعددی روبه‌رو است [۲].

ازسوی دیگر، ظهور فناوری‌های صنعت ۴/۰ و به‌طور خاص انرژی ۴/۰، فرصت بی‌سابقه‌ای برای تحول در زنجیره‌های تأمین انرژی فراهم آورده است. فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، تحلیل کلان‌داده‌ها، هوش مصنوعی، دوقلوی دیجیتال و سیستم‌های هوشمند پایش و کنترل، امکان نظارت لحظه‌ای، تصمیم‌گیری داده‌محور و بهینه‌سازی مستمر فرآیندها را فراهم می‌کنند [۴]. همان‌گونه که مطالعات اخیر در حوزه مدیریت زنجیره تأمین نشان می‌دهد، ادغام هوشمندانه این فناوری‌ها با اصول اقتصاد چرخشی می‌تواند منجر به ایجاد زنجیره‌های تأمین حلقوی، انعطاف‌پذیر و کم‌کربن شود [۵]. با این وجود، چگونگی این ادغام، روابط میان عوامل مؤثر و نقش هر یک از مؤلفه‌ها در تحقق پایداری، همچنان به‌صورت نظام‌مند و ساختاریافته مورد بررسی قرار نگرفته است، به‌ویژه در بستر کشورهای در حال توسعه مانند ایران. در ایران، صنعت نفت و پتروشیمی علاوه بر نقش کلیدی در تأمین انرژی و درآمدهای ارزی، با مسائلی نظیر شدت بالای مصرف انرژی، اتلاف گسترده منابع، فلرینگ قابل توجه گاز، فرسودگی تجهیزات، محدودیت‌های سرمایه‌گذاری و فشارهای زیست‌محیطی فزاینده مواجه است [۶]. این مسائل نه تنها کارایی اقتصادی بنگاه‌های انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه تحقق اهداف کلان توسعه پایدار و سیاست‌های ملی انرژی را نیز با چالش روبه‌رو می‌سازد. در چنین بستری، استفاده از راهکارهای صرفاً فناورانه یا سیاست‌های جزیره‌ای، بدون در نظر گرفتن ساختار کلان زنجیره تأمین و روابط علی میان عوامل مختلف، نمی‌تواند پاسخ‌گوی پیچیدگی موجود باشد [۷].

مسئله اصلی این پژوهش از این واقعیت ناشی می‌شود که اگرچه مفاهیم اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴/۰ هر یک به‌طور مستقل در ادبیات مدیریت انرژی و مهندسی صنایع مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما چهارچوبی یکپارچه که روابط متقابل این دو رویکرد را در قالب زنجیره تأمین انرژی و در شرایط عدم قطعیت تحلیل کند، به‌ویژه در زمینه

بومی ایران، کمتر توسعه یافته است. افزون‌براین، تصمیم‌گیری در صنعت انرژی ایران غالباً با ابهام، قضاوت‌های خبرگانی و داده‌های ناقص همراه است؛ موضوعی که استفاده از روش‌های کلاسیک کمی را با محدودیت مواجه می‌سازد و نیاز به رویکردهای فازی و ساختاریافته را برجسته می‌کند.

بررسی ادبیات موجود نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌های پیشین یا بر ارزیابی عملکرد اقتصاد چرخشی تمرکز داشته‌اند، یا به کاربرد فناوری‌های دیجیتال در صنعت انرژی پرداخته‌اند، بدون آنکه روابط علی، سلسله‌مراتبی و درهم‌تنیده میان عوامل مؤثر بر زنجیره تأمین حلقوی انرژی را به‌صورت نظام‌مند تبیین کنند [۸]. همچنین، بخش عمده‌ای از مطالعات تجربی در این حوزه به صنایع تولیدی سبک یا کشورهای توسعه‌یافته محدود شده و قابلیت تعمیم آن‌ها به صنایع انرژی‌بر و شرایط خاص کشورهای در حال توسعه، محل تردید است. این در حالی است که ماهیت سرمایه‌بر، پیچیده و پرریسک صنعت نفت و پتروشیمی، نیازمند چهارچوب‌های تصمیم‌گیری متفاوت و متناسب با واقعیت‌های بومی است.

براین‌اساس، شکاف اصلی تحقیق حاضر را می‌توان در نبود یک مدل مفهومی ساختاریافته برای شناسایی و سطح‌بندی عوامل توانمندساز اقتصاد چرخشی انرژی در تعامل با فناوری‌های انرژی ۴/۰ دانست؛ مدلی که بتواند با در نظر گرفتن عدم قطعیت و قضاوت‌های خبرگانی، روابط میان این عوامل را در زنجیره تأمین انرژی ایران تحلیل کند. پژوهش حاضر با الهام از منطق مطالعات اخیر در حوزه مدیریت زنجیره تأمین حلقوی و با بهره‌گیری از روش مدل‌سازی ساختاری تفسیری فازی (Fuzzy-ISM)، تلاش می‌کند این خلأ را پوشش دهد و چهارچوبی بومی و کاربردی برای مدیران و سیاست‌گذاران انرژی ارائه نماید.

در کنار شکاف‌های شناسایی‌شده در ادبیات، توجه به تحولات بین‌المللی در حوزه حکمرانی زنجیره تأمین انرژی نشان می‌دهد که حرکت به سمت اقتصاد چرخشی و بهره‌گیری از فناوری‌های انرژی ۴/۰، به یک الزام رقابتی و نهادی تبدیل شده است [۹]. تجربه کشورهای پیشرو حاکی از آن است که دستیابی هم‌زمان به رشد اقتصادی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی تنها در صورتی امکان‌پذیر است که زنجیره‌های تأمین از منظر ساختاری، اطلاعاتی و تصمیم‌گیری بازطراحی شوند. در این راستا، مفاهیمی نظیر شفافیت زنجیره تأمین، قابلیت ردیابی جریان مواد، اعتماد میان ذی‌نفعان و هماهنگی افقی و عمودی، به‌عنوان پیش‌نیازهای تحقق پایداری مطرح شده‌اند [۳].

فناوری‌هایی مانند تحلیل کلان‌داده‌ها، اینترنت اشیاء صنعتی و بلاک‌چین، بستر لازم برای تحقق این الزامات را فراهم می‌کنند. تحلیل کلان‌داده‌ها امکان پردازش حجم عظیمی از داده‌های عملیاتی، زیست‌محیطی و اقتصادی را فراهم کرده و زمینه تصمیم‌گیری آگاهانه و پیش‌نگرانه را در زنجیره تأمین انرژی ایجاد می‌کند [۱۰]. از سوی دیگر، بلاک‌چین با ایجاد یک دفترکل توزیع‌شده و غیرقابل دست‌کاری، نقش مهمی در ارتقاء شفافیت، اعتماد و قابلیت ردیابی در فرآیندهای تأمین، تولید، توزیع و لجستیک معکوس ایفا می‌نماید. این ویژگی‌ها به‌ویژه در زنجیره‌های تأمین چرخشی که مبتنی بر بازگشت مواد، بازیافت و بازتولید هستند، اهمیت دوچندان می‌یابند [۱۱].

علاوه‌براین، ادبیات جدید بر نقش نقاط جدایش تولید و سفارش در افزایش انعطاف‌پذیری و پاسخ‌گویی زنجیره تأمین تأکید دارد. تنظیم هوشمندانه نقاط جدایش، با پشتیبانی فناوری‌های انرژی ۴/۰، می‌تواند به کاهش عدم قطعیت، بهینه‌سازی موجودی، کاهش اتلاف منابع و تقویت بهره‌وری پایدار منجر شود [۱۲]. با این حال، شناسایی روابط علی

میان این مؤلفه‌ها و نحوه اثرگذاری آن‌ها بر پایداری زنجیره تأمین انرژی، همچنان نیازمند تحلیل‌های ساختاریافته و متناسب با شرایط بومی است.

هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک چهارچوب مفهومی برای مدیریت زنجیره تأمین انرژی چرخشی پایدار در صنایع نفت و پتروشیمی ایران با رویکرد انرژی ۴/۰ است. به‌طور مشخص، این تحقیق در پی پاسخ به پرسش‌های زیر است:

- مهم‌ترین عوامل توانمندساز اقتصاد چرخشی انرژی در زنجیره تأمین صنایع نفت و پتروشیمی ایران کدام‌اند؟
- این عوامل چه روابط علی و سلسله‌مراتبی با یکدیگر دارند و کدامیک نقش پیش‌ران ایفا می‌کنند؟
- چگونه می‌توان با استفاده از فناوری‌های انرژی ۴/۰، فرآیندهای تولید پاک، بهره‌وری انرژی و مدیریت پسماند را در زنجیره تأمین انرژی تقویت کرد؟
- نتایج حاصل چه پیامدهایی برای مدیران بنگاه‌های انرژی و سیاست‌گذاران حوزه انرژی و محیط‌زیست به‌همراه دارد؟

۲- مدیریت زنجیره تأمین انرژی چرخشی پایدار با رویکرد صنعت ۴/۰

۲-۱- گذار از اقتصاد خطی به اقتصاد چرخشی در زنجیره‌های تأمین

ادبیات کلاسیک مدیریت زنجیره تأمین عمدتاً مبتنی بر منطق اقتصاد خطی «برداشت-تولید-مصرف-دفع» بوده است. این رویکرد، اگرچه در کوتاه‌مدت موجب افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها شده، اما در بلندمدت پیامدهایی نظیر کاهش منابع طبیعی، افزایش پسماند، ناپایداری زیست‌محیطی و آسیب‌پذیری زنجیره‌های تأمین در برابر شوک‌های بیرونی را به‌همراه داشته است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که نوسانات قیمت مواد اولیه، مقررات زیست‌محیطی سخت‌گیرانه و فشار ذی‌نفعان، ناکارآمدی مدل خطی را بیش‌ازپیش آشکار ساخته‌اند [۱۳].

در پاسخ به این چالش‌ها، مفهوم اقتصاد چرخشی (Circular Economy) به‌عنوان یک پارادایم جایگزین مطرح شده است. اقتصاد چرخشی بر حفظ ارزش مواد، انرژی و محصولات در طول چرخه عمر تأکید دارد و از طریق راهبردهایی مانند استفاده مجدد، تعمیر، بازتولید، نوسازی و بازیافت، جریان‌های بسته یا نیمه‌بسته مواد را ترویج می‌کند [۱۴]. پژوهش‌هایی مانند وگتر و همکاران و کومار، سینگ و کومار نشان می‌دهند که تحقق اهداف اقتصاد چرخشی بدون بازطراحی ساختار زنجیره‌های تأمین امکان‌پذیر نیست [۱۳ و ۱۵].

ازاین‌منظر، زنجیره تأمین چرخشی به‌عنوان بستر عملیاتی اقتصاد چرخشی معرفی می‌شود. در زنجیره‌های تأمین چرخشی، نه‌تنها جریان روبه‌جلو (تأمین، تولید و توزیع) بلکه جریان‌های معکوس نیز به‌صورت نظام‌مند مدیریت می‌شوند [۳]. ادغام این جریان‌ها می‌تواند منجر به کاهش ضایعات، کاهش انتشار کربن و افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین شود. علاوه‌براین، مطالعات انجام‌شده در اقتصادهای درحال توسعه نشان می‌دهد که گذار به زنجیره‌های تأمین چرخشی می‌تواند فرصت‌های اشتغال جدید و مزیت‌های رقابتی پایداری ایجاد کند [۷].

۲-۲- مدیریت زنجیره تأمین چرخشی (CSCM) و ارزیابی عملکرد پایداری

مدیریت زنجیره تأمین چرخشی به‌عنوان توسعه‌ای از مدیریت زنجیره تأمین پایدار، بر یکپارچه‌سازی اصول اقتصاد چرخشی در تصمیمات راهبردی، تاکتیکی و عملیاتی زنجیره تأمین تمرکز دارد. برخلاف مدیریت زنجیره تأمین سنتی

که عمدتاً بر کارایی هزینه و زمان تحویل تأکید دارد، مدیریت زنجیره تأمین چرخشی، عملکرد زنجیره تأمین را از منظر ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به‌صورت هم‌زمان ارزیابی می‌کند [۸].

ادبیات نشان می‌دهد که یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت زنجیره تأمین چرخشی، تعریف و اندازه‌گیری شاخص‌های عملکرد مناسب است. فاطیما و همکاران با ارائه ماتریس ارزیابی عملکرد، شاخص‌هایی مانند بازیافت، بازتولید، استفاده مجدد و کاهش ضایعات را به‌عنوان مؤلفه‌های کلیدی معرفی کردند. این شاخص‌ها به‌طور مستقیم با «ابعاد درجه پایداری (Sustainability Degree Aspects-SDAs)» در ارتباط هستند که در مطالعات قبلی به‌عنوان معیار ارزیابی پایداری زنجیره‌های تأمین چرخشی معرفی شدند [۱۶].

مطالعات تجربی نشان می‌دهند که مدیریت زنجیره تأمین چرخشی یک سیستم ایستا نیست، بلکه یک سیستم پویا و چندبازیگری است که نیازمند هماهنگی میان طراحی محصول، تولید، لجستیک معکوس و همکاری بین‌سازمانی است. هایدنبورک، ژانگ و وانگ (۲۰۲۳) تأکید می‌کنند که پیاده‌سازی موفق مدیریت زنجیره تأمین چرخشی مستلزم تحول در مدل‌های کسب‌وکار و ساختارهای حکمرانی زنجیره تأمین است. این تحول، زمینه را برای ادغام فناوری‌های نوین و سازوکارهای نوآورانه فراهم می‌کند [۱۷].

۲-۳- نقش صنعت ۴/۰ در توانمندسازی زنجیره‌های تأمین چرخشی

صنعت ۴/۰ به‌عنوان موج چهارم انقلاب صنعتی، مجموعه‌ای از فناوری‌های دیجیتال نظیر اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، کلان‌داده، سیستم‌های سایبر-فیزیکی و اتوماسیون هوشمند را دربر می‌گیرد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که این فناوری‌ها نقش کلیدی در افزایش شفافیت، انعطاف‌پذیری و قابلیت ردیابی زنجیره‌های تأمین ایفا می‌کنند [۱۱]. در ادبیات مدیریت زنجیره تأمین چرخشی، صنعت ۴/۰ به‌عنوان یک توانمندساز برای پیاده‌سازی مؤثر اصول اقتصاد چرخشی شناخته می‌شود. ترکیب CE و صنعت ۴/۰، امکان مدیریت هوشمند جریان‌های مواد، تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و بهینه‌سازی نقاط جداسازی تولید (Decoupling Points) را فراهم می‌سازد. این نقاط جداسازی، تعیین می‌کنند که زنجیره تأمین در کدام مرحله از منطق تولید انبوه به تولید سفارشی تغییر مسیر می‌دهد [۱۸]. مطالعات نشان می‌دهند که صنعت ۴/۰ از طریق افزایش قابلیت‌های تحلیل داده، هماهنگی بهتر میان ذی‌نفعان و بهبود پاسخ‌گویی به تقاضای مشتری، می‌تواند عملکرد پایداری زنجیره‌های تأمین چرخشی را به‌طور معناداری ارتقاء دهد. در صنایع مختلفی، این فناوری‌ها امکان مدیریت هوشمند پسماند، بازیافت مؤثر و تولید انعطاف‌پذیر را فراهم کرده‌اند [۱۹].

۲-۴- نقش کلان‌داده، بلاک‌چین و حکمرانی در مدیریت زنجیره تأمین چرخشی

کلان‌داده و تحلیل داده‌های بزرگ (BDA) به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی صنعت ۴/۰، نقش مهمی در ایجاد شفافیت، پیش‌بینی تقاضا و بهینه‌سازی تصمیمات زنجیره تأمین ایفا می‌کند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که فرهنگ داده‌محور و حکمرانی داده (Data Governance) از پیش‌نیازهای اساسی موفقیت در پیاده‌سازی مدیریت زنجیره تأمین چرخشی هستند [۲۰].

ازسوی دیگر، فناوری بلاکچین به‌عنوان ابزاری برای ایجاد اعتماد، شفافیت و قابلیت ردیابی در زنجیره‌های تأمین چرخشی معرفی شده است. بلاک‌چین امکان ثبت غیرقابل تغییر اطلاعات مربوط به منشأ مواد، فرآیندهای بازیافت و

جریان‌های لجستیک معکوس را فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها به‌ویژه در زنجیره‌های تأمین چندبازیگری و بین‌سازمانی اهمیت دارند [۲۱]. ادبیات حکمرانی زنجیره تأمین نشان می‌دهد که بدون سازوکارهای حکمرانی مناسب، پیاده‌سازی فناوری‌های پیشرفته و اصول اقتصاد چرخشی با چالش‌های جدی مواجه خواهد شد. نقش رهبری سازمانی، همکاری افقی و عمودی، و سیاست‌های حمایتی دولت در این زمینه به‌طور گسترده مورد تأکید قرار گرفته است [۲۲]. خلاصه تحقیقات مرتبط داخلی در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱- خلاصه تحقیقات داخلی

نویسنده	خلاصه مقاله
نجفی و همکاران	با تمرکز بر صنعت نفت و گاز، نشان می‌دهند که زنجیره تأمین پایدار دیگر صرفاً به ملاحظات زیست‌محیطی محدود نمی‌شود، بلکه نیازمند هم‌افزایی هم‌زمان قابلیت‌های ناب، چابک و پایدار است. نتایج مدل‌سازی ساختاری تفسیری این پژوهش حاکی از آن است که برخی عوامل نظیر تعهد مدیریت ارشد، شفافیت، همکاری بین اعضای زنجیره و استفاده از فناوری اطلاعات در سطوح پیش‌ران و توانمندساز پایه قرار می‌گیرند و نقش زیربنایی در عملکرد کل سیستم دارند [۲۳].
شاهی‌پسند و همکاران	با استفاده از متدولوژی سیستم‌های نرم (SSM)، زنجیره تأمین برق را از منظر ذی‌نفعان و با تأکید بر مفاهیم صنعت ۴/۰ تحلیل کرده‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد که پیچیدگی زنجیره‌های تأمین زیرساختی، بدون تحلیل هم‌زمان ذی‌نفعان، اهداف و تعاملات آن‌ها قابل مدیریت نیست. در این مطالعه، سه دیدگاه پایدار، تاب‌آور و فناورانه به‌عنوان ابعاد کلیدی زنجیره تأمین برق شناسایی شده‌اند. یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که مفاهیمی مانند مدیریت انرژی، کاهش گازهای گلخانه‌ای، انعطاف‌پذیری منابع، دیجیتال‌سازی، و نوآوری فناورانه باید در قالب یک سیستم یکپارچه تحلیل شوند [۲۴].
شریفیان‌جزی و همکاران	در حوزه مدیریت زنجیره تأمین چرخشی، محققین تمرکز خود را بر شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌های پیاده‌سازی مدیریت زنجیره تأمین چرخشی قرار داده‌اند. این مطالعه با بررسی نظام‌مند ادبیات و تحلیل محتوای کیفی، ۳۳ چالش را در شش بُعد اصلی (قوانین و مقررات، بازار، اجتماعی، سازمانی، تکنولوژیکی، مالی-اقتصادی) شناسایی کرده است [۲۵].
شریفیان‌جزی و همکاران	به بررسی هم‌زمان چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی و صنعت ۴/۰ در مدیریت زنجیره تأمین پرداخته‌اند. این پژوهش با ترکیب تحلیل محتوای کیفی و نقشه‌شناختی فازی شهودی، چالش‌ها را در چهار بُعد فرهنگی-آموزشی، مالی-قانونی، زیرساختی-تکنولوژیکی و سازمانی-استراتژیک دسته‌بندی می‌کند [۲۶].
یاوری و همکاران	با تمرکز بر زنجیره تأمین توربین‌های بادی، اقتصاد چرخشی را از منظر مدیریت مواد بحرانی، پایان عمر محصولات و ارزیابی چرخه عمر بررسی کرده‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد که در صنایع مبتنی بر فناوری‌های پیشرفته، ریسک‌های مرتبط با مواد خام و عناصر استراتژیک، اهمیت رویکردهای چرخشی را دوچندان می‌کند [۲۷].

۳- روش

پژوهش حاضر جهت‌گیری کاربردی و توسعه‌ای دارد، از نظر ماهیت داده‌ها، یک طرح آمیخته کیفی-کمی است و از نظر نحوه گردآوری داده‌ها، توصیفی محسوب می‌شود. جامعه آماری پژوهش، مدیران ارشد، میانی و عملیاتی صنعت نفت و پتروشیمی ایران هستند. ابزار گردآوری داده‌ها، مصاحبه‌های عمیق نیمه‌ساختاریافته با خبرگان می‌باشد. نمونه‌گیری از خبرگان به روش غیراحتمالی و از نوع گلوله‌برفی است. در زمان انجام مصاحبه‌ها سعی گردید با استفاده از نظر

مصاحبه‌شوندگان، افراد دیگری به لیست مصاحبه‌ها اضافه کردند تا بر غنای کار افزوده شود در مجموع با ۲۲ نفر از مدیران مصاحبه شد. مشخصات جمعیت‌شناختی مصاحبه‌شوندگان به شرح جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات جمعیت‌شناختی مصاحبه‌شوندگان

ویژگی‌های جمعیت‌شناختی	گروه‌ها	فراوانی
جنسیت	آقا	۱۸
	خانم	۶
تحصیلات	لیسانس	۲
	فوق لیسانس	۱۲
	دکتری	۸
تجربیات	۱۵-۱۰ سال	۴
	۲۰-۱۵ سال	۹
	۲۵-۲۰ سال	۷
	۳۰-۲۵ سال	۲

براساس مرور نظام‌مند ادبیات و به‌ویژه چهارچوب ترکیبی صنعت ۴/۰ و اقتصاد چرخشی (CEDWI 4.0)، مجموعه‌ای از عوامل به‌عنوان توانمندسازهای کلیدی یکپارچه‌سازی اقتصاد چرخشی و عملکرد پایداری در مدیریت زنجیره تأمین چرخشی شناسایی شدند. این عوامل، حوزه‌های مختلفی از جمله تولید پاک، بهره‌وری پایدار، مدیریت پسماند، انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین، شفافیت و قابلیت ردیابی، فناوری‌های صنعت ۴/۰، حکمرانی داده و همکاری بین‌سازمانی را پوشش می‌دهند. متغیرهای منتخب این پژوهش حاصل یک فرآیند چندمرحله‌ای هستند. در مرحله نخست، ادبیات کلیدی مرتبط با اقتصاد چرخشی، مدیریت زنجیره تأمین چرخشی و صنعت ۴/۰ به‌صورت تحلیلی مرور شد و عوامل پرتکرار و دارای پشتوانه تجربی استخراج گردید. در مرحله دوم، این عوامل با چهارچوب مفهومی CEDWI 4.0 تطبیق داده شدند تا از هم‌راستایی نظری آن‌ها اطمینان حاصل شود. در نهایت، از نظر خبرگان صنعتی و دانشگاهی برای پالایش و اعتبارسنجی متغیرها استفاده شد تا مجموعه‌ای منسجم، غیرتکراری و قابل تحلیل ساختاری حاصل شود. با توجه به ماهیت پیچیده و تعاملی متغیرهای شناسایی‌شده، روش‌های آماری متعارف قادر به تبیین روابط علی و سلسله‌مراتبی میان آن‌ها نیستند. از این‌رو، روش مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM) به‌عنوان یک رویکرد مناسب برای تحلیل روابط بین متغیرهای منتخب انتخاب شد. ISM امکان شناسایی متغیرهای محرک، وابسته و پیوندی را فراهم می‌کند و به درک عمیق‌تری از ساختار درونی سیستم مدیریت زنجیره تأمین چرخشی مبتنی بر CEDWI 4.0 منجر می‌شود. این رویکرد، شکاف موجود در ادبیات را پوشش داده و مبنایی نظری-تحلیلی برای توسعه چهارچوب پیشنهادی پژوهش فراهم می‌سازد.

جهت اعتبارسنجی، از دو روش بازبینی مشارکت‌کنندگان و مرور خبرگان غیرشرکت‌کننده در پژوهش (۳ نفر از مدیران و ۳ نفر از اعضای هیئت‌علمی مرتبط) استفاده شد. به این ترتیب که طی جلسات جداگانه، روابط میان عوامل و

الگوی اولیه مورد بررسی و بازبینی قرار گرفت و پس از دریافت نظرات اصلاحی، ویرایش لازم انجام و الگوی نهایی ارائه شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- شناسایی متغیرهای مرتبط با مسأله

با مرور تحلیلی ادبیات و تأیید خبرگان مهم‌ترین مؤلفه‌های مرتبط با اقتصاد چرخشی، مدیریت زنجیره تأمین چرخشی و صنعت ۴/۰ به شرح جدول ۳ شناسایی شد.

جدول ۳- مؤلفه‌های هوش مصنوعی و کلان داده در تاب‌آوری زنجیره تأمین

عوامل	نماد	شاخص‌ها	منبع
گذار به اقتصاد چرخشی و تولید پاک	F1	پایش و مدیریت گذار از اقتصاد خطی به اقتصاد چرخشی	[۲ و ۳ و ۵ و ۸ و ۹ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵]
		پیوندهای اقتصاد چرخشی در ارتقاء اکوسیستم تولید پاک	
		توانمندسازی تولید پاک در چهارچوب اقتصاد چرخشی	
مدیریت منابع، پسماند و چرخه عمر دارایی‌ها	F2	بازیافت و استفاده مجدد از گازهای فلر	[۲ و ۳ و ۱۳ و ۱۹]
		احیای کاتالیست‌ها و مواد شیمیایی مصرف‌شده	
		دیجیتال‌سازی مدیریت پسماندهای نفتی	
فناوری‌های صنعت ۴/۰ و دیجیتال‌سازی زنجیره تأمین	F3	توانمندسازی عملکرد منابع چرخشی از طریق صنعت ۴/۰	[۴ و ۱۱ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۴]
		یکپارچه‌سازی صنعت ۴/۰ و اینترنت اشیاء در تحول دیجیتال تولید	
		پایش هوشمند مصرف انرژی (IoT-based EMS)	
		سیستم‌های هوشمند پایش و کنترل	
مدیریت داده، کلان داده و تصمیم‌گیری هوشمند سیستم	F4	تحلیل کلان داده مبتنی بر زنجیره تأمین چرخشی	[۴ و ۱۰ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲]
		تحلیل کلان داده برای بهینه‌سازی تولید	
		تصمیم‌گیری مبتنی بر داده (Data-driven culture)	
		پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر اینترنت اشیاء	
حکمرانی، سیاست‌گذاری و الزامات ESG	F5	نقش زنجیره تأمین چرخشی در سازوکارهای حاکمیتی	[۹ و ۱۷ و ۲۰]
		انطباق با الزامات محیط‌زیستی و ESG	
		هم‌راستاسازی ساختارهای حکمرانی با مدل کسب و کار چرخشی	
شفافیت، اعتماد و قابلیت ردیابی زنجیره تأمین	F6	بلاک چین چرخشی به عنوان توانمندساز اعتماد و شفافیت	[۳ و ۱۱ و ۲۱]
		قابلیت ردیابی سرتاسری جریان مواد	
		مدیریت زنجیره تأمین چرخشی مبتنی بر بلاک چین یکپارچه با RFID	
یکپارچگی، همکاری و خلق ارزش بین بخشی	F7	همکاری‌های بین بخشی در مدیریت زنجیره تأمین چرخشی	[۱۷ و ۲۲ و ۲۶]
		خلق ارزش مشارکتی میان ذی‌نفعان	
		یکپارچگی زنجیره تأمین پالایش-پتروشیمی	
عملکرد عملیاتی، بهره‌وری و تاب‌آوری زنجیره تأمین	F8	کاهش شدت انرژی فرایندها	[۱ و ۷ و ۱۲ و ۱۳ و ۲۷]
		بهینه‌سازی عملکرد تولید	
		انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین انرژی	
		افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین در برابر شوک‌ها	

۴-۲- ایجاد ماتریس دسترسی فازی (FRM)

استفاده از مجموعه های فازی، سازگاری بیشتری با توضیحات زبانی و بعضاً مبهم انسانی دارد و بنابراین بهتر است که با استفاده از مجموعه های فازی به پیش بینی بلندمدت و تصمیم گیری در دنیای واقعی پرداخت. در این مطالعه نیز برای فازی سازی دیدگاه خبرگان از اعداد فازی مثلثی به شرح جدول ۴ استفاده شده است.

جدول ۴- اعداد فازی مثلثی معادل طیف لیکرت ۹ درجه

مقیاس عدد فازی	متغیر زبانی	معادل قطعی
(۱,۱,۱)	تأثیر بسیار ضعیف	۱
(۱,۲,۳)	تأثیر بسیار ضعیف تا ضعیف	۲
(۲,۳,۴)	تأثیر ضعیف	۳
(۳,۴,۵)	تأثیر ضعیف تا متوسط	۴
(۴,۵,۶)	تأثیر متوسط	۵
(۵,۶,۷)	تأثیر متوسط تا قوی	۶
(۶,۷,۸)	تأثیر قوی	۷
(۷,۸,۹)	تأثیر قوی تا بسیار قوی	۸
(۹,۹,۹)	تأثیر بسیار قوی	۹

پس از فازی سازی دیدگاه خبرگان، باید میانگین های فازی نمرات افراد حساب شود. برای محاسبه میانگین نظرات n پاسخ دهنده، میانگین فازی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\tau_j = (L_j, M_j, U_j) \quad L_j = \min(X_{ij}) \quad M_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n X_{ij}} \quad U_j = \max(X_{ij}) \quad (1)$$

انیس i به فرد خبره اشاره دارد. به طوری که: X_{ij} : مقدار ارزیابی خبره i ام از معیار j ام، L_j : حداقل مقدار ارزیابی ها برای معیار j ام، M_j : میانگین هندسی مقدار ارزیابی خبرگان از عملکرد معیار j ام، U_j : حداکثر مقدار ارزیابی ها برای معیار j ام. میانگین فازی n عدد فازی مثلثی با رابطه ۲ محاسبه خواهد شد:

$$\tilde{F}_{AVE} = (L, M, U) = \left(\frac{\sum l_i^k}{n}, \frac{\sum m_i^k}{n}, \frac{\sum u_i^k}{n} \right) \quad (2)$$

که در این رابطه عدد فازی مثلثی $\tilde{f}_i = (l_i^k, m_i^k, u_i^k)$ معادل فازی دیدگاه خبره k ام پیرامون معیار i ام است. مقادیر فازی ارتباط میان عوامل به همراه محاسبه قدرت نفوذ و قدرت وابستگی عوامل به شرح جدول ۵ می باشد.

جدول ۵- ماتریس دسترسی فازی (FRM)

عوامل	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	قدرت نفوذ
F1	۱/۰۰	۰/۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۵	۲/۶۵
F2	۰/۸	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۵	۲/۶۵
F3	۰/۶	۰/۶	۱/۰۰	۰/۹	۰/۸۵	۰/۹	۰/۸۵	۰/۷	۶/۴
F4	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۸	۰/۸۵	۰/۸	۰/۷۵	۵/۳
F5	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۰۰	۰/۸	۱/۰۰	۰/۹	۰/۸۵	۰/۷	۵/۹
F6	۰/۶	۰/۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۹	۰/۸	۴/۹



۴/۲	۰/۹	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۷	۰/۷	F7
۱/۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	F8
	۶/۵۵	۴/۳	۳/۶۵	۳/۴۵	۳/۴	۱/۰	۴/۹	۴/۹	قدرت وابستگی

۴-۳- تشکیل ماتریس خودتعاملی ساختاری (SSIM)

جهت استنباط نوع رابطه میان عوامل از ماتریس دسترسی فازی (FRM) از شاخص‌های جدول ۶ استفاده شد. (X: رابطه دو طرفه، i: V بر زاثر دارد، j: A بر i اثر دارد، O: رابطه ای وجود ندارد).

جدول ۶- شاخص‌های استخراج روابط

نماد در SSIM	نوع رابطه	مقدار فازی
V	رابطه مستقیم	$i_j = 0.7 \sim 0.9 \mu$ $j_i = 0 \mu$
A	رابطه معکوس	$j_i = 0.7 \sim 0.9 \mu$ $i_j = 0 \mu$
X	رابطه دوطرفه	$j_i = 0.6 \sim 0.8 \mu, i_j = \mu$
O	عدم رابطه	$i_j = 0 \mu$
قطر اصلی	خودتأثیری	$i_i = 1 \mu$

براین اساس ماتریس خودتعاملی ساختاری (SSIM) به شرح جدول ۷ استخراج گردید.

۴-۴- بخش بندی سطح

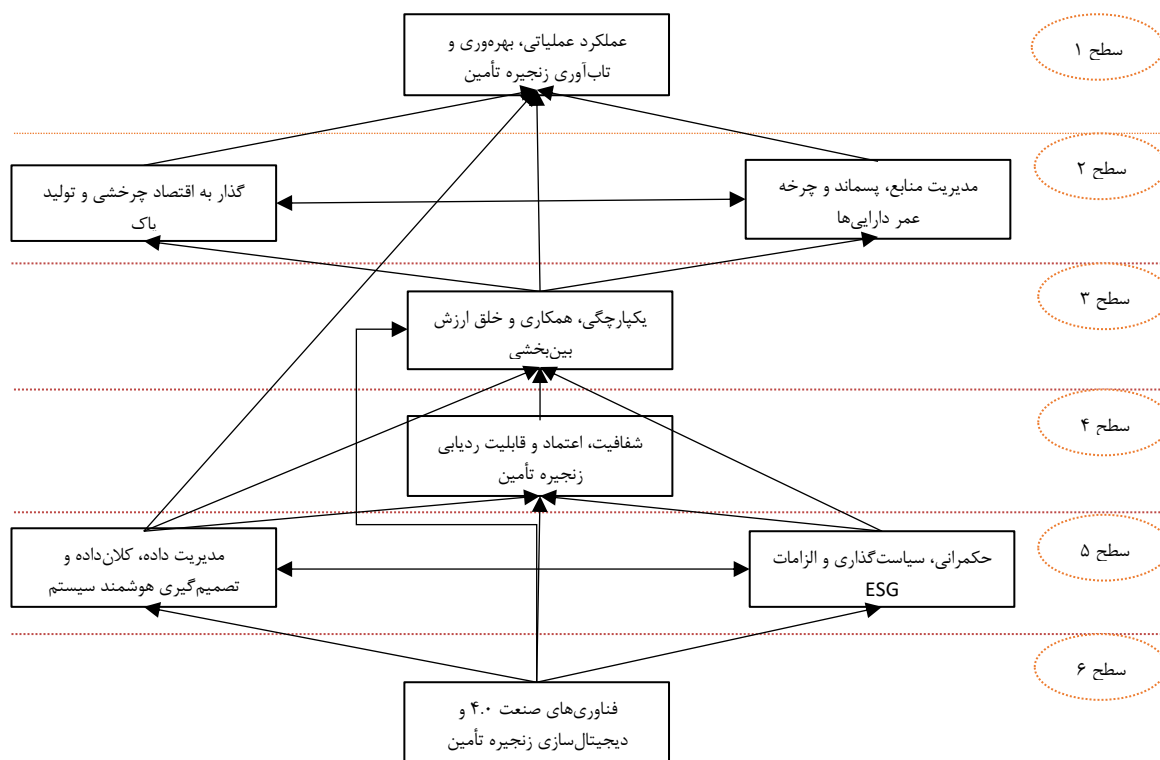
ماتریس دسترسی فازی (FRM) در مرحله دوم، به سطوح مختلفی بخش بندی شد. هریک از اجزای سیستم (معیارها) دارای دو مجموعه مختلف متقدم و متأخر یا قابل دستیابی است. سطح بندی متغیرها نیز در جدول ۷ قابل مشاهده است.

جدول ۷- ماتریس خودتعاملی ساختاری (SSIM) و سطوح متغیرها

عوامل	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	مجموعه قابل دستیابی	مجموعه مقدم	مجموعه مشترک	سطح
F1		X	A	A	A	A	A	V	F2, F8	F3, F4, F5, F2, F7, F6	F2	2
F2			A	A	A	A	A	V	F1, F8	F1, F3, F4, F5, F6, F7	F1	2
F3				V	V	V	V	O	F1, F2, F4, F5, F6, F7, F8	-	-	6
F4					X	V	V	V	F1, F2, F5, F6, F7, F8	F3, F5	F5	5
F5						V	V	O	F1, F2, F4, F6, F7, F8	F3, F4	F4	5
F6							V	O	F1, F2, F7, F8	F3, F4, F5	-	4
F7								V	F1, F2, F8	-	-	3
F8									-	-	-	1

۴-۵- رسم مدل اولیه و نهایی ساختار تفسیری

براساس سطوح تعیین شده و ماتریس نهایی، دیاگرام Fuzzy-ISM ترسیم گردید و بعد از بازبینی مشارکت‌کنندگان و مرور خبرگان غیرشرکت‌کننده در پژوهش، ویرایش لازم انجام و الگوی نهایی ارائه شد. الگوی نهایی در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲- چهارچوب مدیریت زنجیره تأمین انرژی چرخشی پایدار با رویکرد صنعت ۴/۰

مدل ساختاری تفسیری ارائه‌شده در شکل ۲، بیانگر یک ساختار علی سلسله‌مراتبی از عوامل مؤثر بر تحقق مدیریت زنجیره تأمین انرژی چرخشی پایدار مبتنی بر صنعت ۴/۰ است. این مدل نشان می‌دهد که دستیابی به عملکرد پایدار در زنجیره تأمین انرژی، نتیجه برهم‌کنش لایه‌ای مجموعه‌ای از عوامل فناورانه، داده‌محور، نهادی و عملیاتی است و تحقق آن مستلزم حرکت تدریجی از زیرساخت‌های پایه به سمت نتایج عملکردی است. در پایین‌ترین سطح مدل، فناوری‌های صنعت ۴/۰ و دیجیتال‌سازی زنجیره تأمین قرار دارند که نقش پیش‌ران بنیادین سیستم را ایفا می‌کنند. قرارگیری این عامل در سطح زیربنایی نشان می‌دهد که تحول دیجیتال، نقطه شروع تغییرات ساختاری در زنجیره تأمین انرژی است. فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیاء، سیستم‌های هوشمند پایش و تحلیل داده‌های عملیاتی، امکان جمع‌آوری، پردازش و تحلیل داده‌های بلادرنگ را فراهم کرده و بستر لازم برای تصمیم‌گیری هوشمند و مدیریت بهینه منابع را ایجاد می‌کنند. در واقع، بدون وجود این زیرساخت دیجیتال، سایر مؤلفه‌های مدیریتی و عملیاتی قادر به ایجاد تحول پایدار نخواهند بود. در لایه بعدی، مدیریت داده، کلان‌داده و تصمیم‌گیری داده‌محور در کنار حکمرانی، سیاست‌گذاری و الزامات ESG قرار می‌گیرند. این سطح نشان می‌دهد که فناوری به‌تنهایی کافی نیست و اثربخشی آن وابسته به وجود چهارچوب‌های نهادی و قابلیت‌های تحلیلی است. مدیریت داده امکان تبدیل داده‌های خام به دانش

قابل استفاده را فراهم می‌کند و حکمرانی مناسب نیز چهارچوب‌های قانونی، راهبردی و سیاستی لازم برای بهره‌برداری اثربخش از فناوری و تحقق اهداف پایداری را ایجاد می‌نماید. بنابراین این سطح به‌عنوان حلقه اتصال بین زیرساخت فناوری و سازوکارهای عملیاتی عمل می‌کند. در ادامه، شفافیت، اعتماد و قابلیت ردیابی زنجیره تأمین به‌عنوان خروجی طبیعی بلوغ داده‌ای و حکمرانی مناسب شکل می‌گیرند. این عامل نشان‌دهنده بلوغ اطلاعاتی سیستم است؛ به‌گونه‌ای که اطلاعات مربوط به جریان مواد، انرژی و پسماندها به‌صورت شفاف و قابل ردیابی در کل زنجیره قابل دسترسی است. چنین شفافیتی، عدم تقارن اطلاعاتی را کاهش داده و زمینه اعتماد میان بازیگران زنجیره تأمین را فراهم می‌کند. این موضوع به‌ویژه در زنجیره‌های تأمین چرخشی که مبتنی بر جریان‌های معکوس مواد هستند، اهمیت حیاتی دارد. در سطح بالاتر، یکپارچگی، همکاری و خلق ارزش بین‌بخشی قرار دارد که نشان‌دهنده گذار از بلوغ فناورانه به بلوغ شبکه‌ای است. این سطح بیان‌گر آن است که تحقق اقتصاد چرخشی در زنجیره تأمین انرژی بدون همکاری مؤثر میان بازیگران مختلف از جمله تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، شرکت‌های لجستیکی و نهادهای حاکمیتی امکان‌پذیر نیست. همکاری بین‌بخشی موجب هم‌افزایی قابلیت‌ها، اشتراک دانش و بهینه‌سازی جریان منابع در کل زنجیره می‌شود. در سطوح نزدیک به خروجی سیستم، گذار به اقتصاد چرخشی و تولید پاک در کنار مدیریت منابع، پسماند و چرخه عمر دارایی‌ها قرار دارند. این سطح نشان‌دهنده مرحله عملیاتی شدن رویکرد چرخشی در زنجیره تأمین است. اقداماتی مانند بازیافت گازهای فلر، احیای مواد شیمیایی، استفاده مجدد از منابع و مدیریت هوشمند چرخه عمر تجهیزات، به‌طور مستقیم بر کاهش شدت انرژی، کاهش ضایعات و بهبود کارایی عملیاتی تأثیر می‌گذارند. این سطح در واقع ترجمان عملیاتی سطوح زیرین مدل است. در نهایت، در بالاترین سطح مدل، عملکرد عملیاتی، بهره‌وری و تاب‌آوری زنجیره تأمین قرار دارد که به‌عنوان خروجی نهایی سیستم شناخته می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که بهبود عملکرد پایدار زنجیره تأمین، نتیجه مستقیم اجرای موفق تمامی سطوح زیرین است و نمی‌توان آن را صرفاً با اقدامات مقطعی عملیاتی محقق کرد. به عبارت دیگر، پایداری و تاب‌آوری زنجیره تأمین انرژی، یک پیامد سیستمی و چندبعدی است که از تعامل هماهنگ فناوری، داده، حکمرانی، شفافیت، همکاری و عملیات چرخشی حاصل می‌شود. در یک تفسیر کلان، مدل ISM این پژوهش نشان می‌دهد که گذار به زنجیره تأمین انرژی چرخشی پایدار، یک فرآیند تحول دیجیتال-سازمانی مرحله‌ای است که از ایجاد زیرساخت‌های فناورانه آغاز شده، از طریق توسعه قابلیت‌های داده‌محور و چهارچوب‌های حکمرانی تقویت می‌شود، به افزایش شفافیت و اعتماد به همکاری بین‌سازمانی منجر شده و در نهایت در قالب عملکرد پایدار و تاب‌آور زنجیره تأمین نمود پیدا می‌کند. این ساختار، ماهیت سیستمی و شبکه‌ای اقتصاد چرخشی در صنایع انرژی‌بر را به‌خوبی نشان می‌دهد و بیانگر آن است که تحقق پایداری انرژی مستلزم یک رویکرد یکپارچه و چندلایه است.

۴-۶- تجزیه و تحلیل قدرت نفوذ و میزان وابستگی نمودار (Fuzzy-MICMAC)

به‌منظور بخش‌بندی معیارها، در ماتریس دسترسی فازی (FRM) برای هریک از عناصر قدرت محرکه و قدرت وابستگی محاسبه شد. قدرت محرکه یک عنصر یا معیار تعداد معیارهایی است که متأثر از معیار مربوطه می‌شوند از جمله خود آن معیار. قدرت وابستگی نیز تعداد معیارهایی است که بر معیار مربوطه تأثیر می‌گذارند و منجر به دستیابی به آن می‌شوند. نمودار میک‌مک فازی در شکل ۳ نشان داده شده است.

۷ ۶ ۵ ۴ ۳ ۲ ۱	۷ ۶ ۵ ۴ ۳ ۲ ۱	F3	خوشه محرك F4, F5 F6	خوشه پیوندی	خوشه پیوندی
۴ ۳ ۲ ۱	۴ ۳ ۲ ۱	F3	خوشه مستقل	خوشه وابسته	خوشه وابسته
۳ ۲ ۱	۳ ۲ ۱	F3	خوشه مستقل	خوشه وابسته	خوشه وابسته
۲ ۱	۲ ۱	F3	خوشه مستقل	خوشه وابسته	خوشه وابسته
۱	۱	F3	خوشه مستقل	خوشه وابسته	خوشه وابسته

شکل ۳- نمودار Fuzzy-MICMAC

نمودار Fuzzy-MICMAC ارائه شده در شکل ۳، مکمل تحلیل ساختاری مدل ISM بوده و با طبقه بندی متغیرها بر اساس قدرت نفوذ و قدرت وابستگی، نقش سیستمی هر عامل را در تحقق مدیریت زنجیره تأمین انرژی چرخشی پایدار تبیین می کند. این تحلیل نشان می دهد که ساختار سیستم مورد مطالعه دارای ماهیتی چندلایه است که در آن برخی متغیرها نقش پیش ران، برخی نقش واسطه ای و برخی نقش پیامدی دارند. در این نمودار، فناوری های صنعت ۴/۰ و دیجیتال سازی زنجیره تأمین (F3) در خوشه محرك قرار گرفته اند. قرارگیری این متغیر در ناحیه ای با قدرت نفوذ بالا و وابستگی پایین نشان می دهد که این عامل به عنوان موتور اصلی تحول سیستم عمل می کند. به بیان دیگر، توسعه زیرساخت های دیجیتال، اینترنت اشیا، سیستم های هوشمند پایش و تحلیل داده، زمینه ایجاد سایر قابلیت های سیستمی را فراهم می کند، در حالی که خود کمتر از سایر متغیرها تأثیر می پذیرد. این موضوع بیانگر آن است که سرمایه گذاری در فناوری های دیجیتال می تواند اثرات آبخاری در کل زنجیره تأمین ایجاد کند. در خوشه پیوندی، مدیریت داده و کلان داده (F4) و حکمرانی، سیاست گذاری و الزامات ESG (F5) قرار دارند. این دسته از متغیرها دارای قدرت نفوذ و وابستگی بالا هستند، به این معنا که هم از سایر عوامل اثر می پذیرند و هم به صورت قابل توجهی بر سایر متغیرها اثر می گذارند. این ویژگی نشان دهنده حساسیت بالای این عوامل در سیستم است؛ به گونه ای که هرگونه ضعف در مدیریت داده یا چهارچوب های حکمرانی می تواند کل سیستم را دچار اختلال کند. از سوی دیگر، تقویت این متغیرها می تواند موجب تسریع انتقال اثرات فناوری به سطوح عملیاتی و عملکردی شود. در ناحیه میانی نمودار، متغیرهای شفافیت، اعتماد و قابلیت ردیابی زنجیره تأمین (F6) و همکاری و یکپارچگی بین بخشی (F7) قرار دارند. این عوامل نقش انتقال دهنده اثرات بین لایه های زیرساختی و عملیاتی را ایفا می کنند. شفافیت اطلاعاتی و قابلیت ردیابی موجب کاهش عدم تقارن اطلاعاتی و افزایش اعتماد میان بازیگران زنجیره می شود و در ادامه، این اعتماد بستر لازم برای شکل گیری همکاری های بین سازمانی و خلق ارزش مشترک را فراهم می کند. این سطح نشان دهنده گذار سیستم از بلوغ فناورانه به بلوغ شبکه ای است. در خوشه مستقل، گذار به اقتصاد چرخشی و تولید پاک (F1) و مدیریت منابع، پسماند و چرخه عمر دارایی ها (F2) قرار دارند. این متغیرها دارای قدرت نفوذ متوسط و وابستگی متوسط هستند و بیشتر نقش عوامل اجرایی و عملیاتی را دارند. این بدان معنا است که این عوامل در اجرای عملی اقتصاد

چرخشی نقش کلیدی دارند، اما عملکرد آن‌ها تا حد زیادی وابسته به فراهم بودن زیرساخت‌های فناورانه، داده‌ای و نهادی است. بنابراین، این متغیرها را می‌توان به عنوان حلقه اتصال بین راهبرد و اجرا در نظر گرفت. درنهایت، عملکرد عملیاتی، بهره‌وری و تاب‌آوری زنجیره تأمین (F8) در خوشه وابسته قرار گرفته است. این متغیر دارای قدرت نفوذ پایین و وابستگی بالا است که نشان می‌دهد به عنوان خروجی نهایی سیستم عمل می‌کند و به شدت تحت تأثیر سایر متغیرها قرار دارد. این یافته تأیید می‌کند که بهبود عملکرد پایدار زنجیره تأمین، یک نتیجه سیستمی است و نمی‌توان آن را صرفاً از طریق اقدامات عملیاتی کوتاه‌مدت محقق ساخت. در یک تفسیر یکپارچه، نتایج نمودار MICMAC نشان می‌دهد که تحقق زنجیره تأمین انرژی چرخشی پایدار نیازمند یک مسیر تحول مرحله‌ای است که از سرمایه‌گذاری در فناوری‌های صنعت ۴/۰ آغاز شده، از طریق توسعه قابلیت‌های مدیریت داده و استقرار چهارچوب‌های حکمرانی تقویت می‌شود، با افزایش شفافیت و اعتماد به شکل‌گیری همکاری بین‌بخشی منجر شده و درنهایت در قالب اجرای عملیات اقتصاد چرخشی و بهبود عملکرد پایدار زنجیره تأمین تجلی پیدا می‌کند. این ساختار نشان‌دهنده آن است که پایداری در زنجیره تأمین انرژی نه یک پدیده تک‌عاملی، بلکه نتیجه تعامل پویا میان فناوری، داده، حکمرانی، ساختار شبکه‌ای و عملیات چرخشی است.

۵- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که تحقق مدیریت زنجیره تأمین انرژی چرخشی پایدار مبتنی بر صنعت ۴/۰ یک پدیده چندبعدی و سیستمی است که از تعامل میان عوامل فناورانه، داده‌محور، نهادی و عملیاتی شکل می‌گیرد. این نتیجه با چهارچوب نظری ارائه‌شده در ادبیات موضوع که پایداری زنجیره تأمین را حاصل تعامل پویا بین فناوری، داده و حکمرانی می‌داند، هم‌سو است.

نخست، قرارگیری فناوری‌های صنعت ۴/۰ و دیجیتال‌سازی زنجیره تأمین به عنوان عامل محرک اصلی سیستم نشان می‌دهد که تحول دیجیتال نقش پیش‌ران در گذار به اقتصاد چرخشی در صنعت انرژی دارد. این یافته با نتایج دوعا و جین هم‌راستا است که نشان دادند نوآوری فناورانه یکی از ارکان کلیدی توسعه اقتصاد چرخشی در صنعت نفت و گاز محسوب می‌شود [۱]. همچنین نتایج این پژوهش با مطالعه بگ و همکاران هم‌سو است که منابع و زیرساخت‌های صنعت ۴/۰ را عامل تقویت تولید پایدار و اقتصاد چرخشی معرفی کردند [۹]. با این حال، یافته حاضر فراتر از مطالعات پیشین، ساختار سلسله‌مراتبی و وابستگی بین عوامل را به صورت سیستمی نشان می‌دهد.

دوم، نقش مدیریت داده، کلان‌داده و تصمیم‌گیری هوشمند به عنوان متغیر واسطه‌ای نشان می‌دهد که فناوری به تنهایی کافی نیست و ارزش آن از طریق پردازش داده و تصمیم‌سازی هوشمند محقق می‌شود. این نتیجه با نتایج ژانگ و همکاران که اهمیت تحلیل داده در تولید هوشمند پایدار را مطرح کردند، هم‌سو است [۲۰]. همچنین با مطالعه پاتیل و همکاران که آمادگی داده‌محور را پیش‌نیاز زنجیره تأمین پایدار دانستند، مطابقت دارد [۱۰].

سوم، یافته‌ها نشان دادند که حکمرانی، سیاست‌گذاری و الزامات ESG نقش زیرساخت نهادی را در تحقق اقتصاد چرخشی ایفا می‌کنند. این نتیجه با مطالعه شارما و همکاران هم‌خوانی دارد که موانع نهادی و اجتماعی را از مهم‌ترین چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در صنعت نفت و گاز معرفی کردند [۲]. در عین حال، نتایج حاضر نشان می‌دهد که نقش حکمرانی فراتر از حذف موانع بوده و به عنوان عامل توانمندساز سایر متغیرها عمل می‌کند.

چهارم، قرارگیری متغیرهای گذار به اقتصاد چرخشی و مدیریت چرخه عمر دارایی‌ها در سطح عملیاتی نشان می‌دهد که این عوامل بیشتر نقش اجرایی دارند و به شدت وابسته به زیرساخت‌های فناورانه و نهادی هستند. این یافته با نتایج سینگ و همکاران که عوامل اجرایی را وابسته به بلوغ سازمانی و زیرساختی دانستند، هم‌سو است [۳].

پنجم، قرارگیری عملکرد عملیاتی و تاب‌آوری زنجیره تأمین در خوشه وابسته نشان می‌دهد که عملکرد پایدار، خروجی نهایی تعامل سیستم است. این نتیجه با مطالعه کومار که پایداری زنجیره تأمین را نتیجه هم‌افزایی عوامل چندگانه معرفی کرد، مطابقت دارد [۸]. همچنین با نتایج تادی و همکاران درباره ماهیت شبکه‌ای زنجیره تأمین چرخشی هم‌سو است [۵].

درمجموع، یافته‌های این پژوهش ضمن تأیید نتایج تحقیقات پیشین، یک دیدگاه سیستمی و ساختاری ارائه می‌دهد که روابط علی بین عوامل را مشخص می‌کند؛ موضوعی که در بسیاری از مطالعات قبلی کمتر مورد توجه بوده است. براساس یافته‌های پژوهش، پیشنهادهای زیر برای مدیران و سیاست‌گذاران ارائه می‌شود:

۱. سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های دیجیتال انرژی: تمرکز بر IoT صنعتی، تحلیل داده و سیستم‌های پایش هوشمند به عنوان پایه تحول زنجیره تأمین.
 ۲. توسعه چهارچوب‌های حکمرانی داده و استانداردسازی اطلاعات: ایجاد معماری داده ملی برای صنعت انرژی و استانداردسازی تبادل داده بین بازیگران زنجیره.
 ۳. طراحی اکوسیستم همکاری دیجیتال بین‌سازمانی: ایجاد پلتفرم‌های دیجیتال مشترک بین پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، تأمین‌کنندگان و شرکت‌های لجستیکی.
 ۴. یکپارچه‌سازی الزامات ESG در راهبرد زنجیره تأمین انرژی: تدوین شاخص‌های عملکرد ESG ویژه صنعت انرژی.
 ۵. توسعه مهارت‌های دیجیتال نیروی انسانی صنعت انرژی: برنامه‌های آموزشی در حوزه تحلیل داده، هوش مصنوعی و مدیریت زنجیره تأمین دیجیتال.
- از محدودیت‌های پژوهش حاضر می‌توان به این موارد اشاره کرد: تمرکز پژوهش بر صنعت نفت و پتروشیمی ایران ممکن است تعمیم نتایج را محدود کند. استفاده از قضاوت خبرگان ممکن است با سوگیری ذهنی همراه باشد. تعداد نمونه ۲۲ خبره برای تحلیل ساختاری مناسب است، اما برای تعمیم آماری محدودیت دارد. مدل روابط را در یک مقطع زمانی تحلیل می‌کند و پویایی سیستم را کامل نشان نمی‌دهد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از روش‌های ترکیبی ISM-SEM برای اعتبارسنجی آماری روابط استخراج‌شده و توسعه مدل‌های پویای سیستم برای بررسی رفتار زمانی متغیرها استفاده شود. همچنین موضوعاتی از قبیل بررسی نقش هوش مصنوعی پیشرفته در زنجیره تأمین چرخشی انرژی، مقایسه بین‌کشوری مدل زنجیره تأمین چرخشی انرژی و توسعه شاخص‌های کمی سنجش بلوغ دیجیتال در زنجیره تأمین انرژی پرداخته شود.

۶- تشکر و قدردانی

از کلیه مشارکت‌کنندگان در این پژوهش که با دقت و صرف وقت و صبوری ما را در انجام هرچه بهتر مراحل تحقیق یاری رساندند، مراتب تشکر و قدردانی خود را ابراز می‌نمایم.

۷- منابع

- [1] S. Dua and N. K. Jain, "Circular economy and innovation in oil and gas industry: A systematic literature review and bibliometric analysis," *International Social Science Journal*, vol. 74, no. 252, pp. 657–686, 2024.
- [2] M. Sharma, S. Joshi, M. Prasad and S. Bartwal, "Overcoming barriers to circular economy implementation in the oil & gas industry: Environmental and social implications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 391, pp. 136133, 2023.
- [3] R. Singh, S. Khan and J. Dsilva, "A framework for assessment of critical factor for circular economy practice implementation," *Journal of Modelling in Management*, vol. 18, no. 5, pp. 1476–1497, 2023.
- [4] R. Y. Shi, B. Yang, Z. Chu and F. Lai, "The role of relationship commitment in managing logistics outsourcing in the digital economy," *Industrial Management and Data Systems*, vol. 124, no. 7, pp. 2440–2466, 2024.
- [5] E. Taddei, C. Sassanelli, P. Rosa and S. Terzi, "Circular supply chains in the era of Industry 4.0: a systematic literature review," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 170, pp. 108268, 2022.
- [6] M. Ajalli, E. Asgharizadeh, H. Safari and I. Ghasemian Sahebi, "Analysis of the relationship between supply chain quality management factors in gas industry with fuzzy interpretive structural modeling and path analysis," *Industrial Management Studies*, vol. 15, no. 46, pp. 27–55, 2017.
- [7] M. Oyinola, "Introduction: a digitally enabled circular plastic economy for Africa," in *Digital Innovations for a Circular Plastic Economy in Africa*, Taylor & Francis, pp. 1–14, 2024.
- [8] M. Kumar, "Formulating a framework for sustainable circular supply chain management: integration of circular economy decoupled with Industry 4.0 attributes through Fuzzy–ISM approach," *Management of Environmental Quality: An International Journal*, vol. 36, no. 8, pp. 2189–2233, 2025.
- [9] S. Bag, G. Yadav, P. Dhamija and K. K. Kataria, "Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy: an empirical study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 281, no. 3, pp. 125233, 2021.
- [10] A. Patil, A. Dwivedi, M. Abdul Moktadir and Lakshay, "Big data-industry 4.0 readiness factors for sustainable supply chain management: towards circularity," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 178, pp. 109109, 2023.
- [11] P. Centobelli, R. Cerchione, P. D. Vecchio, E. Oropallo and G. Secundo, "Blockchain technology for bridging trust, traceability and transparency in circular supply chain," *Information and Management*, vol. 59, no. 7, pp. 103508, 2022.
- [12] X. S. Zhou, M. Song and L. Cui, "Driving force for China's economic development under industry 4.0 and circular economy: technological innovation or structural change?" *Journal of Cleaner Production*, vol. 271, pp. 122680, 2020.
- [13] D. Vegter, J. van Hillegersberg and M. Olthaar, "Supply chains in circular business models: processes and performance objectives," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 162, pp. 1–15, 2020.
- [14] S. S. Rajput and S. P. Singh, "Connecting circular economy and Industry 4.0," *International Journal of Information Management*, vol. 49, pp. 98–113, 2019.
- [15] P. K. Kumar, R. K. Singh and V. Kumar, "Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: analysis of barriers," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 164, pp. 105215, 2021.
- [16] Y. A. Fatimah, K. Govindan, R. Murniningsih and A. Setiawan, "Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: a case study of Indonesia," *Journal of Cleaner Production*, vol. 269, pp. 122263, 2020.



- [17] A. Z. Haydn Burke, A. Zhang and J. X. Wang, "Integrating product design and supply chain management for a circular economy," *Production Planning and Control*, vol. 34, no. 11, pp. 1097–1113, 2023.
- [18] A.-Q. A.-L. Abdul-Hamid, M. H. Ali, L. H. Osman, M. L. Tseng and A. R. C. Omar, "An industry 4.0 adoption in the circular economy application hierarchical model: driver, enable and barrier aspects," *Industrial Management and Data Systems*, vol. 124, no. 1, pp. 386–415, 2024.
- [19] Z. E. Yu, S. A. R. Khan and M. Umar, "CE practices and industry 4.0 technologies: a strategic move of automobile industry," *Business Strategy and the Environment*, vol. 31, no. 3, pp. 796–809, 2021.
- [20] Y. Zhang, S. Ren, Y. Liu, T. Sakao and D. Huisingh, "A comprehensive review of big data analytics throughout the product lifecycle to support sustainable smart manufacturing: a framework, challenges and future research directions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 210, pp. 1343–1365, 2019.
- [21] E. Ingemarsdotter, E. Jamsin and R. Balkenende, "Opportunities and challenges in IoT-enabled circular business model implementation – a case study," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 162, pp. 105047, 2020.
- [22] M. M. Rahaman, A. R. B. Chowdhury, H. Belal and S. A. Tarin, "Challenges in green supply chain management implementation in SMEs: an empirical analysis through ecological modernisation and transaction cost economics," *Benchmarking: An International Journal*, ahead-of-print, 2025.
- [23] M. Najafi, P. Akhavan and A. Hajiha, "Developing a conceptual model of a sustainable supply chain with lean and agile capabilities (Case study: rotating equipment manufacturers in the oil and gas industry)," *Sharif Journal of Industrial Engineering & Management*, vol. 39, no. 1, pp. 183–192, 2023.
- [24] M. R. Shahipasand, N. Pilevari and A. Rajabzadeh, "Stakeholder analysis and systemic complication of electricity supply chain with Industry 4.0 approach," *Modern Research in Decision Making*, vol. 9, no. 1, pp. 32–59, 2024.
- [25] S. Sharifian Jazi, A. Mohammadi, A. Abbasi and M. Alimohammadlou, "Identifying and prioritizing the challenges of implementing circular supply chain management in the Premiumbond company," *Modern Research in Decision Making*, vol. 8, no. 3, pp. 24–53, 2023.
- [26] S. Sharifian Jazi, A. Mohammadi, A. Abbasi and M. Alimohammadlou, "Identifying the challenges affecting the implementation of circular economy and Industry 4.0 in supply chain management," *Management Research in Iran*, vol. 28, no. 2, pp. 146–183, 2024.
- [27] F. Yavari, N. Pilevari and R. Radfar, "Circular economy in wind turbine supply chain: Requirements and strategies," *Future Study Management*, vol. 36, no. 142, 2025.