

Identification and Modeling of Artificial Intelligence Enablers Influencing Supply Chain Logistics Sustainability in the Petrochemical Industry

**Sayed Mojtaba
Nabavifard*** 

Department of Operations Management and
Information Technology, Faculty of
Management and Accounting, Allameh
Tabataba'i University, Tehran, Iran

**Mohammad Taghi
Taghavi Fard** 

Department of Operations Management and
Information Technology, Faculty of
Management and Accounting, Allameh
Tabataba'i University, Tehran, Iran

Maghsoud Amiri 

Department of Operations Management and
Information Technology, Faculty of
Management and Accounting, Allameh
Tabataba'i University, Tehran, Iran

Abolfazl Kazazi 

Department of Operations Management and
Information Technology, Faculty of
Management and Accounting, Allameh
Tabataba'i University, Tehran, Iran

Abstract

With the growing application of artificial intelligence (AI) in supply chains, identifying the enablers of its effective adoption has become essential for sustainable logistics. However, a comprehensive framework explaining AI adoption in the petrochemical industry remains lacking. This study aimed to identify, model, and assess the current status of AI enablers influencing supply chain logistics sustainability in the petrochemical industry. A mixed-methods approach was employed, comprising a systematic literature review of studies published from 2008 to 2025, the Fuzzy Delphi method, and partial least squares-based confirmatory factor analysis. The review identified 57 enablers across 11 components and three TOE-based dimensions: technology,

* Corresponding Author: mojtaba_nabavi@atu.ac.ir

How to Cite: xxxxxxxx

organization, and environment. Fuzzy Delphi validation excluded five enablers. The findings highlight infrastructure and data governance, organizational capabilities, and institutional and technological ecosystem conditions as key requirements for effective AI adoption. The proposed framework provides a basis for developing digital transformation roadmaps and enhancing sustainable logistics performance.

Keywords: Artificial Intelligence, Enablers, Sustainable Logistics, Petrochemical Industry, TOE Framework

Introduction

Sustainable supply chain management and logistics have become strategic imperatives due to growing global environmental, economic, and social challenges. In the petrochemical sector-which accounts for approximately 30% of the Middle Eastern market, 10% of global primary energy consumption, and 14% of greenhouse gas emissions- logistics operations encounter complex challenges regarding hazardous material handling, infrastructure constraints, operational risks, and stringent regulatory pressures. Artificial Intelligence offers transformative capabilities, including demand forecasting, intelligent inventory management, transport route optimization, predictive maintenance, and real-time operational monitoring. When integrated with complementary digital technologies like the Internet of Things, Blockchain, and Big Data Analytics, AI-enabled logistics systems can reduce inventory levels by up to 35% and enhance service efficiency by up to 65%.

However, successful AI adoption relies not merely on isolated algorithms, but on a holistic ecosystem of technological, organizational, and environmental factors. Existing literature lacks a systematic, integrated framework specifically addressing AI enablers for sustainable logistics in heavy process industries. To bridge this knowledge gap, this study utilizes the Technology-Organization-Environment (TOE) framework to identify, validate, and hierarchically model AI enablers while evaluating the current industry readiness level in the petrochemical sector.

Methodology

This study adopted a rigorous multi-phase mixed-methods research design. First, a Systematic Literature Review following the 7-step protocol of Sandelowski and Barroso screened 345 studies from major international and national databases spanning 2008 to 2025. Quality appraisal via the Critical Appraisal Skills Program (threshold $\geq 50\%$) yielded 95 eligible articles, from which 281 initial indicators were extracted and synthesized into 57 unique enablers under 11 TOE components.

Second, a two-round Fuzzy Delphi Method involving a panel of 10 industry and academic experts evaluated the factors, applying a 0.70 defuzzified threshold to validate 52 core enablers after removing 5 redundant items. Third, Structural Equation Modeling via Partial Least Squares (PLS-SEM) was executed on a 3-tier Hierarchical Component Model configured as reflective-formative constructs. Data gathered from 128 valid survey responses from petrochemical managers were analyzed using SmartPLS to test reliability, validity, and formative path weights.

Results and Discussion

Formative structural weight analysis at the third-order level revealed that the Technology dimension exerts the strongest impact on overall AI enablement (weight = 0.484, $T = 3.923$), followed by Organization (weight = 0.346, $T = 3.171$) and Environment (weight = 0.231, $T = 3.641$), with all path weights statistically significant at $p < 0.01$. At the second-order level, Base and Complementary Technologies (weight = 0.365) and Data Infrastructure (weight = 0.315) emerged as primary technical drivers, Organizational Strategy and Culture (weight = 0.406) dominated the organizational dimension, and Technology Ecosystem (weight = 0.501) led environmental drivers. Descriptive statistical evaluation of industry readiness indicated higher operational maturity in Cyber Security (mean = 2.95) and Data Infrastructure (mean = 2.85), whereas the Institutional Regulatory Environment (mean = 2.50) and Financial Allocation (mean = 2.55) represent critical industrial bottlenecks.

The discussion synthesizes three major strategic insights from these empirical outcomes. First, baseline technological infrastructure and relational data readiness serve as mandatory prerequisites, as advanced AI algorithms cannot function effectively without unified cloud architecture and IoT data

integration. Second, a pronounced institutional lag exists where strong market demand pushes enterprises toward digital adoption, yet macro-level policy gaps and regulatory ambiguity hinder systemic implementation. Third, while top management clearly recognizes the strategic necessity of AI, conservative capital allocation creates a significant budgeting bottleneck for high-risk digital transformation projects.

Conclusion

This research delivers an empirically validated, multi-dimensional framework demonstrating that successful AI deployment for sustainable logistics in the petrochemical industry requires a synchronized tri-axial strategy spanning technological, organizational, and environmental domains. Rather than treating artificial intelligence as a standalone IT enhancement, petrochemical enterprises must simultaneously cultivate robust data governance, adapt organizational decision-making structures, and actively navigate external regulatory ecosystems. The findings provide industrial leaders, logistics decision-makers, and policymakers with an actionable roadmap to align digital innovation initiatives with long-term economic, environmental, and social sustainability goals.

شناسایی و مدل سازی توانمندسازهای هوش مصنوعی مؤثر بر پایداری لجستیک زنجیره تأمین صنعت پتروشیمی

سید مجتبی نبوی

فرد  *گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری،
دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

محمد تقی تقوی

فرد گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری،
دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایرانمقصود امیری گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری،
دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

ابوالفضل کزازی

گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری،
دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

چکیده

با گسترش کاربرد هوش مصنوعی در زنجیره های تأمین، شناسایی عوامل زمینه ساز بهره گیری مؤثر از این فناوری به یکی از موضوعات مهم در حوزه لجستیک پایدار تبدیل شده است. با وجود ظرفیت های قابل توجه هوش مصنوعی در بهبود ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی لجستیک، همچنان چارچوب جامعی برای تبیین عوامل مؤثر بر استقرار آن در صنعت پتروشیمی وجود ندارد. پژوهش حاضر با هدف شناسایی، و مدل سازی و ارزیابی وضعیت موجود توانمندسازهای هوش مصنوعی مؤثر بر پایداری لجستیک زنجیره تأمین صنعت پتروشیمی انجام شد و از نظر هدف کاربردی-توسعه ای و با رویکرد آمیخته انجام گرفت. در مرحله نخست، از طریق مرور نظام مند ادبیات، مطالعات منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۵ بررسی شد. در ادامه، ۵۷ عامل توانمندساز در قالب ۱۱ مؤلفه و ۳ بعد فناوری، سازمان و محیط بر مبنای چارچوب TOE شناسایی و دسته بندی گردیدند. سپس با استفاده از روش دلفی فازی، این عوامل بومی سازی و اعتبارسنجی شده و ۵ عامل توانمندساز از نظر خبرگان فاقد اعتبار لازم تشخیص داده شدند و در نهایت ساختار مدل با تحلیل عاملی تأییدی مبتنی بر حداقل مربعات جزئی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که توسعه زیرساخت ها و حاکمیت داده، تقویت قابلیت های سازمانی شامل سرمایه انسانی، فرهنگ و راهبرد داده محور، و بهبود شرایط نهادی و

اکوسیستم فناوری از مهم ترین الزامات استقرار مؤثر هوش مصنوعی در بهبود عملکرد پایدار لجستیک صنعت پتروشیمی هستند. مدل ارائه شده می تواند به عنوان چارچوبی راهنما برای طراحی نقشه راه تحول دیجیتال و ارتقای پایداری لجستیک مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: هوش مصنوعی، توانمندسازها، لجستیک پایدار، صنعت پتروشیمی، چارچوب
TOE

آماده انتشار

مقدمه

توسعه صنعتی شتابان در دهه‌های اخیر، اگرچه موجب رشد اقتصادی، افزایش تولید و بهبود سطح رفاه جوامع شده است، اما همزمان پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی گسترده‌ای از جمله گرمایش جهانی، تخریب اکوسیستم‌ها و مصرف بی‌رویه منابع طبیعی را نیز به همراه داشته است (Wang et al., 2022). در نتیجه، پایداری به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های دولت‌ها، سازمان‌ها و ذی‌نفعان تبدیل شده و نگاه‌ها بیش از گذشته تحت فشار قرار گرفته‌اند تا فعالیت‌های خود را در چارچوب اصول توسعه پایدار بازطراحی کنند. در این میان، زنجیره‌های تأمین به دلیل نقش گسترده در مصرف انرژی، استفاده از منابع، انتشار آلاینده‌ها و تأثیرگذاری بر جوامع انسانی، در کانون توجه قرار گرفته‌اند و انتظار می‌رود علاوه بر دستیابی به اهداف اقتصادی، مسئولیت‌های زیست‌محیطی و اجتماعی خود را نیز ایفا کنند (Rad et al., 2022). از این رو، حرکت به سوی زنجیره تأمین پایدار به یک ضرورت راهبردی برای حفظ مزیت رقابتی و پاسخگویی به انتظارات ذی‌نفعان تبدیل شده است (Joshi & Sharma, 2022).

در این چارچوب، لجستیک به عنوان یکی از ارکان اصلی زنجیره تأمین، نقشی تعیین‌کننده در تحقق اهداف پایداری ایفا می‌کند. فعالیت‌های لجستیکی از قبیل حمل‌ونقل، انبارداری، مدیریت موجودی، بسته‌بندی و توزیع، سهم قابل توجهی در مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های عملیاتی دارند. از سوی دیگر، بهبود عملکرد لجستیکی می‌تواند از طریق کاهش مصرف منابع، کاهش انتشار آلاینده‌ها، ارتقای ایمنی و بهبود بهره‌وری، به صورت همزمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی پایداری را تقویت کند (Tai et al., 2022). با این حال، گزارش اهداف توسعه پایدار در سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از اهداف تعیین‌شده با روندی کند یا حتی متوقف مواجه شده‌اند (Annosi et al., 2021). این موضوع ضرورت بهره‌گیری از رویکردها و فناوری‌های نوین را برای ارتقای عملکرد پایدار زنجیره‌های تأمین و به ویژه فعالیت‌های لجستیکی دوچندان کرده است.

در میان صنایع مختلف، صنعت پتروشیمی به دلیل نقش راهبردی در رشد اقتصادی و سهم قابل توجه در بازار منطقه‌ای، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به گونه‌ای که حدود ۳۰ درصد از بازار پتروشیمی خاورمیانه را در اختیار دارد (روحانی و محمدآبادی، ۱۴۰۱). با این

حال، ماهیت محصولات پتروشیمی که غالباً حجیم، خطرناک و نیازمند شرایط ویژه حمل و نقل و نگهداری هستند، مدیریت لجستیک این صنعت را با چالش‌های پیچیده‌ای مواجه ساخته است. نیاز به زیرساخت‌های تخصصی، الزامات سخت‌گیرانه ایمنی، نوسانات بازار، تحولات ژئوپلیتیکی و محدودیت‌های زیرساختی، در کنار ضعف یکپارچگی داده‌ها و محدودیت در ردیابی بلادرنگ، کارایی و پایداری عملیات لجستیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Singer et al., 2019; Alnahas et al., 2020; Tat & Heydari, 2021). از سوی دیگر، صنعت پتروشیمی به‌عنوان یکی از صنایع انرژی‌بر و آلاینده، حدود ۱۰ درصد از مصرف نهایی انرژی جهان و ۱۴ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده است (Koroteev & Tekic, 2021). از این رو، فشارهای مقرراتی، انتظارات ذی‌نفعان و الزامات توسعه پایدار، شرکت‌های پتروشیمی را ناگزیر ساخته است تا به سمت عملیات کم‌کربن، بهره‌وری بیشتر منابع و الگوهای اقتصاد چرخشی حرکت کنند (سنگیر و همکاران، ۱۴۰۱). تحقق این اهداف مستلزم بهره‌گیری از راهکارهای نوآورانه‌ای است که بتوانند به‌طور همزمان کارایی عملیاتی و عملکرد پایداری لجستیک را ارتقا دهند.

در این میان، هوش مصنوعی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فناوری‌های تحول‌آفرین عصر دیجیتال، ظرفیت قابل توجهی برای مواجهه با این چالش‌ها فراهم کرده است. کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه لجستیک شامل پیش‌بینی تقاضا، مدیریت هوشمند موجودی، بهینه‌سازی مسیرهای حمل و نقل، زمان‌بندی عملیات، پایش لحظه‌ای شرایط حمل، نگهداشت پیشگویانه تجهیزات و مدیریت ریسک‌های عملیاتی است. این قابلیت‌ها می‌توانند ضمن کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری، مصرف انرژی، انتشار آلاینده‌ها و ضایعات را نیز کاهش دهند (Joshi & Sharma, 2022; Akhtar et al., 2023). همچنین ترکیب هوش مصنوعی با فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، بلاکچین و تحلیل کلان‌داده‌ها می‌تواند شفافیت، قابلیت ردیابی، امنیت و هماهنگی در سراسر زنجیره تأمین را ارتقا دهد. شواهد تجربی نشان می‌دهد استقرار موفق فناوری‌های هوشمند قادر است تا ۳۵ درصد موجودی‌ها را کاهش داده و تا ۶۵ درصد کارایی خدمات را بهبود بخشد (Alicke et al., 2021).

با وجود ظرفیت‌های قابل توجه هوش مصنوعی در بهبود عملکرد و پایداری لجستیک، موفقیت این فناوری صرفاً به الگوریتم‌ها و ابزارهای پیشرفته وابسته نیست، بلکه به مجموعه‌ای از توانمندسازهای فناورانه، سازمانی و محیطی نظیر زیرساخت و کیفیت داده، امنیت سایبری،

منابع مالی، سرمایه انسانی متخصص، حمایت مدیریتی و محیط نهادی مناسب نیاز دارد (Hao & Demir, 2024؛ Toorajipour et al., 2021). با این حال، بخش عمده پژوهش‌های پیشین بر کاربردهای عملیاتی هوش مصنوعی تمرکز داشته و کمتر به شناسایی و طبقه‌بندی نظام‌مند این توانمندسازها پرداخته‌اند. همچنین، فقدان یک چارچوب جامع برای تبیین یکپارچه عوامل فناورانه، سازمانی و محیطی مؤثر بر توسعه هوش مصنوعی در لجستیک پایدار صنعت پتروشیمی، همچنان به عنوان یک خلأ دانشی مهم باقی مانده است.

در میان چارچوب‌های نظری موجود، چارچوب فناوری-سازمان-محیط (TOE) یکی از معتبرترین و پرکاربردترین رویکردها برای تبیین عوامل مؤثر بر پذیرش و استقرار فناوری‌های نوین به شمار می‌رود؛ زیرا امکان تحلیل همزمان ابعاد فناورانه، سازمانی و محیطی را فراهم می‌سازد. با وجود این، به کارگیری این چارچوب در شناسایی و ساختاربندی توانمندسازهای هوش مصنوعی مؤثر بر عملکرد پایداری لجستیک در صنعت پتروشیمی همچنان محدود بوده و از انسجام نظری کافی برخوردار نیست. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و مدل‌سازی توانمندسازهای استقرار و بهره‌برداری مؤثر از هوش مصنوعی که زمینه بهبود عملکرد پایداری لجستیک زنجیره تامین صنعت پتروشیمی را فراهم می‌کنند و همچنین با هدف ثانویه ارزیابی وضعیت موجود و سطح آمادگی این صنعت در خصوص توانمندسازهای مذکور، طراحی و اجرا شده است. بنابراین تمرکز پژوهش حاضر بر توانمندسازهای هوش مصنوعی است. در راستای تحقق این هدف، ابتدا توانمندسازهای بالقوه از طریق مرور نظام‌مند ادبیات استخراج و در قالب چارچوب TOE سازمان‌دهی شدند. سپس، با بهره‌گیری از روش دلفی فازی، تناسب و اعتبار این عوامل با شرایط صنعت پتروشیمی مورد ارزیابی و بومی‌سازی قرار گرفت. در گام نهایی، مدل سلسله‌مراتبی پژوهش شامل سازه‌های مرتبه اول، دوم و سوم در قالب مدل معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) و تحلیل عاملی تأییدی، به منظور آزمون و اعتبارسنجی ساختار مفهومی مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های این پژوهش می‌تواند ضمن توسعه ادبیات نظری در حوزه هوش مصنوعی و لجستیک پایدار، راهنمایی کاربردی برای مدیران صنعت پتروشیمی در طراحی نقشه راه تحول دیجیتال و ارتقای عملکرد پایداری فراهم آورد.

پیشینه پژوهش

هوش مصنوعی به عنوان یکی از فناوری‌های تحول‌آفرین عصر دیجیتال، نقش فزاینده‌ای در بهبود عملکرد زنجیره‌های تأمین و به‌ویژه لجستیک پایدار ایفا می‌کند. قابلیت‌هایی نظیر پیش‌بینی تقاضا، مدیریت هوشمند موجودی، بهینه‌سازی حمل‌ونقل، نگهداشت پیشگویانه و پایش بلادرنگ عملیات، زمینه ارتقای بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و بهبود همزمان عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را فراهم می‌سازد (Akhtar et al., 2023; Joshi & Sharma, 2022; Tai et al., 2022). همچنین، هم‌افزایی هوش مصنوعی با فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، بلاکچین و تحلیل کلان‌داده‌ها می‌تواند شفافیت، قابلیت ردیابی و هماهنگی در سراسر زنجیره تأمین را تقویت کند (Alicke et al., 2021). با این حال، شواهد پژوهشی نشان می‌دهد دستیابی به منافع مورد انتظار از هوش مصنوعی صرفاً به استقرار الگوریتم‌ها و ابزارهای هوشمند محدود نبوده و به مجموعه‌ای از توانمندسازهای فناورانه، سازمانی و محیطی وابسته است؛ عواملی همچون زیرساخت و کیفیت داده، امنیت سایبری، منابع مالی، سرمایه انسانی متخصص، حمایت مدیریتی و محیط نهادی مناسب که نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت یا شکست ابتکارات مبتنی بر هوش مصنوعی دارند (Hao & Demir, 2024; Toorajipour et al., 2021).

لازم به تأکید است که تمرکز این پژوهش بر شناسایی شاخص‌های عملکرد لجستیک پایدار یا عوامل پذیرش فناوری نیست. نقطه تمرکز پژوهش، شناسایی آن دسته از عوامل فناورانه، سازمانی و محیطی است که استقرار و بهره‌برداری اثربخش از هوش مصنوعی را در راستای ارتقای عملکرد پایداری لجستیک امکان‌پذیر می‌سازند. از این رو، مفهوم «توانمندسازهای هوش مصنوعی» در این پژوهش به مجموعه شرایط و قابلیت‌هایی اطلاق می‌شود که پیش‌نیاز موفقیت ابتکارات مبتنی بر هوش مصنوعی در لجستیک پایدار صنعت پتروشیمی هستند.

در این راستا، چارچوب فناوری-سازمان-محیط (TOE) به دلیل رویکرد جامع و چندبعدی خود، بستری مناسب برای شناسایی و طبقه‌بندی توانمندسازهای هوش مصنوعی فراهم می‌آورد. این چارچوب عوامل مؤثر بر توسعه و بهره‌برداری از فناوری را در سه بعد فناوری، سازمان و محیط دسته‌بندی کرده و امکان تحلیل همزمان قابلیت‌های فنی، منابع و آمادگی سازمانی، و شرایط محیطی و نهادی را فراهم می‌سازد (Tornatzky & Fleischer, 1990). از آنجا که هدف این پژوهش شناسایی عوامل زمینه‌ساز استقرار و بهره‌برداری مؤثر از هوش مصنوعی در راستای بهبود عملکرد پایداری لجستیک صنعت پتروشیمی است،

چارچوب TOE به عنوان مبنای نظری پژوهش برای ساختاربندی و مدل سازی توانمندسازهای شناسایی شده مورد استفاده قرار گرفته است.

در این پژوهش، منظور از «توانمندسازهای هوش مصنوعی»، مجموعه‌ای از قابلیت‌ها، منابع، زیرساخت‌ها، سازوکارهای سازمانی و شرایط محیطی است که استقرار، پذیرش و بهره‌برداری اثربخش از فناوری‌های هوش مصنوعی را در سازمان امکان‌پذیر ساخته و زمینه تحقق پیامدهای مورد انتظار، از جمله بهبود عملکرد پایداری لجستیک، را فراهم می‌کنند.

در مسیر بررسی پژوهش‌های پیشین، در سال‌های اخیر، هم‌زمان با گسترش کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت زنجیره تأمین، توجه پژوهشگران به شناسایی عوامل و توانمندسازهای مؤثر بر استقرار و بهره‌برداری موفق از این فناوری افزایش یافته است. بخش مهمی از مطالعات این حوزه تلاش کرده‌اند شرایطی را تبیین کنند که سازمان‌ها را قادر می‌سازد از ظرفیت‌های هوش مصنوعی برای بهبود عملکرد عملیاتی، افزایش تاب‌آوری و تحقق اهداف پایداری بهره‌مند شوند. برای مثال، Hao and Demir (۲۰۲۵) با بررسی جامع ادبیات موضوع نشان دادند که موفقیت هوش مصنوعی در زنجیره تأمین به مجموعه‌ای از عوامل فناورانه، سازمانی و محیطی وابسته است و اهمیت این عوامل در مراحل مختلف توسعه و استقرار فناوری تغییر می‌کند. به‌طور مشابه، Hsu و همکاران (۲۰۲۴) در حوزه لجستیک هوشمند تأکید کردند که عواملی نظیر حمایت دولت، سیاست‌گذاری مناسب و رویکرد انسان‌محور، نقش زیربنایی در شکل‌گیری سایر قابلیت‌های فناورانه و توسعه پایدار لجستیک ایفا می‌کنند.

بخش دیگری از پژوهش‌ها بر نقش زیرساخت‌های دیجیتال و قابلیت‌های فناورانه تمرکز داشته‌اند. Kumar and Gupta (۲۰۲۰) نشان دادند که کیفیت داده‌ها، تحلیل کلان‌داده‌ها و اینترنت اشیا از مهم‌ترین پیشران‌های تحول دیجیتال در زنجیره تأمین محسوب می‌شوند و می‌توانند پاسخگویی و انعطاف‌پذیری سازمان‌ها را بهبود بخشند. در همین راستا، Merhi and Harfouche (۲۰۲۴) بیان کردند که موفقیت پروژه‌های هوش مصنوعی بیش از هر چیز به عواملی نظیر کیفیت داده‌ها، آمادگی زیرساختی و مدیریت مؤثر پروژه وابسته است. این مطالعات بر این نکته تأکید دارند که بهره‌برداری از هوش مصنوعی بدون وجود زیرساخت‌های داده‌ای مناسب و قابلیت‌های فناورانه کافی، با محدودیت‌های جدی مواجه خواهد شد. هم‌زمان، گروهی از پژوهشگران تلاش کرده‌اند نقش هوش مصنوعی را در ارتقای پایداری و شفافیت زنجیره تأمین تبیین کنند. Rajput (۲۰۲۴) نشان داد که هوش

مصنوعی در کنار فناوری‌هایی نظیر بلاکچین و امنیت سایبری می‌تواند نقش مهمی در افزایش قابلیت ردیابی، شفافیت اطلاعات و بهبود عملکرد زیست‌محیطی زنجیره تأمین ایفا کند. همچنین Shahzadi و همکاران (۲۰۲۴) با مرور گسترده ادبیات، تأکید کردند که پذیرش و توسعه موفق هوش مصنوعی صرفاً به عوامل فناورانه محدود نمی‌شود و متغیرهایی نظیر سرمایه انسانی، فرهنگ سازمانی، آمادگی دیجیتال، منابع مالی و حمایت مدیریتی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. یافته‌های این مطالعات نشان می‌دهد که استقرار هوش مصنوعی یک پدیده چندبعدی است و تحقق منافع آن مستلزم هم‌راستایی عوامل فناوری، سازمان و محیط خواهد بود.

مطالعات دیگری نیز ارتباط میان هوش مصنوعی و اهداف پایداری را مورد توجه قرار داده‌اند Sindhvani و همکاران (۲۰۲۳) بر نقش زیرساخت‌های دیجیتال و حمایت‌های نهادی در کاهش ردپای کربنی زنجیره تأمین تأکید کرده‌اند Pandey و همکاران، (۲۰۲۵) نیز نشان دادند که دیجیتالی‌سازی زنجیره تأمین و توسعه فناوری‌های هوشمند می‌تواند به بهبود هم‌زمان عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی منجر شود. همچنین Nahr و همکاران (۲۰۲۱) و Richey و همکاران (۲۰۲۳) بیان کرده‌اند که ترکیب هوش مصنوعی با فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، ظرفیت قابل توجهی برای بهینه‌سازی تصمیمات، افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و ارتقای پایداری در عملیات لجستیکی ایجاد می‌کند. در کنار این مطالعات، برخی پژوهش‌ها به‌طور مستقیم بر صنعت پتروشیمی، نفت و گاز یا سایر صنایع فرآیندی متمرکز بوده‌اند. همچنین سنگبر و همکاران (۱۴۰۱) با بررسی توانمندسازهای مدیریت زنجیره تأمین پایدار در صنعت پتروشیمی، اهمیت برنامه‌ریزی و هماهنگی راهبردی را برجسته کردند Javadi و همکاران (۲۰۲۵) نیز نشان دادند که ملاحظات زیست‌محیطی و مدیریت پیامدهای اکولوژیک از مهم‌ترین دغدغه‌های پایداری در این صنعت به شمار می‌روند. همچنین Ahmad و همکاران (۲۰۲۱) بر ضرورت هم‌راستایی قابلیت‌های داخلی سازمان با الزامات محیطی و نهادی در صنایع نفت و گاز تأکید کرده‌اند. اگرچه این مطالعات شناخت ارزشمندی از الزامات پایداری در صنایع سنگین فراهم می‌کنند، اما توجه محدودی به نقش هوش مصنوعی و الزامات استقرار آن در فرآیندهای لجستیکی داشته‌اند.

مرور انتقادی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که ادبیات موجود حول دو جریان نسبتاً مستقل شکل گرفته است. جریان نخست بر پایداری زنجیره تأمین و الزامات صنایع فرآیندی، به‌ویژه

پتروشیمی، تمرکز دارد و جریان دوم به بررسی کاربردها، مزایا و عوامل مؤثر بر استقرار هوش مصنوعی در زنجیره تأمین می‌پردازد. با وجود ارزشمندی هر دو جریان، ارتباط نظام‌مند میان آن‌ها هنوز به‌طور کامل شکل نگرفته است. بخش عمده پژوهش‌های مرتبط با هوش مصنوعی، ماهیتی عمومی داشته و در بستر زنجیره‌های تأمین عمومی یا صنایع تولیدی انجام شده‌اند؛ بنابراین ویژگی‌های خاص لجستیک در صنعت پتروشیمی، از جمله حمل‌ونقل مواد خطرناک، الزامات ایمنی و زیست‌محیطی سخت‌گیرانه، وابستگی بالا به زیرساخت‌های سرمایه‌بر و حساسیت شدید به مخاطرات عملیاتی را به‌طور کافی منعکس نمی‌کنند. از سوی دیگر، مطالعات مرتبط با پایداری در صنعت پتروشیمی عمدتاً بر شاخص‌های عملکردی، پیامدهای زیست‌محیطی یا الزامات مدیریتی تمرکز داشته‌اند و کمتر به هوش مصنوعی به‌عنوان یک قابلیت تحول‌آفرین پرداخته‌اند. افزون بر این، بسیاری از پژوهش‌های موجود توجه بیشتری به عوامل فناورانه داشته‌اند و ابعاد سازمانی و محیطی، به‌ویژه موضوعاتی نظیر حاکمیت هوش مصنوعی، آمادگی داده‌ای، سرمایه انسانی، سازوکارهای نهادی، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و الزامات اخلاقی، کمتر به‌صورت یکپارچه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از این‌رو، همچنان فقدان یک چارچوب جامع و اقتضایی که بتواند مجموعه توانمندسازهای هوش مصنوعی را در ابعاد فناوری، سازمان و محیط‌شناسایی، طبقه‌بندی و متناسب با الزامات لجستیک پایدار صنعت پتروشیمی تبیین کند، به‌عنوان یک شکاف دانشی مهم در ادبیات موضوع باقی مانده است. بنابراین، خلأ اصلی ادبیات نه در شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد لجستیک پایدار، بلکه در نبود یک چارچوب منسجم برای شناسایی، طبقه‌بندی و مدل‌سازی توانمندسازهای هوش مصنوعی است که استقرار موفق این فناوری را در راستای بهبود عملکرد پایداری لجستیک صنعت پتروشیمی تسهیل می‌کنند. پژوهش حاضر در صدد است این خلأ را با ارائه یک چارچوب مبتنی بر نظریه فناوری-سازمان-محیط (TOE) برطرف سازد.

روش

پژوهش حاضر از نظر هدف، توسعه‌ای-کاربردی و از نظر رویکرد، آمیخته (کیفی-کمی) است. این پژوهش با بهره‌گیری از منطق قیاسی-استقرایی تلاش می‌کند ضمن شناسایی و ساختاربندی توانمندسازهای هوش مصنوعی مؤثر بر عملکرد پایداری لجستیک زنجیره تأمین در صنعت پتروشیمی، اعتبار و روایی این ساختار را نیز مورد ارزیابی قرار دهد.

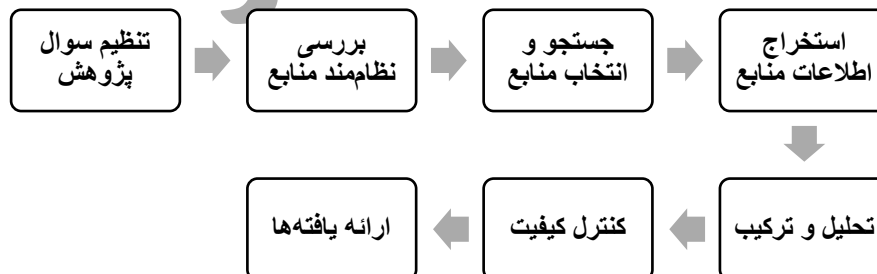
فرآیند پژوهش در سه مرحله انجام شده است. در مرحله نخست، با استفاده از مرور نظام‌مند ادبیات، ابعاد، مؤلفه‌ها و عوامل توانمندساز هوش مصنوعی مؤثر بر پایداری لجستیک استخراج و در قالب چارچوب فناوری-سازمان-محیط (TOE) دسته‌بندی شدند. در مرحله دوم، به منظور ارزیابی اعتبار محتوایی و بومی‌سازی عوامل شناسایی شده متناسب با شرایط صنعت پتروشیمی ایران، از روش دلفی فازی و نظرات خبرگان دانشگاهی و صنعتی استفاده شد. در نهایت، در مرحله سوم، ساختار نهایی حاصل از مرحله دلفی فازی از طریق تحلیل عاملی تأییدی مورد آزمون قرار گرفت تا برازش مدل اندازه‌گیری و اعتبار سازه‌های پژوهش بررسی شود. بر این اساس، خروجی نهایی پژوهش، چارچوبی ساختاریافته از توانمندسازهای هوش مصنوعی در ابعاد فناوری، سازمان و محیط است که می‌تواند به عنوان مبنایی برای توسعه و استقرار راهکارهای هوشمند در راستای ارتقای عملکرد پایداری لجستیک زنجیره تأمین صنعت پتروشیمی مورد استفاده قرار گیرد.

یافته‌ها

۴.۱. روش مرور نظام‌مند ادبیات

در پژوهش حاضر، به دلیل پراکندگی مفهومی و روش‌شناختی موجود در ادبیات مرتبط با توانمندسازهای هوش مصنوعی برای لجستیک پایدار، و همچنین با هدف یکپارچه‌سازی یافته‌های پراکنده و استخراج بینش‌های عمیق و ساختاریافته، از روش مرور نظام‌مند مطابق چارچوب هفت مرحله‌ای سندلوسکی و باروسو^۱ (۲۰۰۷)، استفاده شده است. در شکل ۱ مراحل این روش نمایش نشان داده شده است.

شکل ۱. الگوی ۷ مرحله‌ای انجام روش مرور نظام‌مند ادبیات (Sandelowski & Barroso, 2007)



¹ Sandelowski & Barroso

نخستین گام در مرور نظام‌مند ادبیات، تدوین سؤال پژوهش است؛ زیرا دامنه جستجو، معیارهای غربالگری و جهت تحلیل مطالعات بر اساس آن تعیین می‌شود. با توجه به هدف پژوهش، سؤال اصلی مطالعه به صورت «توانمندسازهای هوش مصنوعی مؤثر بر عملکرد پایداری لجستیک زنجیره تأمین در صنعت پتروشیمی کدام‌اند و چگونه می‌توان آن‌ها را ساختاربندی کرد؟» تدوین شده است. همچنین در راستای اهداف پژوهش، سؤال دوم به این صورت مطرح می‌گردد: «وضعیت موجود و سطح آمادگی صنعت پتروشیمی در خصوص توانمندسازهای شناسایی شده به چه صورت است؟» به‌منظور پاسخ‌گویی به این سؤالات، ابعاد، مؤلفه‌ها و عوامل توانمندساز هوش مصنوعی از ادبیات موضوع استخراج و طبقه‌بندی شدند. همچنین، معیارهای شمول و حذف مطالعات شامل بازه زمانی، زبان، نوع مستندات و راهبرد جستجو تعیین گردید که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. معیارهای پذیرش پژوهش‌ها و منابع

معیار	پذیرش	عدم پذیرش
زبان پژوهش	فارسی و لاتین	غیر از فارسی و لاتین
زمان انجام	مقالات و مستندات بین سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۵	قبل از ۲۰۰۸ و بعد از ۲۰۲۵
جامعه مورد مطالعه	کلیه مقالاتی که مرتبط با موضوع «بهبود عملکرد لجستیک زنجیره تأمین پایداری صنعت پتروشیمی مبتنی بر توانمندسازهای هوش مصنوعی»	موضوعاتی غیر از «بهبود عملکرد لجستیک زنجیره تأمین پایداری صنعت پتروشیمی مبتنی بر توانمندسازهای هوش مصنوعی»
شرایط مورد مطالعه	مقالاتی که توسط پژوهشگر مرتبط با موضوع تشخیص داده شود.	مقالاتی که توسط پژوهشگر مرتبط با موضوع تشخیص داده نشوند.
نوع مستندات و مقالات	مقالات مرتبط در نشریه‌های معتبر داخلی و خارجی	مقالاتی که هنوز در نشریه انتشار نیافته‌اند یا نوع کنفرانسی، یادداشت یا نشریه‌های نامعتبر هستند. سایر مستندات در قالب گزارش و یا ...
روش‌های انجام شده در پژوهش‌ها	انواع روش‌های کیفی و کمی در صورت ارائه نتایج مربوط به موضوع رساله	-
استراتژی‌های جستجوی مقالات	- جستجوی کلید واژه‌های مرتبط در پایگاه‌های داخلی شامل پایگاه علمی جهاد دانشگاهی (SID)، نورمگز و پایگاه‌های خارجی شامل Elsevier, Scopus, Springer	- مقالات و مستندات خارج از شمول استراتژی‌های جستجو

معیار	پذیرش	عدم پذیرش
	ScienceDirect, Emerald Google Scholar و ResearchGate - مرور شماره‌های نشریات منتخب	
محدوده جغرافیایی پژوهش‌ها	تمامی کشورها	

در گام دوم، جستجوی نظام‌مند مطالعات در پایگاه‌های معتبر داخلی و بین‌المللی انجام شد تا پوشش جامعی از پژوهش‌های مرتبط فراهم شود و سوگیری ناشی از اتکا به یک منبع خاص کاهش یابد. بر این اساس، جستجوی منابع در پایگاه‌های داخلی شامل پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID) و نورمگز و در پایگاه‌های خارجی شامل Springer, Scopus, Elsevier, Emerald, ScienceDirect, ردیابی منابع از پایگاه‌ها Google Scholar و ResearchGate استفاده گردید.

به‌منظور تضمین دقت و انسجام فرآیند جستجو، کلیدواژه‌های مرتبط با موضوع پژوهش به‌صورت هدفمند و متناسب با سؤال پژوهش تعریف و به کار گرفته شدند. دامنه زمانی منابع مورد بررسی، سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۵ را دربر می‌گیرد. کلیدواژه‌هایی که با آنها در پایگاه‌های علمی داخلی جستجو به عمل آمد شامل: «توانمندسازهای هوش مصنوعی»، «عوامل پذیرش هوش مصنوعی»، «توانمندسازهای صنعت ۴.۰»، «توانمندسازهای تحول دیجیتال»، «توانمندسازهای زنجیره تامین پایدار»، «هوش مصنوعی در زنجیره تامین پتروشیمی»؛ و کلیدواژه‌هایی که با آنها در پایگاه‌های علمی خارجی جستجو به عمل آمد شامل:

«Artificial Intelligence Enablers»، «Artificial Intelligence Adoption Factors»، «Big Data Analytics»، «Digital Transformation Enablers»، «Industry 4.0 Enablers»، «AI in Petrochemical Supply Chain Enablers»، «Artificial Intelligence in Logistics»، «AI-enabled Supply Chain».

در گام سوم، جستجوی نظام‌مند منابع با بهره‌گیری از کلیدواژه‌های تعیین‌شده در پایگاه‌های علمی داخلی و خارجی انجام شد که در نتیجه آن ۳۴۵ منبع در حوزه هوش مصنوعی در لجستیک زنجیره تامین پایدار و صنعت پتروشیمی شناسایی گردید. در ادامه و

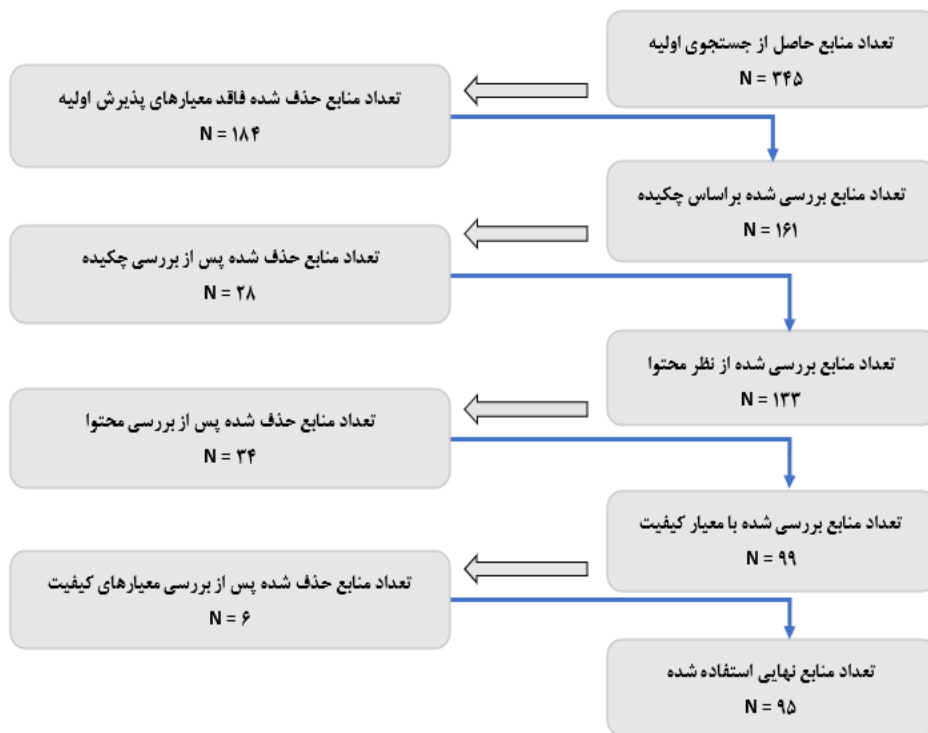
مطابق با مراحل که در شکل ۲ تشریح شده است، بر اساس معیارهای پذیرش اولیه، ۱۸۴ منبع به دلیل عدم انطباق با دامنه پژوهش حذف شد و ۱۶۱ منبع باقی مانده از طریق بررسی عنوان و چکیده غربال‌گری شدند که طی آن ۲۸ منبع دیگر کنار گذاشته شد. سپس ۱۳۳ منبع از نظر محتوایی و ارتباط با توانمندسازهای هوش مصنوعی و شاخص‌های عملکرد لجستیک ارزیابی شدند که در این مرحله ۳۴ منبع فاقد داده‌های قابل استخراج حذف گردید. در نهایت، ۹۹ منبع باقی مانده با استفاده از روش «برنامه مهارت‌های ارزیابی انتقادی»^۱ (CASP) از نظر کیفیت روش‌شناختی بررسی شدند و منابعی که کمتر از ۵۰ درصد امتیاز کل را کسب کردند کنار گذاشته شدند (بخشی از نتایج این روش در جدول ۲ قابل مشاهده است). در نتیجه، ۹۵ منبع علمی واجد شرایط به عنوان مبنای انجام فراترکیب و استخراج مؤلفه‌ها و شاخص‌های کلیدی پژوهش انتخاب شد.

جدول ۲. جدول امتیازهای منابع بررسی شده

شماره منبع	عنوان منبع	روش نمونه‌گیری	روش کیفیت جمع‌آوری داده‌ها	تناسب روش تحقیق	امکان تناسب روش	وضوح اهداف و اهمیت پژوهش	تناسب و تطابق طرح پژوهش	میزان رعایت نکات اخلاقی	دقت تجزیه و تحلیل داده‌ها	بیان روشن یافته	ارزیابی افزایش پژوهش	مجموع امتیاز
AI-۰۱	پندی و همکاران، ۲۰۲۵	۴	۴	۵	۴	۵	۵	۴	۵	۵	۵	۴۶
AI-۰۲	گوپتا و همکاران، ۲۰۲۰	۴	۵	۵	۴	۵	۵	۴	۵	۵	۵	۴۷
AI-۰۳	مورخجی و همکاران، ۲۰۲۴	۴	۴	۵	۴	۵	۵	۴	۵	۵	۵	۴۶
AI-۰۴	هسو و همکاران، ۲۰۲۴	۴	۴	۵	۴	۵	۵	۴	۵	۵	۵	۴۶
AI-۰۵	هائو و دمیر، ۲۰۲۴	۴	۴	۵	۴	۵	۵	۴	۵	۵	۵	۴۶

^۱ CASP (Critical Appraisal Skills Program)

شکل ۲. فلوچارت بررسی منابع و پژوهش‌ها



در ادامه مراحل روش مرور نظام‌مند ادبیات، منابع منتخب مرور نظام‌مند به‌طور دقیق بررسی و ۲۸۱ توانمندساز اولیه هوش مصنوعی شناسایی شد. پس از پالایش، ادغام و حذف موارد تکراری و هم‌پوشان، این تعداد به ۵۷ توانمندساز منحصربه‌فرد کاهش یافت. سپس توانمندسازها در قالب «مؤلفه‌های مفهومی سازمان‌دهی و براساس چارچوب TOE در سه بعد فناوری، سازمان و محیط طبقه‌بندی شدند. در نهایت، چارچوب نهایی پژوهش شامل ۳ بعد، ۱۱ مؤلفه و ۵۷ توانمندساز (مطابق جدول ۳) شکل گرفت که مبنای مراحل بعدی شامل اعتبارسنجی و مدل‌سازی قرار گرفت. در پایان نیز، ضریب کاپای محاسبه‌شده (۰.۸۲۸) نشان‌دهنده توافق مطلوب میان خبرگان و مؤید اعتبار مناسب فرایند مرور نظام‌مند ادبیات در این پژوهش است.

جدول ۳. ابعاد، مؤلفه‌ها و عوامل توانمندساز هوش مصنوعی در لجستیک زنجیره تامین پایدار

منبع	عامل توانمندساز	مؤلفه	بعد
(Hirata et al., 2025); (Rajput, 2024); (Gupta et al., 2021); (Ghoreishi & Happonen, 2020); (Hangl et al., 2022); (Mahmoudi et al., 2025); (Dhamija et al., 2020); (Hsu et al., 2022)	زیرساخت‌های پردازشی، ارتباطی و ذخیره‌سازی داده - معماری سیستم‌های داده‌ای (متمرکز/غیرمتمرکز/ابری) - یکپارچگی، همگام‌سازی و تبادل بلادرنگ داده‌ها میان سیستم‌ها - توان پردازش و پشتیبانی از داده‌های حجیم - قابلیت یکپارچه‌سازی AI با سیستم‌های عملیاتی موجود - کیفیت، دسترسی پذیری و شفافیت داده‌ها در سطح سازمان	زیرساخت، مدیریت و آمادگی داده برای هوش مصنوعی	فناوری
(Merh & Harfouche, 2024); (Hsu et al., 2024); (Rodríguez et al., 2018); (Mahmoudi et al., 2025); (Hao & Demir, 2023)	استقرار چارچوب‌های حاکمیت، سیاست‌گذاری و نظارت بر هوش مصنوعی در سازمان - مدیریت چرخه عمر مدل‌های هوش مصنوعی - قابلیت توضیح‌پذیری و تفسیرپذیری مدل‌های هوش مصنوعی (Explainable AI) - پایش، ممیزی و کنترل سوگیری و ریسک‌های عملکردی مدل‌های هوش مصنوعی	حاکمیت هوش مصنوعی	
(Pandey et al., 2025); (Suzari et al., 2024); (Gupta et al., 2021); (Choudhary, 2023); (Hao & Demir, 2023); (Mahmoudi et al., 2025)	مدیریت هویت و کنترل دسترسی کاربران و دستگاه‌ها - پایش بلادرنگ، شناسایی و پیشگیری از تهدیدات سایبری - تاب‌آوری سایبری و استراتژی‌های مقابله با حملات و اختلالات - نگهداری پیشگیرانه هوشمند تجهیزات لجستیکی مبتنی بر AI - حفاظت از داده‌ها، حریم خصوصی و دارایی‌های دیجیتال سازمان - آموزش و فرهنگ‌سازی امنیت سایبری در سازمان	امنیت و حفاظت سایبری	
(Rajput, 2024); (Gupta et al., 2021); (Hao & Demir, 2023); (Roknoldini et al., 2023); (Dhamija et al., 2020); (Pandey et al., 2025);	رایانش ابری (Computing Cloud) - تحلیل کلان داده (Big Data Analytics) - اینترنت 5G / اتصال پیشرفته - اینترنت اشیاء (IoT) - سیستم سایبر-فیزیکی (CPS) - دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) - شبکه بلاکچین (Blockchain)	فناوری‌های پایه/همسو با هوش مصنوعی	
(Pandey et al., 2025); (Dweekat & Park, 2016); (Sircar et al., 2021); (Sharma & Rathore, 2024); (Javadi et al., 2025)	مدل‌های تأمین مالی و تخصیص منابع برای نوآوری‌های هوشمند - حمایت مالی از پروژه‌های پایلوت و اجرای آزمایشی فناوری‌های هوشمند - تحلیل و پیش‌بینی بازگشت سرمایه (ROI) فناوری‌های هوشمند - مدل‌سازی سناریوهای اقتصادی و استراتژیک برای تصمیم‌گیری در خصوص سرمایه‌گذاری فناوری	منابع مالی و سرمایه‌گذاری	سازمانی
(Hao & Demir, 2023); (Pandey et al., 2025); (Sangher et al., 2019); (Lamba & Singh, 2018); (Javadi et al., 2025); (Dweekat & Park, 2016);	شناخت، تعهد و رهبری مدیران ارشد در پذیرش و اجرای هوش مصنوعی - کیفیت تدوین استراتژی، وضوح اهداف کسب‌وکار و بروزرسانی استراتژی‌ها متناسب با فناوری‌های نوین - ساختار سازمانی چابک و غیرمتمرکز برای	راهبرد، ساختار و فرهنگ سازمانی	

منبع	عامل توانمندساز	مؤلفه	بعد
(Gunasekaran et al., 2017); (Beier et al., 2020); (Shahzadi et al., 2024); (Belhadi et al., 2022); (Woschank et al., 2020); (Ghobakhloo, 2020); (Mukherjee et al., 2024); (Roknoldini et al., 2023); (Bag et al., 2020)	تصمیم‌گیری سریع مبتنی بر تحلیل داده - پیچیدگی ادراک‌شده فناوری- فرهنگ‌سازی و ظرفیت‌سازی نوآوری سازمانی مبتنی بر فناوری - سطح بلوغ دیجیتال و آمادگی فناوری سازمان - استقرار نظام‌های انگیزشی و مدیریت تجربه کارکنان برای ترویج بکارگیری فناوری		
(Dubey et al., 2020); (Chandak & Kumar, 2020); (Sangber et al., 2022); (Sircar et al., 2021); (Hirata et al., 2025); (Dhamija et al., 2020); (Sharma & Rathore, 2024)	تغییر استراتژی‌های جذب و استخدام متناسب با بازارکار نیروهای متخصص IT و AI - بازطراحی مدل جبران خدمات و مزایا متناسب با پرداخت عادلانه و رقابتی - استقرار استانداردهای ایمنی و ارگونومی هوش مصنوعی در محیط‌های عملیاتی- بازطراحی مدل مدیریت و ارزیابی عملکرد متناسب با پروژه‌ها و مشاغل فناورمحور - مدیریت تنوع، شمول‌پذیری و ظرفیت نیروی کار در سازمان - ارتقاء سیستم آموزش و توسعه سرمایه انسانی برای عصر هوش مصنوعی	سرمایه انسانی و مدیریت استعداد	
(Merh & Harfouche, 2024); (Dubey et al., 2020); (Sangber et al., 2019); (Haidegger et al., 2023); (Hao & Demir, 2023)	همکاری و هماهنگی بین‌واحدی در فرایندهای عملیاتی لجستیک و تسهیم دانش - همکاری و ارتباطات مؤثر با شرکای زنجیره تأمین و ذی‌نفعان خارجی - بازطراحی و خودکارسازی هوشمند فرایندهای لجستیکی مبتنی بر هوش مصنوعی - مدیریت تغییر و انطباق فرایندی با تحولات محیطی	جریان ارتباطی و بازطراحی فرایندها	
(Dweekat & Park, 2016); (Rodríguez et al., 2018); (Merh & Harfouche, 2024); (Sharma & Rathore, 2024); (Sanders et al., 2016)	بهره‌مندی از مشوق‌های مالی و مالیاتی دولت و سایر نهادها - چارچوب‌ها و الزامات مقرراتی و حقوقی بیرونی برای توسعه، استقرار و پذیرش هوش مصنوعی - شفافیت و اطمینان در تعهدات حقوقی و قراردادی- مدیریت و حفاظت حقوقی از دارایی‌های فکری	محیط نهادی و مقرراتی	
(Ahmad et al., 2021); (Toorajipour et al., 2021); (Hao & Demir, 2023); (Merh & Harfouche, 2024); (Suzari et al., 2024); (Hao & Demir, 2023)	میزان آمادگی اکوسیستم فناوری منطقه محل استقرار شرکت - تعامل و بهره‌گیری از فرصت‌ها و ظرفیت‌های بازارهای محلی - فشارهای محیطی شامل رقابت، مشتریان و تغییرات فناوری در پذیرش هوش مصنوعی - همکاری با مراکز علمی و نوآور خارجی (دانشگاه‌ها، استارت‌آپ‌ها) - دسترسی به ارائه‌دهندگان خدمات و پشتیبانی AI	اکوسیستم فناوری و بازار	محیط

منبع	عامل توانمندساز	مؤلفه	بعد
(Merh & Harfouche, 2024); (Hussain et al., 2024); (Haidegger et al., 2023); (Gunasekaran et al., 2017); (Beier et al., 2020); (Shahzadi et al., 2024);	رعایت اصول اخلاقی، شفافیت و انصاف در سامانه‌های هوش مصنوعی - اعتماد و پذیرش ذی‌نفعان نسبت به کاربردهای هوش مصنوعی - پایش و مدیریت پیامدهای اجتماعی و انسانی ناشی از استقرار هوش مصنوعی - همسویی کاربردهای هوش مصنوعی با اهداف توسعه پایدار و الزامات ESG	مسئولیت‌پذیری اجتماعی و پایداری	

بررسی یافته‌های مرور نظام‌مند ادبیات نشان می‌دهد که توانمندسازهای فناوری، بستر لازم برای استقرار اثربخش هوش مصنوعی در لجستیک زنجیره تأمین را فراهم می‌کنند. مؤلفه‌هایی مانند زیرساخت، مدیریت و آمادگی داده، امکان تحلیل بلادرنگ اطلاعات و بهینه‌سازی حمل‌ونقل، موجودی و برنامه‌ریزی عملیات را فراهم کرده و از این طریق موجب کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و افزایش بهره‌وری لجستیکی می‌شوند. همچنین، حاکمیت هوش مصنوعی و امنیت سایبری با تضمین کیفیت داده‌ها، قابلیت اعتماد تصمیمات و تداوم عملکرد سامانه‌های هوشمند، ریسک‌های عملیاتی و اختلالات زنجیره تأمین را کاهش می‌دهند؛ در حالی که فناوری‌های پایه‌ای نظیر اینترنت اشیا، کلان‌داده و رایانش ابری، امکان پایش و ردیابی هوشمند جریان مواد را فراهم می‌سازند (Gupta et al., 2021; Toorajipour et al., 2021; Hao & Demir, 2023).

در بعد سازمانی، یافته‌ها نشان می‌دهد که موفقیت کاربرد هوش مصنوعی بیش از هر چیز به آمادگی سازمان وابسته است. مؤلفه‌هایی نظیر منابع مالی و سرمایه‌گذاری، راهبرد، ساختار و فرهنگ سازمانی، سرمایه انسانی و مدیریت استعداد و بازطراحی فرایندها، زمینه لازم برای توسعه قابلیت‌های هوشمند را فراهم می‌کنند. این توانمندسازها با ارتقای مهارت کارکنان، بهبود هماهنگی بین واحدها و بازطراحی فرایندهای لجستیکی، به کاهش ضایعات، مدیریت بهینه موجودی، افزایش ایمنی عملیات و بهبود بهره‌وری زنجیره تأمین منجر می‌شوند (Dubey et al., 2020; Belhadi et al., 2022; Shahzadi et al., 2024).

یافته‌های پژوهش همچنین نشان می‌دهد که توانمندسازهای محیطی، شامل محیط نهادی و مقرراتی، اکوسیستم فناوری و بازار و مسئولیت‌پذیری اجتماعی و پایداری، نقش مهمی در

موفقیت استقرار هوش مصنوعی ایفا می کنند. وجود قوانین و استانداردهای مناسب، همکاری با دانشگاه ها و شرکت های فناوری و همسویی با الزامات توسعه پایدار، علاوه بر تسهیل پذیرش فناوری، موجب افزایش شفافیت، قابلیت ردیابی، ایمنی حمل و نقل و کاهش پیامدهای زیست محیطی عملیات لجستیک می شود. از این رو، توانمندسازهای محیطی شرایط لازم برای دستیابی به عملکرد پایدار لجستیک در صنعت پتروشیمی را فراهم می کنند (Ahmad et al., 2021; Toorajipour et al., 2021; Hussain et al., 2024).

۴.۲. دلفی فازی

در مرحله دوم، به منظور اعتبارسنجی و غربالگری توانمندسازهای هوش مصنوعی مؤثر بر بهبود عملکرد لجستیک زنجیره تأمین پایدار صنعت پتروشیمی استخراج شده از مرور نظام مند ادبیات، از روش دلفی فازی و نظرات ۱۰ نفر از خبرگان حوزه هوش مصنوعی و فناوری اطلاعات، مدیریت عملیات، لجستیک و HSE این صنعت استفاده شد. فرآیند اجرای دلفی فازی در دو مرحله شامل تدوین ساختار اولیه ابعاد، مؤلفه ها و عوامل توانمندساز و ارزیابی آنها از طریق پرسشنامه دلفی فازی توسط خبرگان، تجمیع نظرات با استفاده از میانگین (رابطه ۱)، فازی زدایی دیدگاه ها (رابطه ۲) و در نهایت غربالگری و تصمیم گیری نهایی درباره پذیرش یا حذف توانمندسازها بر اساس مقادیر به دست آمده بود. نتایج حاصل از این مرحله در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین، خبرگان مشارکت کننده شامل ۴ نفر دارای مدرک دکتری، ۴ نفر کارشناسی ارشد و ۲ نفر کارشناسی در رشته های مهندسی کامپیوتر، مکانیک و صنایع بودند که همگی حداقل ۱۰ سال سابقه کاری مرتبط در این حوزه داشتند.

$$F_{AVE} = \frac{\sum l}{N}, \frac{\sum m}{N}, \frac{\sum u}{N} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\tilde{F} = (L, M, U) \quad \text{Then } F = \frac{L+M+U}{3} \quad \text{رابطه ۲}$$

جدول ۴. نتایج حاصل از اجرای روش دلفی فازی بر توانمندسازهای هوش مصنوعی

شاخص ها و مولفه ها	میانگین فازی زدایی شده دور اول	میانگین فازی زدایی شده دور دوم	اختلاف دورها	نتیجه
زیرساخت های پردازشی، ارتباطی و ذخیره سازی داده	۰.۷۸	۰.۷۶	۰.۰۲	تایید
معماری سیستم های داده ای (متمرکز/غیرمتمرکز/ابری)	۰.۸۳	۰.۸۵	۰.۰۲	تایید
یکپارچگی، همگام سازی و تبادل بلادرنگ داده ها میان سیستم ها	۰.۷۳	۰.۷۲	۰.۰۲	تایید
توان پردازش و پشتیبانی از داده های حجیم	۰.۷۶	۰.۷۸	۰.۰۲	تایید
قابلیت یکپارچه سازی AI با سیستم های عملیاتی موجود	۰.۸۱	۰.۸۱	۰.۰۰	تایید
کیفیت، دسترس پذیری و شفافیت داده ها در سطح سازمان	۰.۸۳	۰.۸۴	۰.۰۱	تایید
زیرساخت، مدیریت و آمادگی داده برای هوش مصنوعی	۰.۷۵	۰.۷۹	۰.۰۴	تایید
استقرار چارچوب های حاکمیت، سیاست گذاری و نظارت بر هوش مصنوعی در سازمان	۰.۸۸	۰.۸۶	۰.۰۲	تایید
مدیریت چرخه عمر مدل های هوش مصنوعی	۰.۷۸	۰.۸۰	۰.۰۲	تایید
قابلیت توضیح پذیری و تفسیرپذیری مدل های هوش مصنوعی (Explainable AI)	۰.۷۶	۰.۷۳	۰.۰۲	تایید
پایش، ممیزی و کنترل سوگیری و ریسک های عملکردی مدل های هوش مصنوعی	۰.۷۵	۰.۷۷	۰.۰۲	تایید
حاکمیت هوش مصنوعی	۰.۷۳	۰.۷۳	۰.۰۰	تایید
مدیریت هویت و کنترل دسترسی کاربران و دستگاه ها	۰.۸۳	۰.۸۶	۰.۰۳	تایید
پایش بلادرنگ، شناسایی و پیشگیری از تهدیدات سایبری	۰.۷۸	۰.۷۵	۰.۰۳	تایید
تاب آوری سایبری و استراتژی های مقابله با حملات و اختلالات	۰.۷۶	۰.۷۳	۰.۰۲	تایید
نگهداری پیشگیرانه هوشمند تجهیزات لجستیکی مبتنی بر AI	۰.۵۸	۰.۵۰	۰.۰۸	عدم تایید
حفاظت از داده ها، حریم خصوصی و دارایی های دیجیتال سازمان	۰.۷۷	۰.۷۶	۰.۰۱	تایید
آموزش و فرهنگ سازی امنیت سایبری در سازمان	۰.۷۳	۰.۷۰	۰.۰۲	تایید
امنیت و حفاظت سایبری	۰.۸۴	۰.۸۶	۰.۰۲	تایید
رایانش ابری (Computing Cloud)	۰.۷۸	۰.۷۵	۰.۰۳	تایید
تحلیل کلان داده (Data Analytics Big)	۰.۸۱	۰.۸۰	۰.۰۱	تایید
اینترنت G5 / اتصال پیشرفته	۰.۹۰	۰.۹۰	۰.۰۰	تایید
اینترنت اشیاء (IoT)	۰.۷۸	۰.۷۹	۰.۰۲	تایید
سیستم سایبر-فیزیکی (CPS)	۰.۸۷	۰.۸۶	۰.۰۱	تایید
دوقلوی دیجیتال (Digital Twin)	۰.۸۱	۰.۷۸	۰.۰۳	تایید

شاخص ها و مولفه ها	میانگین فازی زدایی شده دور اول	میانگین فازی زدایی شده دور دوم	اختلاف دورها	نتیجه
شبکه بلاکچین (Blockchain)	۰.۷۶	۰.۷۶	۰.۰۰	تایید
فناوری های پایه / همسو با هوش مصنوعی	۰.۸۷	۰.۸۶	۰.۰۱	تایید
مدل های تأمین مالی و تخصیص منابع برای نوآوری های هوشمند	۰.۸۴	۰.۸۶	۰.۰۲	تایید
حمایت مالی از پروژه های پایلوت و اجرای آزمایشی فناوری های هوشمند	۰.۸۲	۰.۷۹	۰.۰۳	تایید
تحلیل و پیش بینی بازگشت سرمایه (ROI) فناوری های هوشمند	۰.۷۷	۰.۷۴	۰.۰۲	تایید
مدل سازی سناریوهای اقتصادی و استراتژیک برای تصمیم گیری در خصوص سرمایه گذاری فناوری	۰.۵۸	۰.۵۳	۰.۰۵	عدم تایید
منابع مالی و سرمایه گذاری	۰.۸۷	۰.۸۶	۰.۰۱	تایید
شناخت، تعهد و رهبری مدیران ارشد در پذیرش و اجرای هوش مصنوعی	۰.۷۷	۰.۷۰	۰.۰۷	تایید
کیفیت تدوین استراتژی، وضوح اهداف کسب و کار و بروزرسانی استراتژی ها متناسب با فناوری های نوین	۰.۸۳	۰.۸۴	۰.۰۱	تایید
ساختار سازمانی چابک و غیرمتمرکز برای تصمیم گیری سریع مبتنی بر تحلیل داده	۰.۸۳	۰.۷۸	۰.۰۵	تایید
پیچیدگی ادراک شده فناوری	۰.۵۳	۰.۴۳	۰.۰۹	عدم تایید
فرهنگ سازی و ظرفیت سازی نوآوری سازمانی مبتنی بر فناوری	۰.۷۸	۰.۷۳	۰.۰۵	تایید
سطح بلوغ دیجیتال و آمادگی فناورانه سازمان	۰.۸۷	۰.۸۶	۰.۰۱	تایید
استقرار نظام های انگیزشی و مدیریت تجربه کارکنان برای ترویج بکارگیری فناوری	۰.۷۲	۰.۷۱	۰.۰۱	تایید
راهبرد، ساختار و فرهنگ سازمانی	۰.۸۷	۰.۸۶	۰.۰۱	تایید
تغییر استراتژی های جذب و استخدام متناسب با بازارکار نیروهای متخصص IT و AI	۰.۸۱	۰.۸۰	۰.۰۱	تایید
بازطراحی مدل جبران خدمات و مزایا متناسب با پرداخت عادلانه و رقابتی	۰.۷۷	۰.۷۴	۰.۰۲	تایید
استقرار استانداردهای ایمنی و ارگونومی هوش مصنوعی در محیط های عملیاتی	۰.۵۸	۰.۵۸	۰.۰۰	عدم تایید

شاخص ها و مولفه ها	میانگین فازی زدایی شده دور اول	میانگین فازی زدایی شده دور دوم	اختلاف دورها	نتیجه
بازطراحی مدل مدیریت و ارزیابی عملکرد متناسب با پروژه ها و مشاغل فناورمحور	۰.۸۳	۰.۸۴	۰.۰۱	تایید
مدیریت تنوع، شمول پذیری و ظرفیت نیروی کار در سازمان	۰.۸۳	۰.۸۴	۰.۰۲	تایید
ارتقاء سیستم آموزش و توسعه سرمایه انسانی برای عصر هوش مصنوعی	۰.۸۷	۰.۸۶	۰.۰۱	تایید
سرمایه انسانی و مدیریت استعداد	۰.۸۷	۰.۸۶	۰.۰۱	تایید
همکاری و هماهنگی بین واحدی در فرایندهای عملیاتی لجستیک و تسهیم دانش	۰.۸۷	۰.۸۶	۰.۰۱	تایید
همکاری و ارتباطات مؤثر با شرکای زنجیره تأمین و ذی نفعان خارجی	۰.۸۷	۰.۸۶	۰.۰۱	تایید
بازطراحی و خودکارسازی هوشمند فرایندهای لجستیکی مبتنی بر هوش مصنوعی	۰.۷۱	۰.۷۲	۰.۰۱	تایید
مدیریت تغییر و انطباق فرایندی با تحولات محیطی	۰.۷۹	۰.۷۴	۰.۰۵	تایید
جریان ارتباطی و بازطراحی فرایندها	۰.۷۹	۰.۷۴	۰.۰۵	تایید
بهره‌مندی از مشوق‌های مالی و مالیاتی دولت و سایر نهادها	۰.۷۸	۰.۷۳	۰.۰۵	تایید
چارچوب‌ها و الزامات مقرراتی و حقوقی بیرونی برای توسعه، استقرار و پذیرش هوش مصنوعی	۰.۷۹	۰.۷۲	۰.۰۸	تایید
شفافیت و اطمینان در تعهدات حقوقی و قراردادی	۰.۵۵	۰.۵۰	۰.۰۵	عدم تایید
مدیریت و حفاظت حقوقی از دارایی‌های فکری	۰.۸۱	۰.۷۶	۰.۰۵	تایید
محیط نهادی و مقرراتی	۰.۸۳	۰.۸۶	۰.۰۳	تایید
میزان آمادگی اکوسیستم فناوری منطقه محل استقرار شرکت	۰.۷۹	۰.۷۴	۰.۰۵	تایید
تعامل و بهره‌گیری از فرصت‌ها و ظرفیت‌های بازارهای محلی	۰.۷۳	۰.۷۲	۰.۰۲	تایید
فشارهای محیطی شامل رقابت، مشتریان و تغییرات فناوری در پذیرش هوش مصنوعی	۰.۷۹	۰.۷۴	۰.۰۵	تایید
همکاری با مراکز علمی و نوآور خارجی (دانشگاه‌ها، استارت‌آپ‌ها)	۰.۸۱	۰.۷۶	۰.۰۵	تایید
دسترسی به ارائه‌دهندگان خدمات و پشتیبانی AI	۰.۸۱	۰.۷۸	۰.۰۳	تایید
اکوسیستم فناوری و بازار	۰.۸۷	۰.۸۶	۰.۰۱	تایید

شاخص ها و مولفه ها	میانگین فازی زدایی شده دور اول	میانگین فازی زدایی شده دور دوم	اختلاف دورها	نتیجه
رعایت اصول اخلاقی، شفافیت و انصاف در سامانه های هوش مصنوعی	۰.۷۰	۰.۷۲	۰.۰۲	تایید
اعتماد و پذیرش ذی نفعان نسبت به کاربردهای هوش مصنوعی	۰.۸۳	۰.۷۹	۰.۰۳	تایید
پایش و مدیریت پیامدهای اجتماعی و انسانی ناشی از استقرار هوش مصنوعی	۰.۷۸	۰.۷۳	۰.۰۵	تایید
همسویی کاربردهای هوش مصنوعی با اهداف توسعه پایدار و الزامات ESG	۰.۸۵	۰.۸۴	۰.۰۱	تایید
مسئولیت پذیری اجتماعی و پایداری	۰.۷۸	۰.۷۳	۰.۰۵	تایید

با توجه به اجرای دو دور ارزیابی در روش دلفی فازی، بررسی ها نشان داد که مقدار اختلاف میانگین نظرات خبرگان بین دور اول و دوم برای تمامی متغیرها کمتر از حد آستانه (۰.۱) است که این امر نشان دهنده دستیابی به اجماع و ثبات کافی در نظرات خبرگان می باشد (Linstone & Turoff, 2002). همچنین به منظور تصمیم گیری پیرامون پذیرش یا رد عوامل، از مقدار آستانه برابر با ۰.۷ استفاده شد. مبنای روش شناختی انتخاب این عدد، انطباق آن با حداقل سطح پذیرش برای درجه اهمیت «زیاد» در طیف فازی است و در مطالعات متعددی به عنوان مرز استاندارد برای غربالگری شاخص های بااهمیت پیشنهاد شده است (Wu & Fang, 2011). بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۴، از میان ۵۷ عامل توانمندساز و ۱۱ مؤلفه شناسایی شده در مرحله مرور نظام مند ادبیات، ۵ عامل توانمندساز شامل «نگهداری پیشگیرانه هوشمند تجهیزات لجستیکی مبتنی بر AI»، «مدل سازی سناریوهای اقتصادی و استراتژیک برای تصمیم گیری در خصوص سرمایه گذاری فناوری»، «پیچیدگی ادراک شده فناوری»، «استقرار استانداردهای ایمنی و ارگونومی هوش مصنوعی در محیط های عملیاتی» و «شفافیت و اطمینان در تعهدات حقوقی و قراردادی» به دلیل کسب امتیاز کمتر از ۰.۷ و عدم دستیابی به اجماع لازم جهت اثرگذاری بالا، از مدل حذف شدند که تحلیل چرایی آن در بخش پایانی ارائه شده است. در نهایت، مدل مفهومی شامل ۵۲ عامل توانمندساز در قالب ۱۱ مؤلفه مورد تأیید نهایی قرار گرفت و به عنوان ورودی مرحله تحلیل عاملی تأییدی مورد استفاده واقع شد.

۴.۳ تحلیل عاملی تأییدی

به منظور بررسی و تأیید ساختار ابعاد، مؤلفه‌ها و عوامل توانمندساز هوش مصنوعی، از مدل‌سازی معادلات ساختاری با رویکرد حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) استفاده شد. این پژوهش با تکیه بر چارچوب TOE، توانمندسازهای هوش مصنوعی را در قالب یک مدل سلسله‌مراتبی چندسطحی شامل ابعاد، مؤلفه‌ها و عوامل مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این مرحله، ابتدا مدل اندازه‌گیری از طریق بررسی پایایی و روایی سازه‌ها ارزیابی شد و سپس ساختار سلسله‌مراتبی مدل با استفاده از تحلیل عاملی تأییدی مورد آزمون قرار گرفت.

در این پژوهش، با توجه به محدودیت دسترسی به تمام خبرگان حوزه‌های هوش مصنوعی، لجستیک و عملیات در صنعت پتروشیمی، از روش نمونه‌گیری غیر احتمالی هدفمند و تکنیک گلوله‌برفی استفاده شد. در مجموع از میان ۱۵۰ پرسشنامه توزیع شده، داده‌های حاصل از ۱۲۸ پرسشنامه معتبر وارد فرایند تحلیل نهایی گردید. اگرچه ممکن است این حجم نمونه در مقایسه با تعداد بالای عوامل توانمندساز نسبتاً محدود به نظر برسد، اما انتخاب رویکرد حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM)، به دلیل انعطاف‌پذیری در برابر داده‌های غیر نرمال و برخورداری از توان آماری بالا جهت پردازش مدل‌ها با حجم نمونه متوسط، کفایت نمونه را برای تحلیل‌های ساختاری تضمین می‌کند. ویژگی‌های جمعیت‌شناختی پاسخ‌دهندگان به شرح جدول ۵ است.

جدول ۵. نتایج ویژگی‌های جمعیت‌شناختی پاسخ‌دهندگان

جنسیت		مدرک تحصیلی			سن			سابقه کاری		
مرد	زن	کارشناسی ارشد	کارشناسی	دکتری و بالاتر	کمتر از ۳۰	بین ۳۰ تا ۴۰	بیش از ۴۰	کمتر از ۵ سال	بین ۶ تا ۱۰ سال	بیش از ۱۰ سال
۹۹	۲۹	۲۷	۸۷	۱۴	۱۲	۷۳	۴۳	۲۷	۴۷	۵۴
۷۷٪	۲۳٪	۲۱٪	۶۷٪	۱۱٪	۹٪	۵۷٪	۳۴٪	۲۱٪	۳۷٪	۴۲٪

تحلیل توصیفی متغیرهای پژوهش

مطابق با جدول ۶ نتایج آمار توصیفی نشان می‌دهد که وضعیت کلی توانمندسازهای هوش مصنوعی در صنعت پتروشیمی در سطحی کمتر از حد متوسط قرار دارد؛ به‌طوری که میانگین تمامی مؤلفه‌ها کمتر از نقطه میانی طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت (۳) است. این یافته بیانگر آن است که سازمان‌های مورد مطالعه از نظر زیرساخت‌ها، قابلیت‌ها و الزامات موردنیاز برای توسعه و بهره‌گیری از هوش مصنوعی، هنوز به سطح مطلوبی از آمادگی و بلوغ نرسیده‌اند. در بعد فناوری، مؤلفه‌های «امنیت و حفاظت سایبری» (۲.۹۵) و «فناوری‌های پایه و همسو با هوش مصنوعی» (۲.۹۰) بالاترین میانگین را به خود اختصاص داده‌اند، در حالی که «حاکمیت هوش مصنوعی» با میانگین ۲.۶۰ ضعیف‌ترین وضعیت را در این بعد نشان می‌دهد. این یافته بیانگر آن است که اگرچه زیرساخت‌های فناورانه اولیه تا حدودی فراهم شده‌اند، اما سازوکارهای راهبری و مدیریت هوش مصنوعی هنوز از بلوغ کافی برخوردار نیستند. در بعد سازمانی، میانگین مؤلفه‌ها بین ۲.۵۵ تا ۲.۸۰ قرار دارد. «جریان ارتباطی و بازطراحی فرایندها» (۲.۸۰) و «سرمایه انسانی و مدیریت استعداد» (۲.۷۵) نسبت به سایر مؤلفه‌ها وضعیت مطلوب‌تری دارند، در حالی که «منابع مالی و سرمایه‌گذاری» با میانگین ۲.۵۵ پایین‌ترین مقدار را به خود اختصاص داده است. این موضوع نشان می‌دهد که محدودیت منابع مالی همچنان یکی از مهم‌ترین موانع توسعه و استقرار راهکارهای مبتنی بر هوش مصنوعی در صنعت پتروشیمی محسوب می‌شود. در بعد محیطی نیز مؤلفه «مسئولیت‌پذیری اجتماعی و پایداری» با میانگین ۲.۸۵ بالاترین مقدار را داشته، در حالی که «محیط نهادی و مقرراتی» با میانگین ۲.۵۰ پایین‌ترین سطح را نشان می‌دهد. این یافته حاکی از آن است که اگرچه توجه به الزامات پایداری در حال افزایش است، اما بسترهای نهادی، مقرراتی و حمایتی لازم برای توسعه هوش مصنوعی هنوز به‌طور کامل فراهم نشده‌اند. همچنین مقادیر چولگی و کشیدگی تمامی متغیرها در بازه قابل قبول قرار دارند که بیانگر عدم وجود انحراف شدید در توزیع داده‌ها است.

جدول ۶. شاخص‌های توصیفی برای متغیرهای تحقیق و شاخص‌های نرمال بودن توزیع داده‌ها

بعد	مؤلفه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
فناوری	زیرساخت، مدیریت و آمادگی داده برای هوش مصنوعی	۲.۸۵	۰.۸۸	۰.۴۲	۰.۳۱-
	حاکمیت هوش مصنوعی	۲.۶	۰.۹۱	۰.۵۸	۰.۲۲-

بعد	مولفه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
	امنیت و حفاظت سایبری	۲.۹۵	۰.۸۳	۰.۳۷	۰.۴-
	فناوری‌های پایه/ همسو با هوش مصنوعی	۲.۹	۰.۸۶	۰.۴۱	۰.۲۸-
سازمان	منابع مالی و سرمایه‌گذاری	۲.۵۵	۰.۹۴	۰.۶۳	۰.۱۵-
	راهبرد، ساختار و فرهنگ سازمانی	۲.۷	۰.۸۹	۰.۵۲	۰.۲۶-
	سرمایه انسانی و مدیریت استعداد	۲.۷۵	۰.۸۷	۰.۴۹	۰.۳-
	جریان ارتباطی و بازطراحی فرایندها	۲.۸	۰.۸۴	۰.۴۴	۰.۳۵-
	محیط نهادی و مقرراتی	۲.۵	۰.۹۶	۰.۷۱	۰.۱-
محیط	اکوسیستم فناوری و بازار	۲.۶۵	۰.۹	۰.۵۵	۰.۲-
	مسئولیت‌پذیری اجتماعی و پایداری	۲.۸۵	۰.۸۲	۰.۳۸	۰.۳۶-

مشخصه‌سازی مدل سلسله‌مراتبی و رویکرد دوعاملی مجزا

در این پژوهش، سازه اصلی «توانمندسازهای هوش مصنوعی» به صورت یک مدل اجزای سلسله‌مراتبی^۱ و در قالب یک متغیر مکنون مرتبه سوم چندبعدی پیکربندی شده است. به منظور تعیین نوع مدل اندازه‌گیری و بر اساس تصمیم‌گیری نظری پیرامون ماهیت متغیرها، از یک رویکرد تلفیقی بهره گرفته شد. با ابتناء بر ادبیات نظری، سازه‌های مرتبه اول (مولفه‌های یازده‌گانه خرد نظیر حاکمیت هوش مصنوعی، امنیت سایبری و...) به عنوان سازه‌های انعکاسی مشخصه‌سازی شدند، زیرا گویه‌های سنجش هر مولفه، بازتابی همگون از یک مفهوم واحد بوده و با یکدیگر همبستگی درونی دارند. در مقابل، روابط میان سازه‌های مرتبه اول با ابعاد مرتبه دوم (فناوری، سازمان، محیط) و همچنین روابط این سه بعد با سازه کلان مرتبه سوم (توانمندسازهای هوش مصنوعی) به صورت تکوینی^۲ تعریف شدند. دلیل این امر آن است که این ابعاد، علل بوجود آورنده سازه کلان بوده، قلمروهای مفهومی کاملاً متمایزی را پوشش می‌دهند و حذف هر یک منجر به نقص در تعریف نظری متغیر وابسته می‌گردد. بر این اساس، مدل مفهومی پژوهش حاضر یک مدل سلسله‌مراتبی انعکاسی-تکوینی-تکوینی است. با توجه به پیچیدگی برآورد مدل‌های بازتابی-تشکیلی در نرم‌افزار اسمارت پی ال اس، در این پژوهش از الگوریتم نوین رویکرد دوعاملی مجزا^۳ بهره‌برداری گردید. در مرحله نخست این الگوریتم، مدل اندازه‌گیری تنها با در نظر گرفتن

^۱ Hierarchical Component Model - HCM

^۲ Formative

^۳ Disjoint Two-Stage Approach



شکل ۳. خروجی مدل تحلیل عاملی برای توانمندسازهای هوش مصنوعی



مرحله اول: ارزیابی مدل اندازه‌گیری انعکاسی (مرتبه اول)

در گام نخست، کیفیت مدل اندازه‌گیری برای ۱۱ سازه انعکاسی مرتبه اول بر اساس دستورالعمل‌های Hair و همکاران (۲۰۲۲) از طریق بررسی بارهای عاملی، همسانی درونی (پایایی ترکیبی)، روایی همگرا و روایی واگرا مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به شکل ۳ برای سنجش پایایی شاخص‌ها، بارهای عاملی بیرونی تمامی گویه‌ها بررسی شد. مقادیر

بارهای عاملی در محدوده ۰.۷۰ تا ۰.۹۰ قرار داشته و آماره تی استخراج شده از الگوریتم بوت استرپینگ با ۵۰۰۰ نمونه گیری مجدد، نشان دهنده معناداری تمامی بارها در سطح خطای ۰.۰۱ است. به منظور ارزیابی همسانی درونی (مطابق داده‌های جدول ۷)، علاوه بر شاخص سنتی آلفای کرونباخ، از شاخص مدرن‌تر و دقیق‌تر پایایی ترکیبی استفاده شد که برخلاف آلفای کرونباخ، فرض برابری وزن نشانگرها را در نظر نمی‌گیرد. مقادیر پایایی ترکیبی برای تمامی مؤلفه‌ها در بازه ۰.۸۹۴ تا ۰.۹۳۳ برآورد گردید که همگی به وضوح بالاتر از آستانه مطلوب ۰.۷۰ قرار داشته و پایایی استثنایی مدل را تایید می‌کنند. در ارزیابی روایی همگرا، از معیار میانگین واریانس استخراج شده (AVE) استفاده شد. مقادیر AVE برای تمامی متغیرها بین ۰.۶۳۷ تا ۰.۷۹۱ ثبت گردید. عبور قاطع این مقادیر از آستانه ۰.۵۰ نشان می‌دهد که متغیرهای مکنون پژوهش، به طور متوسط بیش از ۵۰ درصد از واریانس نشانگرهای خود را تبیین کرده‌اند که گواهی محکم بر اثبات روایی همگراست.

جدول ۷. بررسی اعتبار همگرای مدل

متغیر اصلی	بعد	مؤلفه	آلفای کرونباخ	پایایی ترکیبی	AVE
توانمندسازهای هوش مصنوعی	فناوری	زیرساخت، مدیریت و آمادگی داده برای هوش مصنوعی	۰.۹۰۱	۰.۹۲۵	۰.۶۷۵
		حاکمیت هوش مصنوعی	۰.۸۹۲	۰.۹۲۵	۰.۷۵۵
		امنیت و حفاظت سایبری	۰.۹۰۲	۰.۹۲۷	۰.۷۱۹
		فناوری‌های پایه / همسو با هوش مصنوعی	۰.۹۱۶	۰.۹۳۳	۰.۶۶۷
		فناوری (بعد)	۰.۹۵۵	۰.۹۵۹	۰.۶۶۶
	سازمان	منابع مالی و سرمایه‌گذاری	۰.۸۶۸	۰.۹۱۹	۰.۷۹۱
		راهبرد، ساختار و فرهنگ سازمانی	۰.۸۹۳	۰.۹۱۹	۰.۶۵۵
		سرمایه انسانی و مدیریت استعداد	۰.۸۵۶	۰.۸۹۷	۰.۶۳۷
		جریان ارتباطی و بازطراحی فرایندها	۰.۸۵۸	۰.۹۰۵	۰.۷۰۴
		سازمان (بعد)	۰.۹۳۴	۰.۹۴۱	۰.۵۷۵
	محیط	محیط نهادی و مقرراتی	۰.۸۶۴	۰.۹۱۷	۰.۷۸۶
		اکوسیستم فناوری و بازار	۰.۸۷۴	۰.۹۰۹	۰.۶۶۷
		مسئولیت‌پذیری اجتماعی و پایداری	۰.۸۴۳	۰.۸۹۴	۰.۶۷۹
		محیط (بعد)	۰.۹۰۴	۰.۹۲	۰.۵۶۶
		توانمندسازهای هوش مصنوعی (کل متغیر)	۰.۹۷۵	۰.۹۷۶	۰.۶۳۳

روایی واگرا نشان‌دهنده میزان استقلال مفهومی و تجربی یک سازه از سایر سازه‌های مدل است. در این پژوهش، علاوه بر کاربرد ماتریس سنتی فورنل و لارکر^۱ از رویکرد پیشرفته و قدرتمند «نسبت همبستگی یگانه-دوگانه» یا شاخص HTMT^۲ بهره گرفته شد. مطالعات شبیه‌سازی اخیر نشان داده است که معیار فورنل-لارکر همواره قادر به تشخیص نقص در روایی افتراقی نیست و شاخص HTMT دقت بسیار بالاتری را ارائه می‌دهد. بررسی ماتریس فورنل-لارکر (مندرج در جدول ۸) تایید کرد که جذر مقادیر AVE برای تمامی سازه‌ها (عناصر روی قطر اصلی) از تمامی همبستگی‌های متقابل آن‌ها (عناصر خارج از قطر) به طور معناداری بزرگتر است. مهم‌تر از آن، تحلیل خروجی‌های ماتریس HTMT (طبق جدول شماره ۹) نشان داد که بالاترین مقدار نسبت HTMT در میان جفت‌سازه‌های مدل به مراتب کمتر از آستانه محافظه‌کارانه ۰.۸۵ قرار دارد. قرارگیری کامل مقادیر HTMT در حاشیه امن زیر ۰.۸۵، با قطعیت آماری ثابت می‌کند که متغیرهای مرتبه اول در مدل اندازه‌گیری انعکاسی دارای همپوشانی مخرب نیستند و هویت‌های کاملاً متمایزی را در محیط پژوهش اندازه‌گیری می‌نمایند.

جدول ۸. ماتریس فورنل و لارکر

متغیرهای پنهان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
امنیت و حفاظت سایبری	۰.۸۴۸										
اکوسیستم فناوری و بازار	۰.۸۱۷	۰.۵۹۹									
جریان ارتباطی و بازطراحی فرایندها	۰.۵۰۱	۰.۵۷۱	۰.۸۳۹								
حاکمیت هوش مصنوعی	۰.۶۱۱	۰.۶۲۲	۰.۵۸۹	۰.۸۶۹							
راهبرد، ساختار و فرهنگ سازمانی	۰.۶۳	۰.۶۲۴	۰.۶۴۴	۰.۵۴۶	۰.۸۰۹						
زیرساخت، مدیریت و آمادگی داده برای هوش مصنوعی	۰.۶۳۳	۰.۶۶۶	۰.۵۹۳	۰.۶۷۴	۰.۶۷۴	۰.۸۲۲					
سرمایه انسانی و مدیریت استعداد	۰.۶۳۸	۰.۵۹۴	۰.۵۷	۰.۶۸۶	۰.۶۱۸	۰.۶۱۳	۰.۷۹۸				
فناوری‌های پایه/همسو با هوش مصنوعی	۰.۶۳۲	۰.۶۱۷	۰.۵۹۵	۰.۶۵۵	۰.۶۵۶	۰.۶۹	۰.۵۹۹	۰.۸۱۷			
محیط نهادی و مقرراتی	۰.۵۱۵	۰.۵۸۱	۰.۵۲۴	۰.۵۹	۰.۵۷	۰.۶۶۹	۰.۶۰۱	۰.۶۲۶	۰.۸۸۶		

^۱ Fornell-Larcker Criterion^۲ Heterotrait-Monotrait Ratio

متغیرهای پنهان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
مسئولیت پذیری اجتماعی و پایداری	۰.۵۶۲	۰.۵۳۱	۰.۴۸۸	۰.۵۹۶	۰.۴۷	۰.۵۹۸	۰.۵	۰.۵۸۴	۰.۵۲۵	۰.۸۲۴	
منابع مالی و سرمایه گذاری	۰.۵۲۸	۰.۶۱۱	۰.۵۰۲	۰.۵۵۴	۰.۵۶۷	۰.۶۳۱	۰.۵۵۱	۰.۶۷۲	۰.۴۸۲	۰.۴۲۶	۰.۸۹

جدول ۹. ماتریس HTMT

متغیرهای پنهان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
امنیت و حفاظت سایبری											
اکوسیستم فناوری و بازار	۰.۶۷۳										
جریان ارتباطی و بازطراحی فرایندها	۰.۵۶۸	۰.۶۵۷									
حاکمیت هوش مصنوعی	۰.۶۷۷	۰.۷۰۳	۰.۶۶۷								
راهبرد، ساختار و فرهنگ سازمانی	۰.۶۹۸	۰.۷۰۱	۰.۷۳۴	۰.۶۰۶							
زیرساخت، مدیریت و آمادگی داده برای هوش مصنوعی	۰.۶۹	۰.۷۴۸	۰.۶۷۳	۰.۷۴۶	۰.۷۴۱						
سرمایه انسانی و مدیریت استعداد	۰.۷۲۱	۰.۶۸۷	۰.۶۵۵	۰.۷۸۳	۰.۷۰۱	۰.۶۸۸					
فناوری های پایه/ همسو با هوش مصنوعی	۰.۶۹۲	۰.۶۸۵	۰.۶۷۲	۰.۷۲۴	۰.۷۲۲	۰.۷۵۲	۰.۶۶۵				
محیط نهادی و مقرراتی	۰.۵۷۹	۰.۶۶۴	۰.۶۰۵	۰.۶۷۱	۰.۶۴۴	۰.۷۵۱	۰.۶۹۱	۰.۷۰۳			
مسئولیت پذیری اجتماعی و پایداری	۰.۶۳۸	۰.۶۰۳	۰.۵۶۸	۰.۶۷۴	۰.۵۳۳	۰.۶۶۹	۰.۵۷۷	۰.۶۶	۰.۶۰۶		
منابع مالی و سرمایه گذاری	۰.۵۹۴	۰.۷۰۴	۰.۵۸۲	۰.۶۲۹	۰.۶۴۱	۰.۷۱۵	۰.۶۳۴	۰.۷۵۱	۰.۵۵۵	۰.۴۹۳	

مرحله دوم: ارزیابی مدل اندازه گیری تکوینی سازه های مرتبه بالاتر

پس از تایید کامل مدل های انعکاسی، در مرحله دوم الگوریتم دو عاملی مجزا، مدل تکوینی برای سازه های مرتبه دوم و سوم ارزیابی گردید. بر اساس استانداردهای گزارش دهی PLS-SEM، ارزیابی سازه های تکوینی از دو طریق کنترل هم خطی و سنجش اهمیت وزن ها صورت می پذیرد. بررسی عدم هم خطی چند گانه^۱ نشان می دهد که با وجود همبستگی بسیار بالا میان نشانگرهای شکل دهنده در مدل های تکوینی یک چالش جدی محسوب شده و

¹ Collinearity Assessment

موجب ناپایداری برآوردها و تورم خطای معیار می‌گردد. برای ارزیابی این شاخص، فاکتور تورم واریانس (VIF) برای تمامی ابعاد مدل ارزیابی شد. (مطابق جدول شماره ۱۰) خروجی‌های نرم‌افزار نشان داد که مقادیر VIF برای تمامی سازه‌های تکوینی مرتبه اول (شکل‌دهنده فناوری، سازمان و محیط) و سازه‌های مرتبه دوم (شکل‌دهنده توانمندسازهای هوش مصنوعی) به طور قابل توجهی پایین‌تر از آستانه سخت گیرانه ۴ (و آستانه مجاز ۵) قرار دارند. این نتیجه مطلوب تایید می‌کند که هیچ‌گونه مشکل هم‌خطی بحرانی میان مؤلفه‌های مدل وجود نداشته و هر یک از ابعاد، بخش منحصربه‌فرد و مستقلی از واریانس سازه کلان را تبیین می‌نمایند.

جدول ۱۰. ساختار تکوینی مدل

سازه‌های مرتبه دوم	وزن ساختاری سطح دوم	VIF	سازه‌های مرتبه اول (ابعاد خرد)	وزن بیرونی سطح اول	VIF
فناوری	۰.۴۷۹	۳.۹۲۳	حاکمیت هوش مصنوعی	۰.۲۲۱	۲.۰۰۲
			زیرساخت، مدیریت و آمادگی داده	۰.۳۱۵	۲.۲۰۹
			امنیت و حفاظت سایبری	۰.۲۵۹	۲.۴۳۵
			فناوری‌های پایه / همسو با هوش مصنوعی	۰.۳۶۵	۲.۳۵
سازمان	۰.۳۴۶	۳.۱۷۱	راهبرد، ساختار و فرهنگ سازمانی	۰.۴۰۶	۱.۸۹۹
			سرمایه انسانی و مدیریت استعداد	۰.۳۱۳	۱.۸۹۵
			جریان ارتباطی و بازطراحی فرآیندها	۰.۲۶۵	۲.۱۸
			منابع مالی و سرمایه‌گذاری	۰.۲۱۴	۱.۶۶۳
محیط	۰.۲۳۱	۳.۶۴۱	محیط نهادی و مقرراتی	۰.۳۲۸	۱.۶۸۹
			اکوسیستم فناوری و بازار	۰.۵۰۱	۱.۶۷۴
			مسئولیت‌پذیری اجتماعی و پایداری	۰.۳۶۴	۱.۵۴۶

گام نهایی در اعتبارسنجی مدل تکوینی، بررسی اندازه و معناداری آماری وزن‌های بیرونی است که سهم و اهمیت نسبی هر بعد را در تکوین سازه بالاتر نشان می‌دهد. تمامی آماره‌های تی در این بخش از طریق رویه بوت‌استرپینگ با ۵۰۰۰ نمونه فرعی احصاء گردید. در سطح دوم، بررسی ساختار درونی بعد «فناوری» نمایانگر آن است که مؤلفه «فناوری‌های

پایه و همسو با هوش مصنوعی» با تخصیص بیشترین وزن بیرونی و پس از آن «زیرساخت، مدیریت و آمادگی داده» قدرتمندترین ارکان سازنده بازوی فناوری هستند. این یافته تجربی تاکید می کند که هوش مصنوعی در خلأ توسعه نمی یابد و نیازمند بلوغ همزمان در مدیریت داده و رایانش ابری است. در تکوین بعد «سازمان»، مؤلفه «راهبرد، ساختار و فرهنگ سازمانی» با وزن غالب ۰.۴۰۶ نقش محوری و کانونی را ایفا می کند. این وزن بسیار بالا نشان دهنده آن است که پیش نیاز حیاتی تحول دیجیتال پیش از آنکه دغدغه ای مالی (۰.۲۱۴) باشد، مستلزم دگرگونی در فرهنگ سازمانی و همسویی استراتژیک است. در شکل گیری بعد «محیط»، «اکوسیستم فناوری و بازار» با اختصاص قوی ترین وزن در میان تمامی نشانگرها (۰.۵۰۱)، نشان می دهد که پویایی های رقابتی شبکه شرکا و فشار همتایان در بازار، اصلی ترین پیشران محیطی در ترغیب سازمان ها به پذیرش هوش مصنوعی است.

در نهایت، تحلیل وزن های تکوینی در مرتبه سوم نشان داد که متغیر کلان «توانمندسازهای هوش مصنوعی» بیش از هر چیز تحت تسلط بعد فناوری (۰.۴۸۴) شکل می گیرد. پس از آن، بعد «سازمان» با وزنی معادل ۰.۳۴۶ و بعد «محیط» با وزن ۰.۲۳۱ در جایگاه های بعدی قرار گرفتند (تمامی روابط در سطح ۰.۰۱ معنادار ارزیابی شدند). این شواهد آماری اثبات می کند که اگرچه عوامل سازمانی بستر ساز بوده و محیط نقش کاتالیزور را ایفا می کند، اما جوهره اصلی و گرانیگاه توانمندی در حوزه هوش مصنوعی در ذات معماری فناورانه سازمان نهفته است.

۵. بحث و نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف شناسایی، مدل سازی و تبیین ساختار توانمندسازهای هوش مصنوعی موثر بر عملکرد لجستیک پایدار پتروشیمی در بستر چارچوب نظری TOE و با بهره گیری از تکنیک حداقل مربعات جزئی در قالب یک سازه مرتبه سوم (انعکاسی-تکوینی-تکوینی) به انجام رسید. تحلیل نظام مند ۹۵ مقاله منتخب در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۵ منجر به استخراج ۵۷ عامل توانمندساز منحصر به فرد شد که در قالب ۳ بعد و ۱۱ مولفه دسته بندی گردید. همچنین به منظور اعتبارسنجی و بومی سازی توانمندسازهای شناسایی شده از روش دلفی فازی استفاده گردید که تعداد عوامل توانمندساز به ۵۲ کاهش یافت. در ادامه باید اشاره کرد که معماری چندلایه و اجرای الگوریتم دو عاملی مجزا امکان کالبدشکافی دقیق چالش ها و محرک های نهفته در مسیر بلوغ دیجیتال سازمان ها را فراهم آورد. تلفیق و تقاطع

نتایج حاصل از آمار توصیفی با خروجی‌های وزن‌های بیرونی استنباطی، پرده از یک ناهم‌ترازی ساختاری و عدم تقارن عمیق در مسیر پذیرش هوش مصنوعی برمی‌دارد که مستلزم بازطراحی تفکر مدیریت استراتژیک است.

نخست، با توجه به نظر خبرگان و نتایج دلفی فازی، باید اشاره کرد که حذف برخی عوامل توانمندساز به معنای بی‌اهمیت بودن مطلق آن‌ها نیست، بلکه بیشتر ناشی از اولویت پایین‌تر، هم‌پوشانی مفهومی یا عدم انطباق با سطح بلوغ فعلی صنعت پتروشیمی در حوزه هوش مصنوعی بوده است. برای مثال، «نگهداری پیشگیرانه هوشمند تجهیزات لجستیکی مبتنی بر هوش مصنوعی» اگرچه می‌تواند پیامدهایی همچون کاهش توقفات، افزایش ایمنی و کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی ایجاد کند، اما در تحلیل خبرگان به عنوان یک کاربرد و پیامد حاصل از استقرار هوش مصنوعی تلقی شد، نه یک عامل توانمندساز اولیه. همچنین، «مدل‌سازی سناریوهای اقتصادی و استراتژیک برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری فناوری» به دلیل پایین بودن سطح بلوغ دیجیتال و درگیری شرکت‌های پتروشیمی با الزامات و چالش‌های بنیادی‌تر پذیرش فناوری، از اولویت کمتری برخوردار ارزیابی شد. «شفافیت و اطمینان در تعهدات حقوقی و قراردادی» نیز به دلیل هم‌پوشانی با سایر عوامل موجود در مؤلفه محیط نهادی و مقرراتی حذف شد. در خصوص «پیچیدگی ادراک شده فناوری» نیز، با توجه به پذیرش عامل جامع‌تر «بلوغ دیجیتال و آمادگی فناورانه سازمان»، این عامل به دلیل پوشش مفهومی مشابه و هم‌پوشانی نظری حذف گردید. در نهایت، «استقرار استانداردهای ایمنی و ارگونومی هوش مصنوعی در محیط‌های عملیاتی» نیز به دلیل قرار گرفتن در سطحی تخصصی‌تر و کمتر اولویت‌دار نسبت به نیازهای اولیه سازمان‌ها در مسیر پذیرش هوش مصنوعی، از دیدگاه خبرگان وزن کافی برای باقی ماندن در مدل نهایی کسب نکرد.

دومین و عمیق‌ترین استنتاج این مطالعه، تقابل معنادار میان «اهمیت حیاتی اکوسیستم» و «توسعه‌نیافتگی نهادی» است. در بخش مدل‌سازی استنباطی مشاهده گردید که بعد محیطی -و به طور خاص مؤلفه اکوسیستم فناوری و بازار- نقش یک پیشران غیرقابل انکار را در تکوین توانمندسازها بازی می‌کند. با این حال، نگاهی به آمار توصیفی نشان داد که ضعیف‌ترین، شکننده‌ترین و بحرانی‌ترین مؤلفه در سرتاسر مشاهدات، «محیط نهادی و مقرراتی» با میانگین نازل ۲.۵۰ و توزیع شدیداً نامتقارن به سمت نمرات ضعیف بوده است.

این تناقض به روشنی گواه آن است که فقدان یک معماری رگولاتوری بالغ در سطح کلان کشور، نبود قوانین شفاف حریم خصوصی الگوریتمی و خلأ چتر حمایتی نهادی، مانند یک مانع بزرگ مانع از بهره‌مندی سازمان‌ها از پویایی‌های بازار شده است. تا زمانی که این ریسک سیستماتیک در سطح قانون‌گذاری مرتفع نگردد، تلاش‌های جزیره‌ای سازمان‌ها با سد شیشه‌ای روبه‌رو خواهد شد.

سومین محور تحلیلی کلیدی که از نتایج استخراج می‌شود، اصالت «زیرساخت بر روبنا» در تحول مبتنی بر هوش مصنوعی است. تحلیل تکوینی مرتبه سوم ثابت کرد که بعد فناوری با فاصله‌ای قابل تأمل، قوی‌ترین ستون شکل‌دهنده توانمندی هوش مصنوعی است و در درون آن، زیرساخت داده و فناوری‌های پایه حرف اول را می‌زنند. این یافته آماری حامل یک پیام صریح مدیریتی است؛ هوش مصنوعی یک ماژول نرم‌افزاری وصله‌پذیر نیست که بتوان آن را به صورت ناگهانی خریداری و مستقر نمود. سازمانی که بلوغ لازم را در مدیریت پایگاه‌های داده رابطه‌ای، اینترنت اشیا و یکپارچگی سیستم‌های اطلاعاتی اولیه تجربه نکرده باشد، نمی‌تواند به طور اثربخش وارد عصر هوش مصنوعی گردد. این ادعا توسط آمار توصیفی نیز تایید می‌شود، جایی که مؤلفه حاکمیت هوش مصنوعی (میانگین ۲.۶۰) حاکی از ضعف مفرط سازمان‌ها در تدوین خط‌مشی‌های مدیریت داده پیش از به‌کارگیری الگوریتم‌ها است. همچنین یافته‌های پژوهش نشان داد که توسعه زیرساخت‌های فناورانه به تنهایی برای دستیابی به مزایای هوش مصنوعی کافی نیست. پایین بودن وضعیت حاکمیت هوش مصنوعی در سازمان‌های مورد مطالعه بیانگر آن است که بسیاری از شرکت‌ها هنوز فاقد سازوکارهای لازم برای مدیریت چرخه عمر مدل‌ها، نظارت بر عملکرد الگوریتم‌ها و تضمین شفافیت و پاسخگویی در کاربردهای هوش مصنوعی هستند. از این‌رو، توسعه زیرساخت‌های داده‌ای و فناورانه باید همزمان با استقرار سازوکارهای حاکمیتی مناسب دنبال شود.

چهارمین استنتاج راهبردی به «پارادوکس اراده و ابزار» در بعد سازمانی بازمی‌گردد. در تحلیل‌های مدل‌سازی اثبات شد که «راهبرد، ساختار و فرهنگ سازمانی» سنگ‌بنای اصلی تحول درون‌سازمانی است. در موازات این امر، آمار توصیفی نشان‌دهنده میانگین‌های نسبتاً امیدوارکننده‌ای برای اصلاح جریان‌های ارتباطی و آموزش پرسنل بود (۲.۸۰ و ۲.۷۵). اما در کمال ناباوری، تخصیص «منابع مالی و سرمایه‌گذاری» با میانگین ۲.۵۵

در پایین‌ترین سطح سازمان قرار داشت. این الگو نشان می‌دهد که مدیران عالی، اهمیت راهبردی و فرهنگی گذار به هوش مصنوعی را تا حدودی پذیرفته‌اند، اما در زمان بودجه‌ریزی جسورانه و حمایت سرمایه‌ای از پروژه‌های پرریسک نوآورانه، عقب‌نشینی می‌کنند. این فقر در سرمایه‌گذاری، اراده استراتژیک را در حد یک شعار سازمانی متوقف خواهد کرد.

در نگاهی کلان و راهبردی، استنتاج نهایی این پژوهش آن است که موفقیت در گذار به هوش مصنوعی مستلزم عبور از نگاه تقلیل‌گرایانه (صرفاً متمرکز بر فناوری اطلاعات) و اتخاذ یک «استراتژی همگام‌سازی سه‌وجهی» است. توسعه ابزارهای فنی اگر با بازطراحی بنیادین فرآیندها و تغییر فرهنگ سازمانی همگام نشود، به یک سیستم نمایشی تبدیل خواهد شد. نقشه راه پیاده‌سازی هوش مصنوعی باید بر مبنای توزیع هوشمندانه منابع در هر سه راس مثلث فناوری (تأکید بر پاک‌سازی و یکپارچگی داده‌ها)، سازمان (تزریق جسورانه سرمایه در کنار آموزش مداوم) و محیط (مطالبه‌گری جمعی برای رگولاتوری شفاف و توسعه مسئولیت‌پذیری اجتماعی) پی‌ریزی گردد. تنها با همگرایی و ایجاد توازن در این اکوسیستم سه‌لایه است که مؤلفه‌های شناسایی‌شده در این پژوهش می‌توانند از توانمندسازهای بالقوه روی کاغذ، به موتورهای خلق مزیت رقابتی پایدار در اتمسفر پرتلاش انقلاب صنعتی چهارم مبدل گردند.

تعارض منافع

در پژوهش حاضر تعارض منافی وجود ندارد.

Seyed Mojtaba Nabavifard		https://orcid.org/0009-0004-5892-4393
Mohammad Taghi Taghavi Fard		https://orcid.org/0000-0002-4212-2079
Maghsoud Amiri		https://orcid.org/0000-0002-0650-2584
Abolfazl Kazazi		https://orcid.org/0000-0003-1329-7045

منابع

- ۱ سنگبر، م.، صافی، م.ر.، آذر، ع.، و ربیع، م. (۱۴۰۱). شناسایی و اولویت‌بندی توانمندسازهای مدیریت زنجیره تأمین پایدار در صنعت پتروشیمی با رویکرد ترکیبی «فرا ترکیب» و «نظریه گراف‌ها و رویکرد ماتریسی». مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۰(۶۴)، ۳۴-۱
<https://doi.org/10.22054/jims.2022.39256.2254>
- ۲ سنگبر، محمدعلی، صافی، محمد رضا و آذر، عادل. (۱۳۹۸). کاربرد نگاشت شناختی فازی به منظور طراحی ساختار علی و تحلیل توانمندسازهای مدیریت زنجیره تأمین پایدار در صنعت پتروشیمی. پژوهش‌های مدیریت عمومی، شماره ۱۲(۴۳): ۵-۲۹.
[10.22111/jmr.2019.4741](https://doi.org/10.22111/jmr.2019.4741)
- ۳ محمودی، تیناسادات، رونقی، محمدحسین و امینی، علیرضا. (۱۴۰۳). تاثیر پذیرش هوش مصنوعی بر پایداری اجتماعی (مورد مطالعه: شرکت‌های دانش‌بنیان استان اصفهان). فصلنامه علمی پژوهشی توسعه کارآفرینی، ۱۴(۴)، ۱-۳۱.
[10.22059/jed.2024.381974.654410](https://doi.org/10.22059/jed.2024.381974.654410)
- ۴ رکن الدینی، سید علیرضا، عندلیب اردکانی، داود، زارع احمدآبادی، حبیب و حسینی بامکان، سید مجتبی. (۱۴۰۲). مدل‌سازی توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار با رویکرد دیمتل-فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی. چشم‌انداز مدیریت صنعتی ۱۳(۱)، ۱۴۱-۱۷۲.
[10.48308/jimp.13.1.141](https://doi.org/10.48308/jimp.13.1.141)

۵ روحانی. علی اصغر و محمدآبادی. رضوان. (۱۴۰۱). کاربرد هوش مصنوعی در زنجیره تامین نفت و گاز، نشریه فرایند نو، سال هفدهم، شماره ۷۹: ۷۳-۵۷.

[10.22034/farayandno.2023.1974530.1896](https://doi.org/10.22034/farayandno.2023.1974530.1896)

1. Ahmad, T., Zhang, D., Huang, C., Zhang, H., Dai, N., Song, Y., & Chen, H. (2021). Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities. *Journal of cleaner production*, 289, 125834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125834>
2. Akhtar, M. (2023). Industry 4.0 Technologies Impact on Supply Chain Sustainability, *intechOpen, Supply Chain - Recent Advances and New Perspectives in the Industry 4.0, Era: 1-18*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102978>
3. Alick, K., Dilda, V., Görner, S., Mori, L., Rebuffel, P., Reiter, S., & Samek, R. (2021). Succeeding in the AI supply-chain revolution. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/succeeding-in-the-ai-supply-chain-revolution> (accessed on 17 October 2024).
4. Alnahas, P. Yeboah, L. Flidel, A.Y. Abdin and K. Alhareth, "Expired medication: Societal, regulatory and ethical aspects of a wasted opportunity", *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 17, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030787>
5. Annosi, M. C., Brunetta, F., Bimbo, F., & Kostoula, M. (2021). Digitalization within food supply chains to prevent food waste. Drivers, barriers and collaboration practices. *Industrial Marketing Management*, 93, 208-220. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.01.005>
6. Bag, S., Wood, L. C., Xu, L., Dhamija, P., & Kayikci, Y. (2020). Big data analytics as an operational excellence approach to enhance sustainable supply chain performance. *Resources, conservation and recycling*, 153, 104559. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104559>
7. Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., & Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes—A literature review. *Journal of cleaner production*, 259, 120856. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120856>
8. Belhadi, A., Kamble, S., Fosso Wamba, S., & Queiroz, M. M. (2022). Building supply-chain resilience: an artificial intelligence-based technique and decision-making framework. *International journal of production research*, 60(14), 4487-4507. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1950935>

9. Chandak, S., & Kumar, N. (2020). Development of a framework to improve supply chain performance through e-business and sustainability enablers: An emerging economy perspective. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 31(5), 1045-1070. <https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2019-0150>
10. Chaudhary, G. (2023). Environmental sustainability: Can artificial intelligence be an enabler for SDGs?. *Nature Environment & Pollution Technology*, 22(3). <https://doi.org/10.46488/NEPT.2023.v22i03.001>
11. Dhamija, P., & Bag, S. (2020). Role of artificial intelligence in operations environment: a review and bibliometric analysis. *The TQM Journal*, 32(4), 869-896. <https://doi.org/10.1108/TQM-10-2019-0243>
12. Dora, M., Kumar, A., Mangla, S. K., Pant, A., & Kamal, M. M. (2022). Critical success factors influencing artificial intelligence adoption in food supply chains. *International Journal of Production Research*, 60(14), 4621-4640. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1959665>
13. Dubey, R., Gunasekaran, A., Childe, S. J., Bryde, D. J., Giannakis, M., Foropon, C., ... & Hazen, B. T. (2020). Big data analytics and artificial intelligence pathway to operational performance under the effects of entrepreneurial orientation and environmental dynamism: A study of manufacturing organisations. *International journal of production economics*, 226, 107599. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107599>
14. Dweekat, A. J., & Park, J. (2016). Internet of Things-enabled supply chain performance measurement model. In **2016 International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Application (ICIMSA)** (pp. 1–3). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIMSA.2016.7504014>
15. Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. **Journal of Cleaner Production*, 252*, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
16. Ghoreishi, M., & Happonen, A. (2020). Key enablers for deploying artificial intelligence for circular economy embracing sustainable product design: Three case studies. In **AIP Conference Proceedings** (Vol. 2233, No. 1, p. 050008). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0001339>
17. Gunasekaran, A., Papadopoulos, T., Dubey, R., Wamba, S. F., Childe, S. J., Hazen, B., & Akter, S. (2017). Big data and predictive analytics for supply chain and organizational performance. **Journal of Business Research*, 70*, 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.08.004>
18. Gupta, H., Kumar, S., Kusi-Sarpong, S., Jabbour, C. J. C., & Agyemang, M. (2021). Enablers to supply chain performance on the basis of digitization technologies. **Industrial Management & Data Systems*, 121*(9), 1915–1938. <https://doi.org/10.1108/IMDS-07-2020-0421>
19. Haidegger, T., Mai, V., Mörch, C. M., Boesl, D. O., Jacobs, A., Rao, R. B., Khamis, A., Lach, L., & Vanderborght, B. (2023). Robotics: Enabler

- and inhibitor of the Sustainable Development Goals. **Sustainable Production and Consumption*, 43*, 422–434. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.11.011>
20. Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., Sarstedt, M., Danks, N. P., & Ray, S. (2021). **Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) using R: A workbook**. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80519-7>
 21. Hangl, J., Behrens, V. J., & Krause, S. (2022). Barriers, drivers, and social considerations for AI adoption in supply chain management: A tertiary study. **Logistics*, 6*(3), 63. <https://doi.org/10.3390/logistics6030063>
 22. Hao, X., & Demir, E. (2025). Artificial intelligence in supply chain management: Enablers and constraints in pre-development, deployment, and post-development stages. **Production Planning & Control*, 36*(6), 748–770. <https://doi.org/10.1080/09537287.2024.2302482>
 23. Hirata, E., Sunio, V., Thompson, R. G., & Foliente, G. (2025). Toward greener logistics: Uncovering key enablers of the physical internet using AI-powered theme analysis. **Cleaner Logistics and Supply Chain*, 17*, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100263>
 24. Hsu, C. H., Cai, X. Q., Zhang, T. Y., & Ji, Y. L. (2024). Smart logistics facing Industry 5.0: Research on key enablers and strategic roadmap. **Sustainability*, 16*(21), 9183. <https://doi.org/10.3390/su16219183>
 25. Hsu, C. H., Li, M. G., Zhang, T. Y., Chang, A. Y., Shangguan, S. Z., & Liu, W. L. (2022). Deploying big data enablers to strengthen supply chain resilience to mitigate sustainable risks based on integrated HOQ-MCDM framework. **Mathematics*, 10*(8), 1233. <https://doi.org/10.3390/math10081233>
 26. Hussain, M., Alamri, A., Zhang, T., & Jamil, I. (2024). Application of artificial intelligence in the oil and gas industry. In **Engineering applications of artificial intelligence** (pp. 341–373). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50300-9_19
 27. Javadi, M., Raeisi, Z., Mehrabi Jorshary, K., Mazrooie, M., & Ebrahimisadrabadi, F. (2025). Identifying and prioritizing sustainable supply chain indicators in the petrochemical industry. **Journal of Economics, Finance and Accounting Studies*, 7*(3), 91–111. <https://doi.org/10.32996/jefas.2025.7.9>
 28. Joshi, S., & Sharma, M. (2022). Sustainable performance through digital supply chains in Industry 4.0 era: Amidst the pandemic experience. **Sustainability*, 14*(24), 16726. <https://doi.org/10.3390/su14241672>
 29. Khan, A. N. (2024). Artificial intelligence and sustainable performance: Role of organisational agility and environmental dynamism. **Technology Analysis & Strategic Management*, 37*(5), 568–583. <https://doi.org/10.1080/09537325.2023.2290171>

30. Koroteev, D., & Tekic, Z. (2021). Artificial intelligence in oil and gas upstream: Trends, challenges, and scenarios for the future. **Energy and AI*, 3*, 100041. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100041>
31. Kumar, R., Singh, R. K., & Dwivedi, Y. K. (2020). Application of Industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: Analysis of challenges. **Journal of Cleaner Production*, 275*, 124063. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124063>
32. Lamba, K., & Singh, S. P. (2018). Modeling big data enablers for operations and supply chain management. **The International Journal of Logistics Management*, 29*(2), 629–658. <https://doi.org/10.1108/IJLM-07-2017-0183>
33. Linstone, H. A., & Turoff, M. (Eds.). (2002). **The Delphi method: Techniques and applications**. Addison-Wesley Publishing Company, Advanced Book Program.
34. Merhi, M. I., & Harfouche, A. (2024). Enablers of artificial intelligence adoption and implementation in production systems. **International Journal of Production Research*, 62*(15), 5457–5471. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2167014>
35. Mukherjee, S., Nagariya, R., Mathiyazhagan, K., Baral, M. M., Pavithra, M. R., & Appolloni, A. (2024). Artificial intelligence-based reverse logistics for improving circular economy performance: A developing country perspective. **The International Journal of Logistics Management*, 35*(6), 1779–1806. <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2023-0102>
36. Nahr, J. G., Nozari, H., & Sadeghi, M. E. (2021). Green supply chain based on artificial intelligence of things (AIoT). **International Journal of Innovation in Management, Economics and Social Sciences*, 1*(2), 56–63.
37. Pandey, A. K., Pratap, S., Dwivedi, A., & Khan, S. A. (2025). Industry 4.0 and supply chain sustainability: Benchmarking enablers to build reliable supply chain. **Benchmarking: An International Journal*, 32*(2), 433–458. <https://doi.org/10.1108/BIJ-06-2023-0358>
38. Rad, F. F., Oghazi, P., Palmié, M., Chirumalla, K., Pashkevich, N., Patel, P. C., & Sattari, S. (2022). Industry 4.0 and supply chain performance: A systematic literature review of the benefits, challenges, and critical success factors of 11 core technologies. **Industrial Marketing Management*, 105*, 268–293. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2022.06.009>
39. Rajput, S. (2024). Analysis of Industry 4.0 technological enablers for sustainable supply chain transparency in a fuzzy environment. **Business Strategy and the Environment*, 33*(8), 8616–8636. <https://doi.org/10.1002/bse.3936>

40. Richey, R. G., Jr., Chowdhury, S., Davis-Sramek, B., Giannakis, M., & Dwivedi, Y. K. (2023). Artificial intelligence in logistics and supply chain management: A primer and roadmap for research. **Journal of Business Logistics*, 44*(4), 532–549. <https://doi.org/10.1111/jbl.12364>
41. Rodríguez, L., Giannakis, M., & Da Cunha, C. (2018, March). Investigating the enablers of big data analytics on sustainable supply chain. In **IPSERA**.
42. Sandelowski, M., Barroso, J., & Voils, C. I. (2007). Using qualitative metasummary to synthesize qualitative and quantitative descriptive findings. **Research in Nursing & Health*, 30*(1), 99–111. <https://doi.org/10.1002/nur.20176>
43. Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in Industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. **Journal of Industrial Engineering and Management*, 9*(3), 811–833. <https://doi.org/10.3926/jiem.1940>
44. Shahzadi, G., Jia, F., Chen, L., & John, A. (2024). AI adoption in supply chain management: A systematic literature review. **Journal of Manufacturing Technology Management*, 35*(6), 1125–1150. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2023-0431>
45. Sharma, A. J., & Rathore, B. (2024). Examine the enablers of generative artificial intelligence adoption in supply chain: A mixed method study. **Journal of Decision Systems**, 1–33. <https://doi.org/10.1080/12460125.2024.2410030>
46. Sindhvani, R., Hasteer, N., Behl, A., Chatterjee, C., & Hamzi, L. (2023). Analysis of sustainable supply chain and Industry 4.0 enablers: A step towards decarbonization of supply chains. **Annals of Operations Research*, 359*(1), 429–467. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05598-7>
47. Singer, A. C., Xu, Q., & Keller, V. D. J. (2019). Translating antibiotic prescribing into antibiotic resistance in the environment: A hazard characterisation case study. **PLOS ONE*, 14*(9), e0221568. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221568>
48. Sircar, A., Yadav, K., Rayavarapu, K., Bist, N., & Oza, H. (2021). Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry. **Petroleum Research*, 6*(4), 379–391. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2021.05.009>
49. Suzari, R. A., Abdul Rahman, N. A. A., Ahmi, A., & Waheed, M. (2024). Identifying the factors influencing AI adoption in supply chain management to resolve supply chain disruptions. **International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 14*(11), 210–231. <https://doi.org/10.6007/IJARBS/v14-i11/23468>

50. Tai, P. D., Duc, T. T. H., & Buddhakulsomsiri, J. (2022). Value of information sharing in supply chain under promotional competition. **International Transactions in Operational Research*, 29*(4), 2649–2681. <https://doi.org/10.1111/itor.12859>
51. Tat, R., & Heydari, J. (2021). Avoiding medicine wastes: Introducing a sustainable approach in the pharmaceutical supply chain. **Journal of Cleaner Production*, 320*, 128698. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128698>
52. Toorajipour, R., Sohrabpour, V., Nazarpour, A., Oghazi, P., & Fischl, M. (2021). Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review. **Journal of Business Research*, 122*, 502–517. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.009>
53. Wang, M., & Yang, Y. (2022). An empirical analysis of the supply chain flexibility using blockchain technology. **Frontiers in Psychology*, 13*, 1004007. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1004007>
54. Wang, Y. M., Wang, Y. S., & Yang, Y. F. (2010). Understanding the determinants of RFID adoption in the manufacturing industry. **Technological Forecasting and Social Change*, 77*(5), 803–815. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.03.006>
55. Woschank, M., Rauch, E., & Zsifkovits, H. (2020). A review of further directions for artificial intelligence, machine learning, and deep learning in smart logistics. **Sustainability*, 12*(9), 3760. <https://doi.org/10.3390/su12093760>
56. Wu, C. H., & Fang, W. C. (2011). Combining the fuzzy analytic hierarchy process and the fuzzy Delphi method for developing critical competences of electronic commerce professional managers. **Quality & Quantity*, 45*(4), 751–768. <https://doi.org/10.1007/s11135-010-9425-6>

References [In Persian]

57. Sangbar, M. A., Safi, M. R., Azar, A., & Rabiee, M. (2022). Identification and prioritization of enablers of sustainable supply chain management in the petrochemical industry using a combined meta-synthesis and graph theory and matrix approach. *Industrial Management Studies*, 20(64), 1–34. [In Persian]
58. Sangbar, M. A., Safi, M. R., & Azar, A. (2019). Application of fuzzy cognitive mapping to design a causal structure and analyze enablers of sustainable supply chain management in the petrochemical industry. *Public Management Research*, 12(43), 5–29. [In Persian]
59. Mahmoudi, T. S., Ronaghi, M. H., & Amini, A. (2024). The effect of artificial intelligence adoption on social sustainability: A case study of knowledge-based companies in Isfahan Province. *Entrepreneurship Development*, 14(4), 1–31. [In Persian]

60. Rokneddini, S. A., Andalib Ardakani, D., Zare Ahmadabadi, H., & Hosseini Bamakan, S. M. (2023). Modeling the enablers of Industry 4.0 in sustainable supply chain implementation using fuzzy DEMATEL-analytic network process. *Industrial Management Perspective*, 13(1), 141–172. [In Persian]
61. Rouhani, A. A., & Mohammadabadi, R. (2022). Investigating the application of artificial intelligence in the oil and gas supply chain. *Farayandno*, 17(79), 57–73. [In Persian]

آماده انتشار