



Homepage: <https://www.ietmjournals.com>

Futures Studies in the Automotive Industry with a Focus on Industry 4.0

Mehdi Ahmadi¹ , Majid Nili Ahmadabadi² ,

1. Master's Degree, Department of Industrial Management, University of Qom, Qom, Iran. Email: ahmadi.mahdi2000@gmail.com
2. Corresponding author, Associate Professor, Department of Management, University of Qom, Qom, Iran. Email: nili2536@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 25 March 2026
Revised 9 April 2026
Accepted 10 May 2026
Available online 1 June 2026

Keywords:

Driver, Scenario, Futures Studies, Industry 4.0, Automotive Industry, Fourth Industrial Revolution Technologies

ABSTRACT

Purpose: This research aims to explore the future of the automotive industry with a focus on transformations driven by Industry 4.0 and to identify plausible development trajectories for this sector in the future horizon. Considering the pivotal role of the automotive industry in the national economy alongside structural challenges and sanction pressures, this study seeks to address a fundamental question: What are the key drivers shaping the future of the automotive industry within the Industry 4.0 paradigm, and what plausible future scenarios emerge from their combinations?

Methodology: This study adopts a mixed-methods (qualitative-quantitative) approach grounded in a pragmatic philosophy. The statistical population comprised 10 senior managers and experts with extensive experience in digital technologies and the automotive industry, selected through non-probability purposive sampling. In the qualitative phase, 32 initial drivers influencing the industry's future were identified via a systematic literature review. In the quantitative phase, these drivers were screened using a single-stage Fuzzy Delphi Method (FDM), retaining those with a defuzzified value exceeding 0.7 for final analysis. Content validity was confirmed using Lawshe's Content Validity Ratio (CVR). Subsequently, the prioritized drivers were ranked using the Complex Proportional Assessment (COPRAS) multi-criteria decision-making method based on three criteria: "degree of importance," "degree of certainty," and "experts' level of expertise." Finally, Panda's post-modern scenario-planning framework was employed to formulate four distinct future scenarios based on the matrix of the top two key drivers. **Findings:** The Fuzzy Delphi results revealed that out of 32 initial drivers, 10 key drivers crossed the threshold: IT infrastructure, automotive industry competitiveness, supply chain integration, smart manufacturing maturity, emerging tech startups, innovation policy, supply chain internationalization, process automation, digitalization policy, and data-driven decision-making. The COPRAS results indicated that "Automotive supply chain internationalization" (relative significance: 100%) and "Data-driven decision-making" (relative significance: 92.46%) hold the highest priority and impact on the industry's future. Based on these two core drivers, four future scenarios were constructed:

Smart Automotive Industry (Ideal Scenario): Characterized by an internationalized supply chain and data-driven decision-making.

Boulevard Development (Transitional Scenario): Characterized by international integration alongside persistent traditional decision-making structures.

Resilient Automotive Industry (Transitional Scenario): Marked by external constraints counterbalanced by endogenous innovation and data-driven initiatives.



Laggard Automotive Industry (Catastrophic Scenario): Plagued by supply chain disconnection and entrenched, non-data-driven practices.

Results & Discussion: The findings demonstrate that the trajectory of the automotive industry is heavily contingent upon two critical factors: integration into global supply chains and the transition from intuitive to data-driven governance. Realizing the desirable scenario (Smart Automotive Industry) requires fulfilling core prerequisites: expanding data infrastructure, increasing supply chain transparency, strengthening international partnerships, and adopting open innovation frameworks with startups and academia. Conversely, the undesirable scenario (Laggard Automotive Industry) highlights that maintaining the status quo will drastically widen the gap with global Industry 4.0 standards.

Methodologically, this study introduces an integrated foresight framework (FDM–COPRAS–Panda) enabling structured, multi-dimensional strategic analysis. Focus on the nexus between international supply chains and data-driven management provides actionable inputs for macro-level industrial policy. Practical recommendations are formulated across organizational (data-driven culture, workforce upskilling), infrastructural (IT capital expenditure, system integration), and policy levels (data governance, institutional reform). Ultimately, a successful transition to a smart automotive ecosystem depends less on technology itself than on institutional maturity, strategic agility, and data-driven decision-making at the macro-industrial scale.

Cite this article: Ahmadi, M., & Nili Ahmadabadi, M. (2025). Futures studies in the automotive industry with a focus on Industry 4.0. *Information Economics and Innovative Management*, 1 (1), 1-28



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights.

آینده‌پژوهی در صنعت خودرو با تمرکز بر صنعت نسل چهارم

مهدی احمدی^۱، مجید نیلی احمدآبادی^۲✉

۱. کارشناسی ارشد، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: ahmadi.mahdi2000@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مدیریت، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: nili2536@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی،

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

کلیدواژه‌ها:

پیشران، سناریو، آینده‌پژوهی، صنعت نسل چهارم، صنعت خودرو، فناوری‌های نسل چهارم.

هدف: این پژوهش با هدف آینده‌پژوهی صنعت خودرو با تمرکز بر تحولات ناشی از صنعت نسل چهارم و شناسایی مسیرهای محتمل توسعه این صنعت در افق آینده انجام شده است. با توجه به نقش محوری صنعت خودرو در اقتصاد کشور و چالش‌های ساختاری و تحریمی پیش‌روی آن، این مطالعه در پی پاسخ به این سؤال اساسی است که پیشران‌های کلیدی مؤثر بر آینده صنعت خودرو در بستر صنعت ۴.۰ کدامند و بر اساس ترکیب آن‌ها، چه سناریوهایی برای آینده این صنعت قابل تصور است؟

روش‌شناسی: پژوهش حاضر از رویکرد آمیخته (کیفی-کمی) و فلسفه پراگماتیستی بهره گرفته است. جامعه آماری شامل ۱۰ نفر از خبرگان و مدیران ارشد دارای تجربه در حوزه فناوری‌های دیجیتال و صنعت خودرو بود که به روش قضاوتی و غیرتصادفی انتخاب شدند. در بخش کیفی، ۳۲ پیشران اولیه مؤثر بر آینده صنعت خودرو از طریق مرور نظام‌مند ادبیات معتبر استخراج گردید. در بخش کمی، پیشران‌ها با استفاده از تکنیک دلفی فازای تک‌مرحله‌ای غربال شدند و پیشران‌هایی با عدد دلفی بالاتر از ۰.۷ برای تحلیل نهایی انتخاب گردیدند. روایی محتوایی پیشران‌های انتخاب‌شده با استفاده از ضریب نسبت روایی محتوایی لاوشه تأیید شد. سپس، پیشران‌های نهایی با به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کپراس و بر اساس سه شاخص «شدت اهمیت»، «میزان قطعیت» و «سطح تخصص خبرگان» اولویت‌بندی شدند. در نهایت، با استفاده از رویکرد سناریونگاری پست‌مدرن پاندا و بر اساس ترکیب دو پیشران اولویت‌دار نهایی، چهار سناریوی آینده تدوین گردید.

یافته‌ها: نتایج دلفی فازای نشان داد از میان ۳۲ پیشران اولیه، ۱۰ پیشران کلیدی موفق به عبور از آستانه تعیین‌شده شدند که عبارتند از: زیرساخت‌های فناوری اطلاعات، میزان رقابتی شدن صنعت خودرو، یکپارچگی زنجیره تأمین، میزان هوشمندی تولید، وضعیت استارت‌آپ‌های فناوری‌های نوین، سیاست‌های نوآوری، بین‌المللی بودن زنجیره تأمین، میزان اتوماسیون فرایندها، سیاست دیجیتالی‌سازی و تصمیم‌گیری داده‌محور. نتایج روش کپراس نشان داد که دو پیشران «میزان بین‌المللی بودن زنجیره تأمین صنعت خودرو» با ضریب اهمیت نسبی ۱۰۰ درصد و «تصمیم‌گیری داده‌محور در صنعت خودرو» با ضریب اهمیت نسبی ۹۲.۴۶ درصد، به‌ترتیب بیشترین اولویت و اثرگذاری را بر آینده صنعت خودرو دارا هستند. بر اساس ترکیب این دو پیشران کلیدی، چهار سناریوی آینده تدوین شد: (۱) صنعت خودروی هوشمند (وضعیت ایدئال) که در آن هم زنجیره تأمین بین‌المللی است و هم تصمیم‌گیری‌ها داده‌محور؛ (۲) توسعه بلواری (وضعیت بینابینی) که در آن با وجود گشایش‌های بین‌المللی، ساختار تصمیم‌گیری همچنان سنتی باقی می‌ماند؛ (۳) صنعت خودروی تاب‌آور (وضعیت بینابینی) که در آن با وجود محدودیت‌های خارجی، تلاش برای داده‌محوری و نوآوری درون‌زا صورت می‌گیرد؛ و (۴) صنعت خودروی جامانده (وضعیت فاجعه‌بار) که در آن هم زنجیره تأمین دچار گسست است و هم تصمیم‌گیری‌ها سنتی و غیرداده‌محور می‌باشند.

نتایج و بحث: یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که آینده صنعت خودرو به شدت وابسته به دو عامل کلیدی «یکپارچگی در زنجیره تأمین جهانی» و «گذار از تصمیم‌گیری سنتی به تصمیم‌گیری داده‌محور» است. سناریوی مطلوب (صنعت خودروی هوشمند) در گرو تحقق هم‌زمان چند پیش‌شرط کلیدی شامل توسعه زیرساخت‌های داده، افزایش شفافیت در زنجیره تأمین، ارتقای همکاری‌های بین‌المللی، اتخاذ رویکرد نوآوری باز و همکاری با استارت‌آپ‌ها و مراکز دانشگاهی است. در مقابل، سناریوی نامطلوب (صنعت خودروی جامانده) نشان می‌دهد که در صورت تداوم وضعیت فعلی و عدم توجه به این دو پیشران، فاصله صنعت خودرو با استانداردهای جهانی صنعت ۴ به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت. از منظر نوآوری، این پژوهش با ارائه چارچوب ترکیبی آینده‌پژوهی (دلفی فازای، کپراس و پاندا)، امکان تحلیل چندبعدی و ساختاریافته آینده صنعت خودرو را فراهم کرده است. همچنین تمرکز بر پیوند میان زنجیره تأمین بین‌المللی و تصمیم‌گیری داده‌محور به عنوان دو محور اصلی تحول، می‌تواند مبنای تدوین سیاست‌های صنعتی در سطح کلان قرار گیرد. پیشنهادها کاربردی پژوهش در سه سطح سازمانی (توسعه فرهنگ داده‌محور، آموزش نیروی انسانی)، زیرساختی (سرمايه‌گذاری در فناوری اطلاعات، یکپارچه‌سازی سیستم‌ها) و سیاستی (ارتقای حکمرانی داده‌محور، اصلاح ساختارهای نهادی) ارائه شده است. در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که موفقیت



در گذار به صنعت خودروی هوشمند، بیش از آنکه به فناوری وابسته باشد، به بلوغ مدیریتی، نهادی و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده در سطح کلان صنعت خودرو مرتبط است.

استناد: احمدی، مهدی؛ و نیلی احمدآبادی، مجید (۱۴۰۵). آینده‌پژوهی در صنعت خودرو با تمرکز بر صنعت نسل چهارم. اقتصاد اطلاعات و مدیریت نوآور، ۱ (۱)،

۲۸-۱

© نویسندگان.



مقدمه

در هر عصری، انقلاب‌های صنعتی تغییرات گسترده‌ای در شیوه‌های تولید، سبک مدیریت، فرایندها، فناوری‌ها و ابزارها در صنایع گوناگون ایجاد کرده‌اند. انقلاب صنعتی چهارم مبتنی بر اینترنت و فناوری اطلاعات و ارتباطات، اثرات گسترده‌ای بر جامعه، صنایع و روابط انسانی خواهد داشت. انقلاب صنعتی چهارم یا صنعت ۴ بر اساس سیستم‌های سایبرفیزیکی بوده و مبتنی بر داده‌های ناهمگن و یکپارچگی دانش است. نقش کلیدی سیستم‌های سایبرفیزیکی این است که پویایی و چابکی لازم برای تولید را فراهم کنند و کارایی و اثربخشی کل صنعت را بهبود دهند. هدف انقلاب صنعتی چهارم، رسیدن به سطوح بالاتر کارایی عملیاتی و بهره‌وری و همچنین سطح بالاتری از اتوماسیون است (تامس و شافر^۱، ۲۰۱۷). انقلاب صنعتی چهارم با ایجاد کارخانه‌های هوشمند با کاربست فناوری‌های اینترنت اشیا و رایانش ابری، صنعت را به‌روز نموده و تغییر شکل می‌دهد. همچنین با فناوری‌های دیگری شامل واقعیت افزوده، واقعیت مجازی، ابزارهای دیجیتالی، رباتیک مشارکتی و شبیه‌سازی و ...، فرایندهای تولیدی را توسعه می‌دهد (مالیک، مسعود و کوسار^۲، ۲۰۲۰). انقلاب صنعتی چهارم بخش تولید را قادر می‌سازد تا با بکارگیری دستگاه‌های سنجش داخلی در تمامی اجزای سازنده، محصولات و تجهیزات خود را دیجیتالی کند. تحلیل داده‌های مربوطه در یک سیستم، همه جا حاضر خواهد بود و با ترکیب داده‌های دیجیتالی و اشیا فیزیکی، قابلیت تبدیل هر بخش صنعتی در جهان را دارد که بسیار چابک‌تر و با تأثیر بیشتر از هر یک از سه انقلاب صنعتی قبلی یعنی انقلاب صنعتی اول و دوم و سوم، تحول یابد (مروگالسکا و ویرویکا^۳، ۲۰۱۷).

انقلاب صنعتی چهارم برعکس انقلاب‌های قبلی به صورت چندوجهی و نه به صورت خطی در حال پیشروی است، این انقلاب نتیجه جهان پیچیده و به هم پیوسته عصر امروز است. انقلاب صنعتی چهارم بر اساس انقلاب دیجیتالی ساخته می‌شود و فناوری‌های چندگانه‌ای را تلفیق می‌کند که به تحولات پارادایمی مهمی در جهان اقتصاد، کسب و کار، جامعه و فرد ختم می‌شود. این انقلاب شامل تحول تمامی سیستم‌ها در شرکت‌ها، صنایع و جامعه است. در این انقلاب، فناوری‌های نوین، بسیار سریع‌تر و گسترده‌تر از انقلاب‌های قبلی منتشر می‌شوند. بنابراین سرعت، گستردگی، عمق و اثرات سیستمی بخشی از علل رویداد انقلاب صنعتی چهارم هستند. اینترنت اشیا، کلان داده‌ها، هوش مصنوعی، چاپ سه بعدی، رباتیک و مکترونیک، فناوری‌های قابل کاشت، فناوری بلاک چین، رایانش ابری و واقعیت افزوده یا مجازی بخشی از اجزای اساسی این انقلاب صنعتی به شمار می‌آیند (چنگ و همکاران^۴، ۲۰۱۶؛ وانگ و وانگ^۵، ۲۰۱۶).

صنعت خودرو در ایران یکی از پیشران‌های مهم اقتصاد کشور بوده که در سال‌های اخیر به دلیل وضع تحریم‌های گسترده با مشکلات زیادی روبرو است. فناوری قدیمی و فرسوده، بهره‌وری پایین، کیفیت پایین، فقدان رقابت و قیمت‌گذاری دستوری از مهم‌ترین چالش‌های این صنعت هستند. صنعت خودرو در سال‌های آتی دچار تغییرات گسترده‌ای خواهد شد. جرقه این تغییرات در حال حاضر زده شده است. استفاده از فناوری‌های دیجیتالی، تغییر فلسفه در طراحی و تولید، حرکت به سمت خودروهای برقی و خودران و تغییر رویکردهای مدیریت زنجیره تامین از مهم‌ترین این تغییرات است. صنعت خودرو نمی‌تواند نسبت به این تغییرات بی‌توجه باشد. صنعت ۴ علاوه بر صنایع دیگر مانند مالی و حمل‌ونقل، صنعت خودرو را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. این تأثیرات همه‌جانبه و گسترده است. صنعت ۴ می‌تواند

¹ Thames & Schaefer

² Malik, Masood, & Kousar

³ Mrugalska & Wyrwicka

⁴ Cheng, Liu, Qiang & Liu

⁵ Wang & Wang

باعث تحولات چشمگیر در طراحی، تولید، زنجیره تامین صنعت خودرو، سیستم‌های اطلاعاتی و کیفیت در این صنعت شده و مزایای زیادی برای آن داشته باشد.

نخستین مزیت صنعت ۴.۰ رشد بهره‌وری به وسیله اتوماسیون است. همچنین صنعت ۴.۰ باعث کاهش ضایعات و بهبود عملکرد می‌شود که هر دو عامل، جزء عوامل بسیار کلیدی در توسعه هستند. همچنین کارخانه‌های هوشمند از طریق نظارت آنی، پایداری تولید را افزایش می‌دهند و سیستم‌های کنترل خودکار، به شدت باعث کاهش هزینه‌های نگهداری کارخانه‌های آینده می‌شوند. علاوه بر این، می‌توان فهمید که دیجیتالی شدن سبب‌ساز بهبود چابکی می‌شود که البته مزیت رقابتی زیادی برای صنایع تولیدی پیشرفته خواهد داشت. صنعت ۴.۰ روابط بین کسب‌وکارها و زنجیره ارزش را دگرگون خواهد ساخت. شرکت‌ها و صنایع چابک با معرفی محصولات جدید به بازار با استفاده از سنجش مواد، مدیریت داده‌ها، کلان‌داده‌ها یا اتوماسیون تولید، از مزیت‌های صنعت ۴ برخوردار شوند (برازی و همکاران^۱، ۲۰۲۰).

یکی از مشکلات اساسی صنایع ایران، نگاه انفعالی و با تاخیر مدیران و سیاست‌گذاران کلیدی است. در حقیقت در ایران به جای شناسایی و کشف تغییرات آینده و در نظر گرفتن تمهیدات لازم از قبل، رویکردی واکنشی و انفعالی اتخاذ می‌شود. آینده‌پژوهی ابزاری راهبردی برای شناسایی پیشران‌ها و روندهای محتمل آینده است. آینده‌پژوهی معمولاً برای فهم آینده‌پدیده‌ها و روندهای نوظهور و تکاملی استفاده می‌شود، به همین خاطر می‌توان از ابزار آینده‌پژوهی برای شناسایی تأثیرات صنعت ۴ روی صنعت خودرو استفاده کرد. علاوه بر تکاملی و نوظهور بودن صنعت ۴، باید به این مطلب توجه کرد که این صنعت تغییرات گسترده‌ای روی صنایع ایجاد می‌کند. در ضمن صنعت خودرو هم یکی از صنایع مهم و اثرگذار در اقتصاد جهانی است. به همین خاطر پژوهش حاضر به دنبال شناسایی آینده‌های صنعت خودرو با تمرکز بر صنعت ۴ با ابزار سناریونگاری است.

پیشینه پژوهش

صنعت نسل چهارم به عنوان مرحله جدید تحول صنعتی، بر ادغام فناوری‌های دیجیتال پیشرفته با سیستم‌های تولید و زنجیره تأمین تمرکز دارد و هدف اصلی آن ایجاد کارخانه‌ها و شبکه‌های هوشمند، متصل و خودکار است. در این رویکرد، فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده‌ها، رایانش ابری، رباتیک پیشرفته و سیستم‌های سایبر-فیزیکی نقش محوری دارند و امکان جمع‌آوری، تحلیل و استفاده بلادرنگ از داده‌ها را در تمامی سطوح تولید و توزیع فراهم می‌کنند. بر اساس پژوهش خان^۲ و همکاران (۲۰۲۵)، ادغام این فناوری‌ها نه تنها موجب افزایش بهره‌وری و کارایی عملیاتی می‌شود، بلکه مسیرهای^۳ جدیدی برای توسعه پایدار در صنایع مختلف ایجاد می‌کند و به بهبود مصرف منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌نماید.

از منظر کاربردی، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های صنعت ۴.۰، ارتقای تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و پیش‌بینی‌پذیری سیستم‌ها است. در این راستا، استفاده از هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین امکان تحلیل الگوهای پیچیده و پیش‌بینی خطاها و خرابی‌ها را فراهم می‌کند. برای مثال، سانی^۴ (2025) نشان می‌دهد که فناوری‌های صنعت ۴.۰ در ترکیب با هوش مصنوعی می‌توانند برای پیش‌بینی نقص در مواد کامپوزیتی در صنایع پیشرفته مورد استفاده قرار

¹ Brozzi, Forti, Rauch & Matt

² Khan

³ Khan & Emon

⁴ Sunny

گیرند و دقت کنترل کیفیت را به طور چشمگیری افزایش دهند. این قابلیت‌ها باعث کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های تولیدی می‌شود.

در سطح زنجیره تأمین، صنعت نسل چهارم نقش مهمی در افزایش شفافیت، هماهنگی و تاب‌آوری دارد. به گفته خان و ایمون (۲۰۲۵)، به‌کارگیری فناوری‌های دیجیتال در صنعت تولید موجب بهبود عملکرد زنجیره تأمین از طریق افزایش سرعت جریان اطلاعات، کاهش عدم قطعیت و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده می‌شود. همچنین این فناوری‌ها امکان پاسخ‌گویی سریع‌تر به تغییرات تقاضا و اختلالات بازار را فراهم می‌کنند.

فناوری‌های نسل چهارم در صنعت خودرو به معنای ادغام گسترده فناوری‌های دیجیتال با فرآیندهای طراحی، تولید، کنترل کیفیت و زنجیره تأمین است که هدف آن افزایش هوشمندی، بهره‌وری و انعطاف‌پذیری سیستم‌های خودروسازی است. یکی از مهم‌ترین فناوری‌های این حوزه، هوش مصنوعی است که نقش کلیدی در تحلیل داده‌های تولید و شناسایی خطاهای کیفی دارد. بر اساس مرور سیستماتیک مورالس ماتاموروس^۱ و همکاران (۲۰۲۵)، استفاده از هوش مصنوعی در صنعت خودرو به شکل قابل توجهی دقت تشخیص عیوب کیفی را افزایش داده و موجب کاهش ضایعات و بهبود کیفیت نهایی محصولات شده است. این موضوع نشان می‌دهد که سیستم‌های تولیدی در حال حرکت به سمت خودکارسازی هوشمند کنترل کیفیت هستند.

در کنار کنترل کیفیت، صنعت ۴.۰ نقش مهمی در بهینه‌سازی عملیات تولید از طریق ترکیب روش‌های مدیریتی و فناوری‌های دیجیتال دارد. مطالعه سوردان^۲ و همکاران (۲۰۲۵) نشان می‌دهد که ادغام رویکرد شش سیگمای ناب با فناوری‌های صنعت ۴.۰ در تولیدکنندگان خودروهای سنگین، منجر به بهبود چشمگیر کارایی فرایندها، کاهش اتلاف‌ها و افزایش بهره‌وری عملیاتی شده است. این ترکیب نشان‌دهنده همگرایی بین مدیریت سنتی کیفیت و فناوری‌های نوین دیجیتال برای دستیابی به تولید هوشمند است.

از منظر تصمیم‌گیری و ارزیابی راهبردی، فناوری‌های صنعت ۴.۰ امکان استفاده از روش‌های پیشرفته تصمیم‌گیری مبتنی بر منطق فازی و داده‌های پیچیده را فراهم کرده‌اند. پژوهش رانی^۳ و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از رویکرد فازی نشان می‌دهد که ارزیابی و انتخاب استراتژی‌های پذیرش صنعت ۴.۰ در صنعت خودرو نیازمند در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و معیارهای چندگانه است. همچنین ایمران و یولا^۴ (۲۰۲۵) با ارائه روش ایداس فازی، بر اهمیت تصمیم‌گیری دقیق و چندمعیاره در انتخاب فناوری‌های مناسب تأکید می‌کنند که این امر به مدیران کمک می‌کند در شرایط پیچیده صنعتی تصمیمات بهینه‌تری اتخاذ کنند.

در حوزه نگهداری و بهره‌برداری، یکی از مهم‌ترین کاربردهای صنعت ۴.۰ در خودرو، نگهداری پیش‌بینانه است. ماهالی^۵ و همکاران (۲۰۲۵) نشان می‌دهند که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین پیشرفته، به‌ویژه در شرایط داده‌های نامتوازن، می‌تواند به پیش‌بینی دقیق خرابی‌ها در سیستم‌های خودرویی کمک کند و از توقف‌های ناگهانی تولید جلوگیری نماید. در مجموع، ادبیات جدید نشان می‌دهد که صنعت نسل چهارم در صنعت خودرو مجموعه‌ای از فناوری‌های هوشمند شامل هوش مصنوعی، تحلیل داده‌های پیشرفته، روش‌های تصمیم‌گیری فازی و سیستم‌های پیش‌بینانه است که به طور هم‌زمان کیفیت، بهره‌وری، انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری این صنعت را به شکل چشمگیری ارتقا می‌دهد. در ادامه به برخی از تحقیقات در حوزه فناوری‌های نسل چهارم و صنعت خودرو اشاره شده است.

¹ Morales Matamoros

² Sordan

³ Rani

⁴ Imran & Ullah

⁵ Mahale

اوجوبانیر^۱ و همکاران (۲۰۲۶) به بررسی فرصت‌ها و چالش‌های پیاده‌سازی صنعت ۴.۰ در صنعت خودروسازی کشورهای مراکش و نیجریه پرداختند. پژوهش از رویکرد کیفی-توصیفی و مطالعه موردی تطبیقی بهره گرفته و داده‌ها از طریق مرور ادبیات، مصاحبه با خبرگان صنعت و تحلیل محتوای کیفی گردآوری و بررسی شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که هرچند فناوری‌های صنعت ۴.۰ مانند اینترنت اشیا، تحلیل داده و اتوماسیون می‌توانند بهره‌وری، کیفیت تولید و رقابت‌پذیری صنعت خودرو را در این کشورها به‌طور قابل توجهی افزایش دهند، اما موانع مهمی مانند ضعف زیرساخت‌های دیجیتال، کمبود سرمایه‌گذاری، نبود نیروی انسانی ماهر و چالش‌های نهادی و سیاست‌گذاری مانع اجرای کامل این فناوری‌ها شده‌اند. نتایج پژوهش بیان می‌کند که موفقیت در پیاده‌سازی صنعت ۴.۰ در این دو کشور مستلزم تقویت زیرساخت‌های فناوری، توسعه مهارت‌های نیروی انسانی، حمایت دولت و ایجاد همکاری‌های بین‌المللی است؛ در غیر این صورت، شکاف فناورانه با کشورهای توسعه‌یافته در صنعت خودرو همچنان افزایش خواهد یافت.

چاهان و ویمالا رانی^۲ (2026) به ارائه یک چارچوب برای اولویت‌بندی ریسک‌ها در زنجیره تأمین صنعت خودرو در بستر صنعت ۴.۰ و با تمرکز بر خودروهای برقی و سنتی پرداختند. این پژوهش از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل ریسک بهره گرفته و تلاش کرده است ریسک‌های کلیدی در زنجیره تأمین را شناسایی و بر اساس میزان اهمیت و اثرگذاری رتبه‌بندی کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که ریسک‌های مرتبط با اختلالات تأمین، نوسانات تقاضا، وابستگی به فناوری‌های دیجیتال و چالش‌های یکپارچگی داده در محیط صنعت ۴.۰ از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر عملکرد زنجیره تأمین هستند. همچنین نتایج بیانگر آن است که در مقایسه با خودروهای سنتی، زنجیره تأمین خودروهای برقی به دلیل وابستگی بیشتر به فناوری‌های نوین و مواد اولیه خاص، حساسیت و ریسک‌پذیری بالاتری دارد. در نهایت، پژوهش بر ضرورت مدیریت هوشمند ریسک، افزایش انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین و استفاده از فناوری‌های دیجیتال برای بهبود تاب‌آوری در صنعت خودرو تأکید می‌کند.

مطالعه لیو^۳ و همکاران (۲۰۲۵) به مرور و تحلیل کاربرد فناوری دوقلوی دیجیتال در صنعت خودرو، به‌ویژه در سطح محصولات، فرایندها و سیستم‌های تولید پرداخته است. این پژوهش با رویکرد مرور نظام‌مند ادبیات، به بررسی نحوه به‌کارگیری دوقلوی دیجیتال در طراحی محصول، بهینه‌سازی فرایندهای تولید و مدیریت یکپارچه سیستم‌های خودروسازی پرداخته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که دوقلوی دیجیتال نقش مهمی در افزایش دقت شبیه‌سازی، کاهش خطاهای تولید، بهبود تصمیم‌گیری و افزایش بهره‌وری در زنجیره تولید خودرو دارد. همچنین نتایج حاکی از آن است که این فناوری با ایجاد ارتباط لحظه‌ای بین دنیای فیزیکی و دیجیتال، امکان پایش، پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های تولیدی را فراهم می‌کند. در نهایت، پژوهش تأکید می‌کند که با وجود مزایای قابل توجه، چالش‌هایی مانند هزینه‌های پیاده‌سازی، نیاز به زیرساخت داده‌ای پیشرفته و یکپارچگی سیستم‌ها همچنان از موانع اصلی گسترش این فناوری در صنعت خودرو هستند.

ملکی، نصراللهی و محمدی (۱۴۰۴) در پژوهشی کاربردی با رویکرد کمی و ترکیبی از روش‌های دلفی فازی، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با رویکرد میانگین هندسی و تکنیک مارکوس به شناسایی و اولویت‌بندی پیشران‌های کلیدی مؤثر بر آینده زنجیره تأمین حوزه سلامت با تمرکز بر فناوری‌های نسل چهارم پرداختند. ابتدا ۲۵ پیشران بالقوه از طریق مرور ادبیات و مصاحبه با خبرگان استخراج و با استفاده از نسبت اعتبار محتوای لاوشه اعتبارسنجی شدند، سپس با به‌کارگیری روش دلفی فازی و بر اساس نظرات ۱۰ خبره حوزه زنجیره تأمین سلامت، آینده‌پژوهی و فناوری‌های نسل

¹ Ojubanire

² Chauhan & Vimala Rani

³ Liu

چهارم، ۹ پیشران با عدد دیفازی بالاتر از ۰/۷ غربال و انتخاب گردیدند. در گام بعد، پیشران‌های نهایی با استفاده از تکنیک مارکوس بر اساس سه شاخص تخصص خبرگان، شدت اهمیت و قطعیت، اولویت‌بندی شدند. یافته‌ها نشان داد که مهم‌ترین پیشران‌های آینده زنجیره تأمین سلامت به ترتیب عبارت‌اند از: توسعه سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری هوشمند برای مدیریت لجستیک و تأمین تجهیزات پزشکی، استفاده از هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تقاضای دارو و بهینه‌سازی فرآیند تأمین تجهیزات پزشکی، به‌کارگیری فناوری کلان‌داده برای تحلیل الگوهای مصرف دارو و پیش‌بینی بحران‌های سلامت، استفاده از قراردادهای هوشمند برای شفاف‌سازی فرآیندهای تأمین و خرید، و مبارزه با تقلب از طریق فناوری بلاک‌چین و احراز اصالت محصولات. پژوهش نتیجه‌گیری می‌کند که استقرار فناوری‌های پیشرفته نسل چهارم به‌ویژه هوش مصنوعی، کلان‌داده، قراردادهای هوشمند و بلاک‌چین، برای ایجاد زنجیره‌های تأمین سلامت تاب‌آور، شفاف و کارآمد حیاتی است و اولویت‌بندی این پیشران‌ها می‌تواند سیاست‌گذاران و سازمان‌های حوزه سلامت را در جهت سرمایه‌گذاری‌های راهبردی، پاسخ‌گویی پیش‌گیرانه به بحران‌ها، کاهش هزینه‌ها، بهبود تصمیم‌گیری و تأمین امنیت زنجیره تأمین یاری نماید.

پژوهش کریشنان^۱ و همکاران (۲۰۲۵) با هدف بررسی نوآوری مدل‌های کسب‌وکار مبتنی بر صنعت ۴.۰ در راستای پایداری زنجیره تأمین انجام شده است. این پژوهش با رویکرد مطالعه موردی اکتشافی، به تحلیل نحوه استفاده شرکت‌ها از فناوری‌های دیجیتال مانند اینترنت اشیا، تحلیل داده‌های بزرگ و اتوماسیون برای بازطراحی مدل‌های کسب‌وکار و بهبود عملکرد زیست‌محیطی و اقتصادی زنجیره تأمین پرداخته است. یافته‌ها نشان داد که به‌کارگیری فناوری‌های صنعت ۴.۰ موجب افزایش شفافیت، بهبود هماهنگی بین بازیگران زنجیره تأمین و ارتقای کارایی عملیاتی می‌شود. همچنین نتایج بیانگر آن است که نوآوری در مدل‌های کسب‌وکار می‌تواند نقش کلیدی در هم‌راستاسازی اهداف اقتصادی و پایداری ایفا کند و به شرکت‌ها کمک کند تا در برابر تغییرات محیطی انعطاف‌پذیرتر شوند.

ریزوی^۲ و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی ارتباط میان صنعت خودرو، صنعت ۴.۰ و اقتصاد چرخشی از منظر مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان پرداختند. این پژوهش با رویکرد مطالعه موردی و تحلیل دیدگاه‌های دو گروه اصلی ذی‌نفع، تلاش کرده است نقش فناوری‌های صنعت ۴.۰ را در تسهیل گذار به الگوهای تولید و مصرف پایدار ارزیابی کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که فناوری‌های دیجیتال مانند اینترنت اشیا، تحلیل داده‌های بزرگ و سامانه‌های هوشمند تولید، نقش مهمی در بهبود باز یافت، کاهش ضایعات و افزایش بهره‌وری منابع در صنعت خودرو دارند. همچنین نتایج بیانگر آن است که پذیرش اقتصاد چرخشی در صنعت خودرو به میزان آگاهی و نگرش مثبت مصرف‌کنندگان و همچنین آمادگی فناوریانه تولیدکنندگان وابسته است.

کمبل، گوناسکاران و دون^۳ (2020) در تحقیقی با عنوان صنعت نسل چهارم و شیوه‌های تولید ناب برای عملکرد سازمانی پایدار در شرکت‌های تولیدی هند به مطالعه تأثیرات مستقیم صنعت ۴ روی شیوه‌های تولید ناب و عملکرد سازمانی استوار و تأثیر میانجی‌گری شیوه‌های تولید ناب در ارتباط میان صنعت ۴ و عملکرد سازمانی پایدار پرداختند. این بررسی، یکی از تحقیقات ابتدایی است که اعتبار تجربی ارتباط میان صنعت نسل چهارم، شیوه‌های تولید ناب و عملکرد سازمانی پایدار را مطرح می‌کند. یافته‌ها نمایان می‌کند که صنعت ۴ اثر مستقیم و مثبت روی شیوه‌های تولید ناب و

¹ Krishnan

² Rizvi

³ Kamble, Gunasekaran, & Dhane

عملکرد سازمانی پایدار دارد و ایضا این بررسی، شیوه‌های تولید ناب را به عنوان یک متغیر اساسی میانجی شناسایی نموده است.

ژائو و همکاران^۱ (2019)، در تحقیق خود با بکارگیری مرور سیستماتیک پیشینه به ارزیابی پیشرفت‌های کنونی فناوری بلاک چین و نقش آن در مدیریت زنجیره ارزش مواد غذایی پرداختند. برای تحقق نتایج تحقیق، محققان، ۷۱ مقاله مربوط با نشریات معتبر، کنفرانس‌ها و فصول کتاب را شناسایی نموده و با استفاده نرم افزار گیفی، روندهای کنونی را شناسایی نموده و دستور کاری برای تحقیقات آینده درباره بلاک چین و نقش آن در مدیریت زنجیره ارزش مواد غذایی، مطرح کردند.

مکینجیج^۲ (2019) در تحقیق خود به تاثیر انقلاب صنعتی چهارم و تغییرات آن در بخش بانکی پرداخته اند. بخش بانکی یکی از زمینه‌های اساسی صنعت خدمات مالی است که از واقعه‌های متعددی همانند فین تک‌ها، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و علم داده تاثیر می پذیرد. این مقاله تاثیرات مزایا رقابت، قوانین تازه و دیجیتالی شدن را روی آتیه بخش بانکی مورد مطالعه قرار داده است.

سانچز، گارسیا و کاتالونا^۳ (2019) با کاربست یادگیری ماشین به تجزیه و تحلیل نظریات مشتریان درباره هتل پرداخته و راهکارهایی را برای بهبود سطح کیفی ارائه خدمات به گردشگران برای جذب خشنودی آن‌ها شناسایی کرده است. برای اجرای تحقیق و استخراج نظریات مشتریان ۳۳ هتل، از سایت یلپ (یکی از شبکه‌های اجتماعی محبوب در آمریکا) بکار گرفته شده است و در نهایت در این تحقیق، مدلی مطرح شده که ممکن است به مدیران هتل در بهبود کیفیت ارائه خدمات به مشتریان مساعدت کند.

تورتولا، میوراندو و مک کاولی^۴ (2018) در تحقیقی به مطالعه اثر تعدیل کننده پذیرش فناوری‌های صنعت ۴ در تعامل بین شیوه‌های مدیریت زنجیره تامین ناب و بهبود عملکرد زنجیره تامین در صنعت برزیل پرداختند. داده‌ها با بکارگیری تحلیل عاملی تاییدی و اکتشافی و تحلیل رگرسیون حداقل مربعات معمولی، تجزیه و تحلیل شدند. یافته‌های تحقیق نمایان کرد که پذیرش فناوری صنعت ۴ می‌تواند تعامل میان شیوه‌های مدیریت زنجیره تامین ناب و عملکرد زنجیره تامین در صنایع برزیل را تعدیل کند. با این وجود، این اثر تعدیل کننده در همان اندازه مورد انتظار هم اتفاق نمی‌افتد.

شهابی و همکاران (۱۴۰۰) به مدلسازی تاثیر انقلاب صنعتی چهارم بر زنجیره تامین خدمات بانکی با بکارگیری رویکرد پویایی سیستم و تکنیک دیمتل فازی پرداختند. در انقلاب صنعتی چهارم، پیدایش فناوری‌های کلانی همانند هوش مصنوعی و اینترنت اشیا، مسبب تحولات وسیع در مدل‌های کسب و کار شده است که در این میان، بانک‌ها، سهم کلان تری را از این تغییرات داشته‌اند. با اینکه پژوهش‌های انجام شده در حوزه تغییر مدل کسب و کار در انقلاب صنعتی چهارم، موضوع تغییر در زنجیره تامین خدمات بانکی در انقلاب صنعتی چهارم کم و بیش پنهان گرفته شده است. به همین دلیل در این مقاله کوشش شده است پس از مطالعه پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، جهت شناخت متغیرهای تاثیرگذار و فهم تعاملات موجود، با استفاده تکنیک دیمتل فازی و رویکرد مدلسازی پویایی سیستم، یک مدل پویا مطرح شود که با ترسیم نمودارهای علی حلقوی، به شناخت برتر نقش انقلاب صنعتی چهارم بر زنجیره تامین خدمات

¹ Zhao, Liu, Lopez, Lu, Elgueta, Chen & Boshkoska

² Mekinjić

³ Sanchez-Franco, Cepeda-Carrion & Roldán

⁴ Tortorella, Miorando & Mac Cawley

بانکی یاری نماید. نتایج نشانگر این است که پیوستگی بازیگران تازه به زنجیره تامین خدمات بانکی، همکاری بین سازمان‌ها، اشتراک سیستماتیک اطلاعات مشتریان بین شرکا، سرمایه گذاری در بخش فناوری اطلاعات بانک و توسعه زیربنای بانکداری دیجیتال به وسیله بانک مرکزی، به ترتیب دربردارنده زیادتین اثرگذاری و اطمینان از راه سودمندی فهم شده و پایداری زنجیره تامین دربردارنده زیادتین اثرپذیری در مدل تاثیر انقلاب صنعتی چهارم بر توسعه بانکداری دیجیتال می‌باشد.

زراوشانی (۱۳۹۹) با بکارگیری از مرور سیستماتیک پیشینه به مطالعه کاربرد فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم در شناسایی و کنترل بحران همه گیری کرونا در سیستم‌های بهداشت و درمان به عنوان یکی از محیط‌های کاری پر ریسک پرداخت. یافته‌های این تحقیق نمایان کرد در انقلاب صنعتی چهارم، فناوری‌هایی مثل فناوری‌های هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، کلان داده‌ها، واقعیت مجازی، هولوگرافی، پردازش ابری، ربات‌های خودکار، اسکن سه بعدی، چاپ سه بعدی و حسگرهای زیستی ممکن است در پیش بینی، شناسایی، ردیابی، نظارت، درمان و کنترل اپیدمی کرونا بکار گرفت. فناوری هوش مصنوعی (۱۰ مقاله) و بعد از آن فناوری ربات‌های خودکار (۶ مقاله) زیادتین فناوری مورد تمرکز در مقالات ورودی بود. فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم ممکن است به بهبود عدالت در دسترسی به مراقبت بهداشتی، بهبود مراقبت‌های خاص بیماران مبتلا به کرونا، نگهداشت ایمنی و سلامت شغلی نیروی کار بهداشت و درمان منجر شود. کاربست فناوری‌های هوشمند بالا ممکن است به دولت‌ها در شناسایی، ردیابی، نظارت و درمان بیماران مبتلا به کرونا یاری نماید و با مدیریت منابع انسانی، دارو، تجهیزات، زمان و غیره تاب‌آوری جامعه و محیط‌های کاری ویژه بیمارستان‌ها را بالا ببرد.

شریف‌پور، آقاجانی و صفایی قادیکلانی (۱۳۹۹) به مطالعه تعاملات ارتباطی فناوری‌های صنعت نسل چهارم در صنایع غذایی گزینش شده پرداختند. برای رسیدن به این امر، نخست از راه استخراج پیشینه، ۲۰ مورد از فناوری‌های صنعت نسل چهارم استخراج گردید و در مرحله دوم با رویکرد دلفی فازی، ۱۳ مورد از فناوری‌های صنعت نسل چهارم برای تبیین در صنایع غذایی معرفی شد. بعد از آن برای مطالعه تعاملات ارتباطی فناوری‌های صنعت نسل چهارم از دیمتل تجدید نظر شده بکار گرفته شده است.

روش‌شناسی تحقیق

از نظر فلسفه پژوهش، این مطالعه مبتنی بر پراگماتیسم بوده و از رویکرد آمیخته (کیفی-کمی) بهره گرفته است. ماهیت داده‌های گردآوری شده در بخش کمی، قضاوتی و مبتنی بر نظرات خبرگان بوده که با استفاده از طیف‌های فازی و قطعی کمی‌سازی شده‌اند. همچنین در بخش کیفی از روش‌های تفسیری برای تدوین سناریوها استفاده شده است. استراتژی پژوهش به صورت متوالی طراحی شده و منطق حاکم بر آن ترکیبی از استقرایی، قیاسی و تفسیری است. هدف پژوهش نیز اکتشافی بوده و با تمرکز بر شناسایی پیشران‌های مؤثر بر آینده صنعت مورد مطالعه دنبال شده است.

جامعه نظری پژوهش شامل خبرگان و مدیران ارشد دارای تجربه در حوزه فناوری‌های دیجیتال و صنعت مرتبط بوده و نمونه‌گیری به روش قضاوتی و غیرتصادفی انجام شده است. در این راستا، ۱۰ نفر از خبرگان شامل مدیران، مشاوران و کارشناسان ارشد با سابقه کاری مرتبط انتخاب شدند.

برای گردآوری داده‌ها از روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی استفاده شد. پیشران‌ها ابتدا از منابع علمی معتبر استخراج و سپس از طریق پرسشنامه‌های خبره‌سنجی غربال شدند. در مرحله بعد، از تکنیک دلفی فازی برای اجماع‌سازی و از

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای اولویت‌بندی عوامل استفاده شد. روایی ابزارها با استفاده از نسبت روایی محتوایی تأیید شد. همچنین برای تدوین سناریوها از مصاحبه‌های غیرساختاریافته و جلسات هم‌اندیشی با خبرگان استفاده گردید که در نهایت منجر به طراحی چهار سناریوی آینده‌نگر برای پژوهش شد. مراحل تحقیق حاضر عبارتند از:

۱. شناسایی پیشران‌های موثر روی آینده صنعت خودرو با تمرکز بر صنعت ۴ از طریق مرور تحلیلی مقالات صنعت ۴؛
۲. غربال و انتخاب پیشران‌های موثر در پژوهش از طریق یکی از روش‌های پارادایم تصمیم‌گیری مبتنی بر آینده (در اینجا روش کپراس)؛
۳. نگاشت سناریوهای باورپذیر و محتمل پژوهش با استفاده از رویکرد پست‌مدرن پاندا (ارزیابی مشارکتی نیازها و توسعه اقدام).

در این پژوهش از روش‌های مرور پیشینه، روش دلفی فازی، کپراس، پاندا و مارکوس جهت تحلیل داده‌ها استفاده شده است. مرور پیشینه پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر جهت استخراج پیشران‌های پژوهش، روش دلفی فازی برای سرند پیشران‌های پژوهش، پاندا به منظور تدوین سناریوهای پژوهش و مارکوس برای اولویت‌بندی سناریوهای تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه این روش‌ها توضیح داده شدند.

در این پژوهش از روش دلفی فازی برای سرند پیشران‌های پژوهش استفاده شد. مراحل روش دلفی فازی عبارت است از (ملکی و همکاران، ۲۰۲۲؛ حبیبی، جهان‌تیغ، و سرفرازی، ۲۰۱۵):

(۱) شناسایی طیف مناسب برای فازی‌سازی عبارات کلامی

(۲) تجمیع فازی مقادیر فازی شده

(۳) فازی‌زدایی داده‌ها

(۴) انتخاب شدت آستانه و غربال عوامل و معیارها

کپراس یکی از فنون اولویت‌بندی جبرانی و مبتنی بر ماتریس تصمیم است. مراحل کپراس به شرح زیر است:

گام اول: ماتریس تصمیم بر اساس گزینه‌ها و شاخص‌ها توسعه می‌یابد.

گام دوم: محاسبه وزن شاخص‌ها بر اساس یکی از فنون وزن‌دهی. در این پژوهش وزن تمامی شاخص‌ها، یکسان و برابر با $0/33$ در نظر گرفته شده است.

گام سوم: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری بر اساس فرمول زیر:

$$d_{ij} = \frac{q_i}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} x_{ij}$$

که در اینجا q_i وزن معیار i ام است و x_{ij} مقدار هر گزینه به ازای هر شاخص:

$$\sum_{j=1}^n d_{ij}$$

گام چهارم: محاسبه مجموع امتیازات هر گزینه به ازای شاخص‌های مثبت و منفی؛ گزینه‌هایی که با شاخص‌های مثبت محاسبه می‌شوند، با S_{j+} و گزینه‌هایی که با شاخص‌های منفی محاسبه می‌شوند، با S_{j-} نشان داده می‌شوند. مجموع

S_{j+} و S_{j-} بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{j+} = \sum_{zi=+} d_{ij}$$

$$s_{j-} = \sum_{zi=-} d_{ij}$$

گام پنجم: اولویت‌بندی مقایسه‌ای گزینه‌هایی که بر اساس شاخص‌های مثبت و منفی محاسبه می‌شوند. اهمیت نسبی Q_j هر گزینه A_j بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_j = s_{j+} + \frac{\sum_{j=1}^n s_{j-}}{s_{j-} \sum_{j=1}^n \frac{1}{s_j}}$$

گام ششم: اولویت‌بندی گزینه‌ها بر اساس Q_j ، هرچه مقدار Q_j بیشتر باشد، نشانگر رتبه بالاتر آن گزینه در اولویت‌بندی است. گزینه‌ای که بهترین حالت ممکن را دارد یا به عبارتی، گزینه ایدئال است، همواره بیشترین مقدار را دارد.

گام هفتم: مرحله نهایی تعیین گزینه‌ای است که مطلوب‌ترین وضعیت را در میان شاخص‌ها دارد که با افزایش یا کاهش رتبه هر گزینه، درجه اهمیت آن نیز افزایش یا کاهش می‌یابد. گزینه‌هایی که مطلوب‌ترین وضعیت را از نظر شاخص‌ها داشته باشند، با بیشترین درجه اهمیت N_j مشخص می‌شوند که N_j برابر با ۱۰۰ درصد است. مقدار کلی درجه اهمیت هر گزینه که محاسبه می‌شود، از ۰ تا ۱۰۰ درصد است که در میان این دامنه بهترین و بدترین گزینه تعیین می‌شوند. درجه اهمیت N_j هر گزینه A_j بر مبنای فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$N_j = \frac{Q_j}{Q_{max}} \times 100$$

در این رابطه Q_j درجه اهمیت هر گزینه است و Q_{max} بیشترین مقداری است که گزینه ایدئال به خود تخصیص داده است (احمدی و همکاران، ۲۰۲۲).

در این پژوهش برای تحلیل پیشران‌های پژوهش، شاخص‌های رویکرد شبکه جهانی کسب‌وکار^۱ استفاده شد. این شاخص‌ها عبارتند از: میزان تخصص خبرگان در مورد پیشران‌های پژوهش، اهمیت هر پیشران در شکل‌دهی به آینده و میزان قطعیت هر پیشران. رویکرد شبکه جهانی کسب‌وکار یکی از فنون پرکاربرد جهت تدوین سناریوها می‌باشد. مبدا اصلی این رویکرد شوارتز، دبیر کل شبکه جهانی کسب‌وکار است.

از آنجا که روش پاندا ماهیت پست‌مدرن دارد، ابزاری مناسب برای سناریونگاری است. چرا که مهم‌ترین مشخصه فرایند سناریونگاری، خلاقانه بودن آن است و اصلی‌ترین شعار رویکرد پست‌مدرن، تمرکز روی آزادی، تنوع و خلاقیت است. مراحل روش پاندا عبارت است از (وایت و تاکت^۲، ۱۹۹۷):

بررسی اولیه^۳: به معنی ایجاد فضایی باز برای ابراز نظر، ضمن احترام به تنوع و همچنین کمک به مشارکت‌کنندگان برای ابراز عقاید خود است.

مباحثه^۴: در مرحله مباحثه، تسهیل‌کننده باید افراد را به میزان بیشتری به بیان نظرات ترغیب سازد. هدف از این مرحله، ایجاد درک و شناختی عمیق نسبت به گزینه‌های مورد بررسی، ساختاردهی آن‌ها، حذف یا ترکیب برخی از آن‌هاست. در این پژوهش، منظور از گزینه‌ها، همان سناریوهای پژوهش است. در این مرحله، گزینه‌های مختلف به دقت بر اساس ترجیحات و اولویت‌ها مختلف مورد بحث و بررسی جدی قرار می‌گیرند. در این مرحله باید به مشارکت‌کنندگان، شانس برابر و مساوی برای مشارکت داده شود.

¹ Global Business Network

² White & Taket

³ Deliberation I

⁴ Debate

تصمیم‌گیری: در این مرحله، گزینه‌های مختلف مورد بحث و بررسی دقیق قرار گرفته و در مورد فنون تصمیم‌گیری در مورد گزینه‌ها، تصمیمات ازم اتخاذ می‌شود. این مرحله به معنای انتخاب سناریوی محتمل و تعیین روش گزینش سناریوی محتمل است.

بررسی ثانویه: در این بخش به ارزیابی اثرات اقدامات توافقی پرداخته می‌شود. این مرحله معادل ارائه راهکار بر اساس سناریوی محتمل است.

پیشران‌های پژوهش

پیشران‌های پژوهش از طریق مرور پیشینه مقالات نشریات معتبر در حوزه صنعت نسل چهارم احصاء شد. ۳۲ پیشران از طریق مرور پیشینه بدست آمد که در جدول شماره یک آورده شده است .

جدول ۱. لیست پیشران‌های پژوهش

پیشران‌های پژوهش	منابع
فرهنگ سازمانی	کاباساکال ^۱ و همکاران (2017)
زیرساخت‌های فناوری اطلاعات	کمبل، گوناسکاران و دون (2020)
وضعیت پایگاه‌های اطلاعاتی	سانچز، گارسا و کاتالونا (2019)
آموزش کارکنان	کمبل، گوناسکاران و دون (2020)
حمایت مدیران ارشد	شریف‌پور، آقاجانی و صفایی قادیکلانی (1399)
وضعیت مهارت‌های کلیدی در صنعت خودرو	شریف‌پور، آقاجانی و صفایی قادیکلانی (1399)
هزینه‌های انتقال فناوری	بای و همکاران (2020)
سازگاری فناوری‌های صنعت ۴ با دیگر فناوری‌ها و سیستم‌ها	سینای و کوتلانوا (2018)
میزان رقابتی شدن صنعت خودرو	ورما و ونکاتسان ^۲ (2021)
ارتباط صنعت خودرو با بازارهای جهانی	لیگارسکی ^۳ و همکاران (2021)
میزان سرمایه‌گذاری در پروژه‌های تحقیق و توسعه	پاپولوا ^۴ و همکاران (2022)
یکپارچگی زنجیره تأمین صنعت خودرو	هلپر ^۵ و همکاران (2019)
محدودیت‌های انتقال فناوری به کشور	راز و بابولی ^۶ (2019)
میزان هوشمندی تولید در کشور و صنعت خودرو	سانچز، گارسا و کاتالونا (2019)
وضعیت استارت‌آپ‌های فناوری‌های نوین در کشور	جنا و پاتل ^۷ (2023)
سیتم تحلیل ریسک و تکانه در صنعت خودرو	گروبر ^۸ (2013)
سیاست‌های نوآوری در صنعت خودرو	راز و بابولی (2019)

¹ Kabasakal

² Verma & Venkatesan

³ Ligarski

⁴ Papulová

⁵ Helper

⁶ Rother & Baboli

⁷ Jena & Patel

⁸ Gruber

پیشران‌های پژوهش	منابع
روش‌ها و فرایندهای یادگیری در صنعت خودرو	فرناندس ^۱ و همکاران (2021)
نظام جبران خدمات در صنعت خودرو	فیرو ^۲ و همکاران (2021)
میزان بین المللی بودن زنجیره تأمین صنعت خودرو	ابراهیمی و همکاران (2019)
ساختار سازمانی در صنعت خودرو	پاپولوا و همکاران (2022)
میزان اتوماسیون و خودکار بودن فرایندها	تورتولا، میوراندو و مک‌کاولی (2018)
میزان توجه به مشتری‌مداری در صنعت خودرو	وینکلهاک ^۳ و همکاران (2019)
میزان ارتباط صنعت خودرو با دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی	فیرو و همکاران (2021)
سیاست دیجیتالی شدن در صنعت خودرو	ژائو و همکاران (۲۰۱۹)، مکینجیج (2019)
تحلیل‌های پیشرفته و پیش‌بینانه	ژائو و همکاران (2019)
اینترنت اشیاء صنعتی	مکینجیج (2019)
پیوستگی زنجیره ارزش	تورتولا، میوراندو و مک‌کاولی (2018)
تصمیم‌گیری داده‌محور در صنعت خودرو	شهابی و همکاران (1400)
منابع انسانی داده‌محور در صنعت خودرو	زراوشانی (1399)
تفکر چابک و نوآورانه مدیران صنعت خودرو	نمت و پترکووا ^۴ (2018)
مزایای ادراک شده صنعت ۴ توسط مدیران ارشد صنعت خودرو	شهابی و همکاران (1400)

۳۲ پیشران مورد نظر در ادامه با استفاده از تکنیک دلفی فازی سرند شدند. تکنیک دلفی فازی تک مرحله‌ای بوده و نسبت به فنون آماری دارای مزیت است. جدول شماره دو، نتیجه دلفی فازی را برای پیشران‌های پژوهش نشان می‌دهد.

جدول ۲. خروجی دلفی فازی

پیشران‌های پژوهش	میانگین نظرات خبرگان			عدد دی‌فازی شده
	حد بالا	میانه	حد پایین	
فرهنگ سازمانی	۰/۴	۰/۲۳	۰/۱۸	۰/۲۷
زیرساخت‌های فناوری اطلاعات	۰/۹۵	۰/۸۹	۰/۷۲	۰/۸۵
وضعیت پایگاه‌های اطلاعاتی	۰/۵۱	۰/۴۲	۰/۳۳	۰/۴۲
آموزش کارکنان	۰/۴۶	۰/۳۲	۰/۲۴	۰/۳۴
حمایت مدیران ارشد	۰/۵۴	۰/۴۵	۰/۳۳	۰/۴۴
وضعیت مهارت‌های کلیدی در صنعت خودرو	۰/۴۷	۰/۳۵	۰/۲۷	۰/۳۶
هزینه‌های انتقال فناوری	۰/۵۲	۰/۴	۰/۳۱	۰/۴۱
سازگاری فناوری‌های صنعت ۴ با دیگر فناوری‌ها و سیستم‌ها	۰/۶	۰/۵۱	۰/۴	۰/۵
میزان رقابتی شدن صنعت خودرو	۰/۹۷	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۸۵
ارتباط صنعت خودرو با بازارهای جهانی	۰/۴۸	۰/۴	۰/۲۸	۰/۳۹

¹ Fernandes

² Firu

³ Winkelhake

⁴ Nemeth & Peterkova

میزان سرمایه‌گذاری در پروژه‌های تحقیق و توسعه	۰/۳۲	۰/۴۴	۰/۵۲	۰/۴۳
یکپارچگی زنجیره تأمین صنعت خودرو	۰/۷۱	۰/۸۳	۰/۹۵	۰/۸۳
محدودیت‌های انتقال فناوری به کشور	۰/۵	۰/۶۲	۰/۷	۰/۶۱
میزان هوشمندی تولید در کشور و صنعت خودرو	۰/۷	۰/۸۲	۰/۹۳	۰/۸۲
وضعیت استارت‌آپ‌های فناوری‌های نوین در کشور	۰/۷۳	۰/۸۵	۰/۹۴	۰/۸۴
سیتم تحلیل ریسک و تکانه در صنعت خودرو	۰/۴۴	۰/۵۶	۰/۶۳	۰/۵۴
سیاست‌های نوآوری در صنعت خودرو	۰/۷۲	۰/۸۵	۰/۹۶	۰/۸۴
روش‌ها و فرایندهای یادگیری در صنعت خودرو	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۴۵	۰/۳۴
نظام جبران خدمات در صنعت خودرو	۰/۳۳	۰/۴۶	۰/۵۸	۰/۴۶
میزان بین‌المللی بودن زنجیره تأمین صنعت خودرو	۰/۷۳	۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۸۳
ساختار سازمانی در صنعت خودرو	۰/۲۱	۰/۳۶	۰/۴۱	۰/۳۳
میزان اتوماسیون و خودکار بودن فرایندها	۰/۷	۰/۸۲	۰/۹۳	۰/۸۲
میزان توجه به مشتری‌مداری در صنعت خودرو	۰/۲	۰/۳۳	۰/۴۲	۰/۳۲
میزان ارتباط صنعت خودرو با دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی	۰/۳۲	۰/۴۱	۰/۵۶	۰/۴۳
سیاست دیجیتال‌سازی شدن در صنعت خودرو	۰/۷۴	۰/۸۵	۰/۹۸	۰/۸۶
تحلیل‌های پیشرفته و پیش‌بینانه	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۴۲	۰/۳۴
اینترنت اشیاء صنعتی	۰/۲۹	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۳۷
پیوستگی زنجیره ارزش	۰/۴۱	۰/۵۶	۰/۶۹	۰/۵۵
تصمیم‌گیری داده‌محور در صنعت خودرو	۰/۷۴	۰/۸۶	۰/۹۵	۰/۸۵
منابع انسانی داده‌محور در صنعت خودرو	۰/۵	۰/۵۸	۰/۶۷	۰/۵۸
تفکر چابک و نوآورانه مدیران صنعت خودرو	۰/۴۴	۰/۵۶	۰/۷	۰/۵۷
مزایای ادراک شده صنعت ۴ توسط مدیران ارشد صنعت خودرو	۰/۴۶	۰/۵۸	۰/۶۹	۰/۵۸

پیشران‌هایی که عدد دیفازی آن‌ها بیشتر از ۰/۷ است برای رتبه‌بندی نهایی با کپراس انتخاب شدند. ۱۰ پیشران دارای عدد دیفازی بیشتر از ۰/۷ بودند و برای رتبه‌بندی نهایی در نظر گرفته شدند. جهت سنجش روایی محتوایی پیشران‌های پژوهش از ابزار لاوشه و ضریب نسبت روایی محتوایی پژوهش استفاده شد. در این پژوهش برای محاسبه ضریب نسبت روایی محتوایی یک پنل خبره ۱۰ نفره تشکیل شد. ضرایب نسبت روایی محتوایی پیشران‌های غربال شده در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. لیست پیشران‌های نهایی

پیشران‌های پژوهش	کد	منابع	ضرایب محتوایی
زیرساخت‌های فناوری اطلاعات	I ₁	کمبل، گوناسکاران و دون (2020)	۰/۷۴
میزان رقابتی شدن صنعت خودرو	I ₂	ورما و ونکاتسان (2021)	۰/۸۲
یکپارچگی زنجیره تأمین صنعت خودرو	I ₃	هلپر و همکاران (2019)	۰/۷
میزان هوشمندی تولید در کشور و صنعت خودرو	I ₄	سانچز، گارسا و کاتالونا (2019)	۰/۸۳
وضعیت استارت‌آپ‌های فناوری‌های نوین در کشور	I ₅	جنا و پاتل (2023)	۰/۸۵
سیاست‌های نوآوری در صنعت خودرو	I ₆	رازو و بابولی (2019)	۰/۸۸

پیشران‌های پژوهش	کد	منابع	ضرایب محتوایی
میزان بین‌المللی بودن زنجیره تأمین صنعت خودرو	I7	ابراهیمی و همکاران (2019)	۰/۸۴
میزان اتوماسیون و خودکار بودن فرایندها	I8	تورتولا، میوراندو و مک‌کاولی (2018)	۰/۷۶
سیاست دیجیتالی شدن در صنعت خودرو	I9	ژائو و همکاران (۲۰۱۹)، مکینجیج (2019)	۰/۸۲
تصمیم‌گیری داده‌محور در صنعت خودرو	I10	شهایی و همکاران (1400)	۰/۸۵

همان‌طور که جدول سه نشان می‌دهد ضریب محتوایی تمامی پیشران‌های غربال شده برای پزل ۱۰ نفره بالای ۰/۶۲ است که نشان از روایی محتوایی عوامل پژوهش است.

در ادامه، پیشران‌های غربال شده با روش کپراس، رتبه‌بندی شدند. ماتریس تصمیم بر مبنای نظرات خبرگان صنعت خودرو در باب پیشران‌های غربال شده با در نظر گرفتن شاخص‌ها بدست آمد. شاخص‌های ارزیابی پیشران‌ها در این پژوهش عبارتند از: شدت اهمیت، میزان قطعیت و سطح تخصص خبرگان. این شاخص‌ها از تحقیقات موثق آینده‌پژوهی و رویکرد شبکه جهانی کسب و کار استخراج شد.

جدول زیر ماتریس میانگین نظر ۱۰ خبره را در باب اهمیت ۱۰ پیشران غربال شده نشان می‌دهد. خبرگان نظرات خود را در یک طیف ۱۰ تایی از اهمیت بسیار کم تا بسیار زیاد در مورد پیشران‌ها بر اساس شاخص‌های شدت اهمیت، میزان قطعیت و تخصص خبرگان بیان نمودند. در انتها نظرات خبرگان با بهره‌گیری از میانگین حسابی تلفیق شد. جدول ۴-۵، میانگین نظرات خبرگان در باب پیشران‌های غربال شده را بر اساس شاخص‌های سه‌گانه به تصویر کشیده است. برای رتبه‌بندی پیشران‌ها در ابتدا بایستی وزن نظرات خبرگان بدست آید. وزن تمامی شاخص‌ها، یکسان و برابر با ۰/۳۳ در نظر گرفته شد.

جدول ۴. ماتریس میانگین نظرات خبرگان

میزان تخصص خبرگان	میزان قطعیت	شدت اهمیت	پیشران‌ها
۴/۱۲	۷/۵	۳/۸	I1
۷/۶	۵/۱۴	۷/۹۳	I2
۳/۱	۷/۴۳	۲/۸	I3
۷/۱	۶/۲	۶/۸	I4
۴/۹	۷/۲	۵/۸	I5
۶/۹۸	۵/۸	۷/۲	I6
۹/۷	۳/۷	۹/۲۵	I7
۵/۳۲	۷/۴۳	۴/۶	I8
۸/۳	۴/۸	۸/۷	I9
۸/۹۵	۴/۲۳	۹/۲	I10
۶۶/۰۷	۵۹/۴۳	۶۶/۰۸	جمع ستونی

سپس باید مقادیر ماتریس میانگین، نرمال شوند. برای نرمال کردن داده ها، هر یک از مقادیر ماتریس تصمیم بر جمع ستونی این ماتریس بخش می شود. جدول شماره پنج، مقادیر ماتریس نرمال را نشان می دهد.

جدول ۵. ماتریس نرمال

میزان تخصص خبرگان	میزان قطعیت	شدت اهمیت	پیشران ها
۰/۰۶۲	۰/۱۲۶	۰/۰۵۸	I ₁
۰/۱۱۵	۰/۰۸۶	۰/۱۲	I ₂
۰/۰۴۷	۰/۱۲۵	۰/۰۴۲	I ₃
۰/۱۰۷	۰/۱۰۴	۰/۱۰۳	I ₄
۰/۰۷۴	۰/۱۲۱	۰/۰۸۸	I ₅
۰/۱۰۶	۰/۰۹۸	۰/۱۰۹	I ₆
۰/۱۴۷	۰/۰۶۲	۰/۱۴	I ₇
۰/۰۸۱	۰/۱۲۵	۰/۰۷	I ₈
۰/۱۲۶	۰/۰۸۱	۰/۱۳۲	I ₉
۰/۱۳۵	۰/۰۷۱	۰/۱۳۹	I ₁₀

پس از تعیین وزن شاخص های ارزیابی پیشران ها، به سهولت می توان میزان اولویت هر پیشران را معین نمود. در این راستا باید مقادیر ماتریس نرمال را در وزن شاخص های ارزیابی پیشران ها ضرب نمود. ماتریس حاصل شده، ماتریس نرمال موزون است. جدول شماره شش، مقادیر ماتریس نرمال موزون را برای پیشران های آینده صنعت ۴ در حوزه خودرو نشان می دهد. همچنین باید در نظر گرفت که دو شاخص شدت اهمیت و میزان تخصص خبرگان دارای ماهیت مطلوب و افزایشی بوده و شاخص میزان قطعیت هم دارای ماهیت منفی و کاهشی است .

جدول ۶. مقادیر ماتریس نرمال موزون

میزان تخصص خبرگان	میزان قطعیت	شدت اهمیت	پیشران ها
۰/۰۲	۰/۰۴۲	۰/۰۱۹	I ₁
۰/۰۳۸	۰/۰۲۸	۰/۰۴	I ₂
۰/۰۱۶	۰/۰۴۱	۰/۰۱۴	I ₃
۰/۰۳۵	۰/۰۳۴	۰/۰۳۴	I ₄
۰/۰۲۴	۰/۰۴	۰/۰۲۹	I ₅
۰/۰۳۵	۰/۰۳۲	۰/۰۳۶	I ₆
۰/۰۴۹	۰/۰۲	۰/۰۴۶	I ₇
۰/۰۲۷	۰/۰۴۱	۰/۰۲۳	I ₈

I_9	۰/۰۴۴	۰/۰۲۷	۰/۰۴۲
I_{10}	۰/۰۴۶	۰/۰۲۳	۰/۰۴۵

مقادیر S_{j+} و S_{j-} بر اساس فرمول‌های مرحله چهارم، بدست می‌آیند. مقدار اهمیت نسبی Q_j هر پیشران بر اساس دو شاخص S_{j+} و S_{j-} با توجه به فرمول گام پنجم محاسبه می‌شود. هرچه مقدار Q_j برای پیشرانی بالاتر باشد، آن پیشران اهمیت بیشتری خواهد داشت. در انتها شاخص N_j از تقسیم اهمیت نسبی هر پیشران بر بیشترین مقدار Q_j ضرب در عدد ۱۰۰ حساب می‌شود. هرچه این عدد بیشتر باشد، پیشران موردنظر اهمیت و اولویت بیشتری خواهد داشت. جدول شماره هفت، شاخص‌های روش کپراس را برای هر پیشران آورده است.

جدول ۷. شاخص‌های ارزیابی روش کپراس

پیشران‌ها	S_{j+}	S_{j-}	Q_j	N_j	رتبه پیشران
I_1	۰/۰۳۹	۰/۰۴۲	۰/۰۶۳	۴۳/۱۵۱	۹
I_2	۰/۰۷۸	۰/۰۲۸	۰/۱۱۴	۷۸/۰۸۲	۴
I_3	۰/۰۳	۰/۰۴۱	۰/۰۵۵	۳۷/۶۷۱	۱۰
I_4	۰/۰۶۹	۰/۰۳۴	۰/۰۹۹	۶۷/۸۰۸	۶
I_5	۰/۰۵۳	۰/۰۴	۰/۰۷۸	۵۳/۴۲۵	۷
I_6	۰/۰۷۱	۰/۰۳۲	۰/۱۰۳	۷۰/۵۴۸	۵
I_7	۰/۰۹۵	۰/۰۲	۰/۱۴۶	۱۰۰	۱
I_8	۰/۰۵	۰/۰۴۱	۰/۰۷۵	۵۱/۳۷	۸
I_9	۰/۰۸۶	۰/۰۲۷	۰/۱۲۳	۸۴/۲۴۷	۳
I_{10}	۰/۰۹۱	۰/۰۲۳	۰/۱۳۵	۹۲/۴۶۶	۲

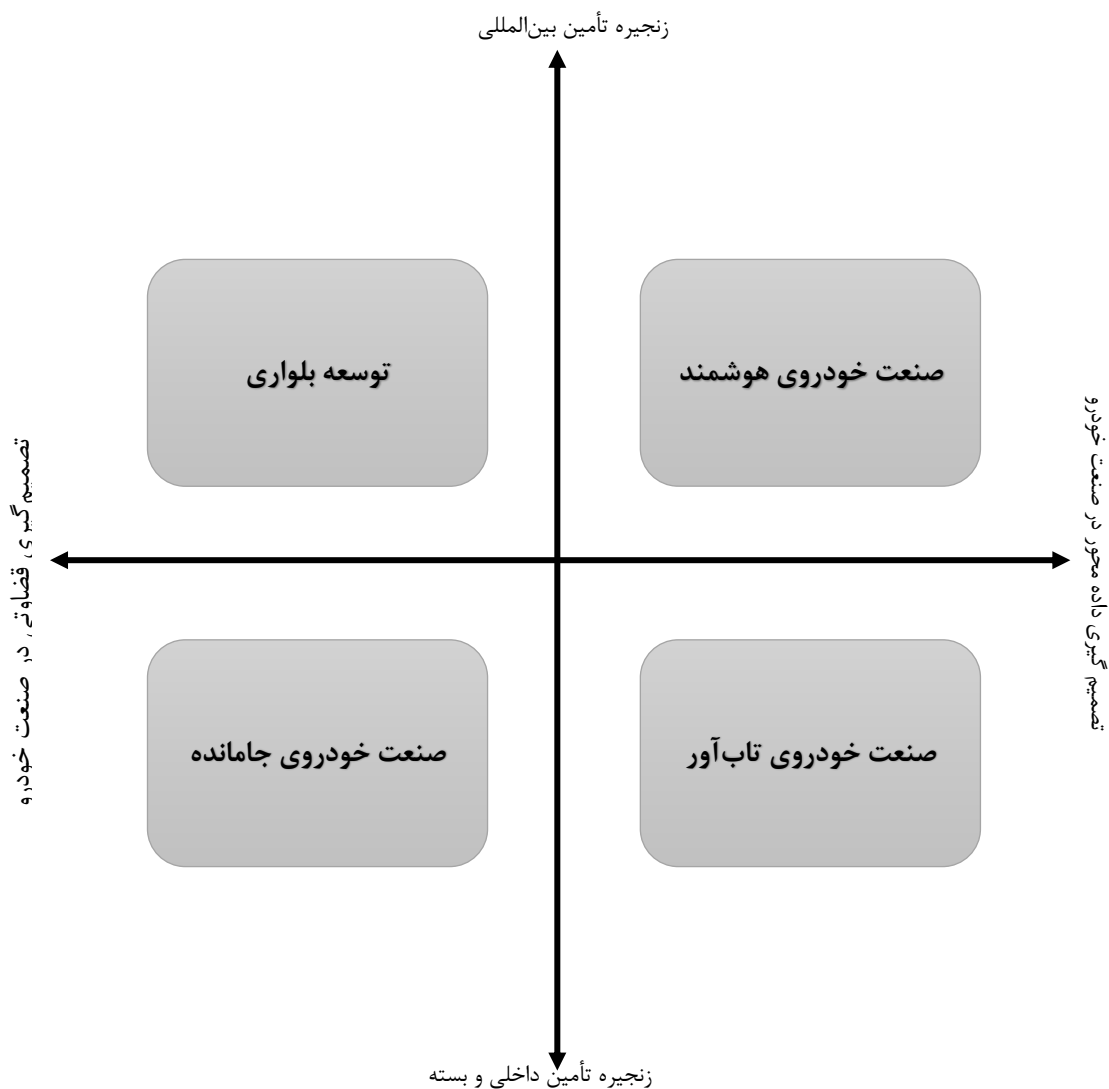
با توجه به نتایج جدول هفت، پیشران‌های میزان بین المللی بودن زنجیره تأمین صنعت خودرو، تصمیم‌گیری داده‌محور در صنعت خودرو، سیاست دیجیتالی شدن در صنعت خودرو و میزان رقابتی شدن صنعت خودرو به ترتیب دارای بیشترین اولویت از نظر اثرگذاری روی آینده صنعت نسل چهارم در بخش خودرو هستند.

سناریوهای پژوهش

بر مبنای نتایج روش کپراس، پیشران‌های میزان بین المللی بودن زنجیره تأمین صنعت خودرو و تصمیم‌گیری داده‌محور در صنعت خودرو، بیشترین درجه اهمیت و اولویت را داشتند و برای تدوین سناریوهای پژوهش در نظر گرفته شدند. نظر به این که برای هر پیشران، دو حالت متضاد می‌توان در نظر گرفت، چهار سناریو توسعه یافت. این سناریوها عبارتند از: صنعت خودروی هوشمند، توسعه بلواری، صنعت خودروی تاب‌آور و صنعت خودروی جامانده.

برای تدوین سناریوها، رویکرد پست‌مدرن پاندا استفاده شد. در ابتدا رهبر بحث، موضوع و اهداف پژوهش را به اطلاع خبرگان رساند. البته خبرگان از قبل به علت تکمیل پرسشنامه‌های پژوهش به طور کامل در جریان تحقیق و اهداف آن

بودند. سپس از هر یک از خبرگان خواسته شد تا به طور آزاد و بدون پیش فرض نظرات خود را در مورد آینده صنعت خودرو با تمرکز بر صنعت نسل چهارم بیان کنند. در این مرحله محدودیتی برای بیان نظرات وجود نداشت. در ادامه و در فاز مباحثه با در نظر گرفتن دو پیشران اولویت دار نهایی یعنی (میزان بین المللی بودن زنجیره تأمین صنعت خودرو و تصمیم گیری داده محور در صنعت خودرو)، بحث ها به صورت دیالکتیکی پیش رفت. در روش دیالکتیکی نظرات مختلف با هم ترکیب شده و به یک نظر واحد تبدیل می شوند. ترکیب نظرات توسط رهبر بحث انجام شد. همچنین در مرحله دوم، به علت مبنا قرار دادن پیشران های نهایی، سناریوها راحت تر معین شدند.



شکل ۱. سناریوهای پژوهش

الف) سناریوی صنعت خودروی هوشمند: در این سناریو به علت حرکت اقتصاد کشور به سمت باز شدن و حضور در بازارهای جهانی، صنعت خودرو هم رقابتی‌تر شده و برای خواسته‌های مشتریان اهمیت و ارزش قائل خواهد شد. در این سناریو، صنعت خودرو از فضای ایجاد شده برای واردات فناوری‌های دیجیتالی و دانش لازم استفاده خواهد کرد. ورود دانش و فناوری‌های جدید به دیجیتالی شدن ساختار و خودکار شدن فرایندها کمک خواهد کرد. همچنین در این سناریو صنعت خودروسازی با اتخاذ سیاست نوآوری باز، از ظرفیت‌های استارت‌آپ‌ها برای تحقیق و توسعه استفاده خواهد کرد. اتخاذ رویکرد نوآوری باز، نیازمند بکارگیری سبک تصمیم‌گیری داده محور در تمام سطوح است. در این سناریو شرکت‌های خودروسازی داده‌های خود را در اختیار استارت‌آپ‌ها و مراکز پژوهشی بیرون قرار می‌دهند و نهادهای بیرونی از این داده‌ها برای توسعه محصولات و خدمات جدید استفاده می‌کنند. در این آینده یک شبکه همکاری گسترده بین شرکت‌های خودروسازی، استارت‌آپ‌ها، دانشگاه‌ها و حتی شرکت‌های خودروساز خارجی ایجاد می‌شود.

در این آینده فرهنگ سازمانی گشوده بوده و پذیرای تغییرات جدید است. فرهنگ‌سازی حامی تغییر باعث تسری سبک داده‌محور در تمامی حوزه‌ها و فرایندهای تولیدی، بازاریابی و منابع انسانی خواهد شد. علاوه بر فرهنگ سازمانی، توسعه زیرساخت‌های فناوری هم باعث پیشرفت این نوع از تصمیم‌گیری در صنعت خودرو خواهد شد. این نوع از تصمیم‌گیری باعث چابکی ساختار، افزایش سرعت تصمیم‌گیری، کاهش خطا و رقابتی‌تر شدن این صنعت می‌شود. این سناریو ایدئال بوده و بهترین وضعیت را در آینده صنعت خودرو به تصویر می‌کشد.

ب) سناریوی توسعه بلواری: در این سناریو، کاهش محدودیت‌های بین‌المللی و همکاری صنعت خودرو با شرکت‌های خارجی منجر به تحولات ساختاری نخواهد شد. در حقیقت گشایش‌ها موردی و به صورت ظاهری و فیزیکی خواهد بود. نوع همکاری با شرکت‌های خارجی منجر به شکل‌گیری یک زنجیره تأمین پایدار جهانی نشده و انحصار در صنعت خودرو باقی خواهد ماند. چنین فضایی باعث خواهد شد تا جذابیتی برای شرکت‌های خارجی برای حضور و همکاری بلندمدت ایجاد نشود.

مهم‌ترین مانع در این سناریو، سبک سنتی تصمیم‌گیری مدیران و کارشناسان صنعت خودرو است. این نوع از تصمیم‌گیری باعث می‌شود تا در صنعت خودروسازی، فرایندهای خودکار و سیستماتیکی برای بررسی و حل مسائل در حوزه‌های مختلف وجود نداشته باشد. حاکمیت این نوع از تصمیم‌گیری اجازه ورود فناوری‌های پیشرفته نسل چهارم را به صنعت خودرو نخواهد داد. همچنین در صورت ورود برخی از این فناوری‌ها، به علت دانش ضعیف مدیران و کارکنان و آماده نبودن زیرساخت‌ها، استفاده از آن‌ها حالت کاریکاتوری و نمایشی خواهد داشت.

در این سناریو سطح هوشمندی و یکپارچگی زنجیره تأمین پایین بوده و موردی و پراکنده است. در حقیقت برخی بخش‌ها به سمت هوشمندی و یکپارچگی حرکت کرده و بسیاری از بخش‌ها هم از این تغییرات استقبال نخواهند کرد. در این سناریو شبکه سازی صنعت خودرو با نهادهای خارجی بسیار ضعیف است و شرکت‌های خودروسازی تلاشی برای بومی و پایدار کردن دانش و فناوری‌های اکتساب شده نمی‌کنند.

ج) سناریوی صنعت خودروی تاب‌آور: این سناریو هم مانند سناریوی قبلی بینابینی است. در این سناریو به علت محدودیت‌های خارجی امکانی برای ورود فناوری‌ها و دانش پیشرفته صنعت نسل چهارم از کشورهای پیشرفته وجود ندارد. با این حال شرکت‌های خودروسازی تلاش می‌کنند تا با اتخاذ رویکرد نوآوری باز و همکاری‌های استراتژیک با استارت‌آپ‌ها، تا حد ممکن به سمت خودکارسازی فرایندها و دیجیتالی شدن صنعت خودرو حرکت کنند.

در این سناریو شرکت‌های خودروسازی در داخل کشور همکاری‌های گسترده‌ای در حوزه تحقیق و توسعه دارند و این مطلب باعث می‌شود تا هزینه‌های توسعه محصولات و فناوری‌های جدید به میزان زیادی برای آن‌ها کاهش یابد. در این آینده مدیران صنعت خودرو مزایای فناوری‌های نسل چهارم مثل کلان‌داده‌ها و اینترنت اشیا را به خوبی درک خواهند کرد. این تغییرات باعث بهبود نسبی رضایت مشتریان خواهد شد ولی باید در نظر داشت که تغییرات اساسی نیازمند یکپارچگی با شرکت‌ها و زنجیره خودرو در مقیاس بین‌المللی است.

در این آینده با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در صنعت خودروی داخلی مسئله انحصار همچنان پابرجا است. در حقیقت لازمه هوشمندی کامل فرایندها و ساختارها، حضور در بازارهای بین‌المللی و رقابتی شدن کامل صنعت خودرو است. همچنین این مطلب را باید در نظر داشت که با وجود امکان استفاده از توانمندی‌های استارت‌آپ‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان داخلی برای هوشمندسازی و یکپارچگی زنجیره تأمین، عدم همکاری با شرکت‌های خارجی باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود. در بسیاری از مواقع به دلیل نبود بستر و زیرساخت لازم در مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی کشور و فقدان تخصص‌های مورد نیاز اصلاً امکان پیشرفت وجود نخواهد داشت.

در این سناریو شرکت‌های خودروسازی از قابلیت‌های فناوری‌های نسل چهارم به میزان زیادی برای شناسایی و تحلیل ریسک‌های موجود و آینده استفاده خواهند کرد. شناسایی و تحلیل این ریسک‌ها به تاب‌آوری صنعت خودرو کمک زیادی خواهد کرد. به نظر می‌رسد فناوری بلاک چین به علت ماهیت غیرمتمرکز آن به میزان زیادی مورد توجه صنایع خودروسازی کشور قرار خواهد گرفت. علاوه بر این فناوری، فناوری کلان‌داده هم به علت کاربرد آن در تحلیل ریسک‌ها به میزان زیادی مورد توجه شرکت‌های خودروساز ایرانی قرار خواهد گرفت.

(د) سناریوی صنعت خودروی جامانده: این سناریو بدترین وضعیت را برای آینده صنعت خودرو نشان می‌دهد. از طرفی به علت محدودیت‌های گسترده خارجی و عدم امکان انتقال دانش و فناوری به داخل کشور نه تنها زیرساخت‌ها و فناوری‌های جدید به این صنعت تزریق نشده است، بلکه حتی زیرساخت‌ها و تجهیزات قدیمی فرسوده هم شده‌اند. در این سناریو به علت شرایط منفی صنعت به‌ویژه صنعت خودرو بسیاری از نخبگان این حوزه به خارج کشور مهاجرت کرده‌اند. این میل به مهاجرت در بین استارت‌آپ‌های ایرانی هم زیاد است.

در این سناریو شدت رقابت پایین است و شرکت‌های خودروسازی به علت انحصار به نیازهای مشتریان اهمیتی نمی‌دهند. در این سناریو علاوه بر محدودیت‌های بیرونی، در داخل کشور هم از سمت خودروسازان تلاشی برای بهبود و تاب‌آوری دیده نمی‌شود. خودروسازان فاقد یک شبکه همکاری منسجم بوده و در جزایر جداگانه‌ای زندگی می‌کنند. در این آینده به علت شرایط نامطلوب نهادی و محیطی، بسیاری از استارت‌آپ‌ها به دنبال مهاجرت بوده و تمایلی به همکاری ندارند. خودروسازان هم با یک گارد بسته تمایلی به همکاری با شرکت‌های دانش‌بنیان و استارت‌آپ‌ها ندارند.

سیستم تصمیم‌گیری در این آینده سنتی و قضاوتی بوده و در حوزه‌های مختلف مثل منابع انسانی، بازاریابی، تولید و مالی از ظرفیت فناوری‌های داده‌محور استفاده نمی‌شود. در این آینده ساختار سازمانی صنعت خودرو و شرکت‌های آن بسیار سخت و کند بوده و این شرکت‌ها نسبت به تغییرات منطقه‌ای و جهانی بی‌تفاوت هستند. در این سناریو به دلیل ضعف در اتوماسیون و خودکارسازی فرایندها، تغییرات نسبت به شوک‌ها و تکان‌های بیرونی بسیار کند و ضعیف است. تمام این مسائل و چالش‌ها باعث سقوط پی در پی تولید، افت رقابت‌پذیری، جا ماندن از بازارهای جهانی و عدم رضایت مشتریان به همراه ارائه مدل‌ها و محصولات قدیمی خواهد شد.

در این آینده سطح آموزش و مهارت کارکنان پایین بوده و دواير آموزشی شرکت‌های خودروسازی به آموزش فناوری‌های جدید و دانش‌های کلیدی اهمی ندارند. علاوه بر سطح پایین دانش و مهارت کارکنان، خروج از خدمت هم از شرکت‌های خودروسازی بسیار بالاست.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف آینده‌پژوهی صنعت خودرو با تمرکز بر دستاوردهای صنعت نسل چهارم انجام شد. نتایج نشان داد که آینده این صنعت به شدت تحت تأثیر تحول دیجیتال، یکپارچگی زنجیره تأمین و گذار از تصمیم‌گیری‌های سنتی به تصمیم‌گیری داده‌محور قرار دارد. در گام نخست، ۳۲ پیشران از طریق مرور ادبیات استخراج شد که پس از غربال‌گری با روش دلفی فازی، ۱۰ پیشران کلیدی برای تحلیل نهایی انتخاب گردید. در ادامه، با استفاده از روش کپراس، این پیشران‌ها اولویت‌بندی شدند و در نهایت بر اساس رویکرد سناریونویسی، چهار سناریوی «صنعت خودروی هوشمند»، «توسعه بلواری»، «صنعت خودروی تاب‌آور» و «صنعت خودروی جامانده» شکل گرفت.

از منظر تحلیلی، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که دو پیشران «بین‌المللی بودن زنجیره تأمین صنعت خودرو» و «تصمیم‌گیری داده‌محور» نقش محوری در شکل‌دهی آینده این صنعت دارند. این نتیجه با ادبیات جهانی صنعت ۴ هم‌راستا است؛ به‌طوری که مطالعات نشان می‌دهند بدون یکپارچگی زنجیره تأمین و استفاده از تحلیل‌های داده‌محور، تحقق واقعی صنعت چهار در صنایع تولیدی امکان‌پذیر نخواهد بود. همچنین سایر پیشران‌ها نظیر هوشمندسازی تولید، دیجیتالی‌سازی فرایندها، توسعه استارت‌آپ‌ها و سیاست‌های نوآوری باز، نقش تقویتی در تسریع یا تضعیف این دو محور اصلی ایفا می‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ساختار آینده صنعت خودرو بیش از آنکه تابع فناوری‌های منفرد باشد، تابع اکوسیستم تصمیم‌گیری و تعاملات شبکه‌ای است.

از سوی دیگر، نتایج سناریوسازی نشان داد که سناریوی مطلوب (صنعت خودروی هوشمند) در گرو تحقق هم‌زمان چند پیش‌شرط کلیدی شامل توسعه زیرساخت‌های داده، افزایش شفافیت در زنجیره تأمین، و ارتقای سطح همکاری‌های بین‌المللی است. در مقابل، سناریوی نامطلوب (صنعت خودروی جامانده) نشان می‌دهد که در صورت تداوم وضعیت فعلی، فاصله صنعت خودرو با استانداردهای صنعت ۴ افزایش خواهد یافت. این یافته بیانگر آن است که آینده صنعت خودرو در ایران نه یک روند خطی، بلکه مجموعه‌ای از مسیرهای واگرا و وابسته به تصمیمات سیاستی و سازمانی است. از منظر دستاوردهای پژوهش، این مطالعه چند نوآوری اصلی دارد. نخست، ارائه یک چارچوب ترکیبی آینده‌پژوهی شامل دلفی فازی، کپراس و سناریونویسی است که امکان تحلیل چندبعدی و ساختاریافته آینده صنعت خودرو را فراهم کرده است. دوم، شناسایی پیشران‌های کلیدی با تمرکز بر صنعت ۴ در بستر ایران است که می‌تواند به پر کردن شکاف ادبیات داخلی در حوزه آینده‌پژوهی صنعتی کمک کند. سوم، تمرکز بر پیوند میان زنجیره تأمین بین‌المللی و تصمیم‌گیری داده‌محور به عنوان دو محور اصلی تحول، که می‌تواند مبنای تدوین سیاست‌های صنعتی در سطح کلان قرار گیرد. در پایان، این پژوهش نشان می‌دهد که موفقیت در گذار به صنعت خودروی هوشمند، بیش از فناوری، به بلوغ مدیریتی و نهادی وابسته است.

در بخش پیشنهادها، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که صنعت خودرو برای حرکت به سمت آینده مطلوب باید مجموعه‌ای از اقدامات هماهنگ را دنبال کند. در سطح سازمانی، توسعه فرهنگ داده‌محور، آموزش مدیران و کارکنان در حوزه تحلیل داده و فناوری‌های دیجیتال و کاهش مقاومت در برابر تغییر ضروری است. در سطح زیرساختی، سرمایه‌گذاری در فناوری اطلاعات، یکپارچه‌سازی سیستم‌های اطلاعاتی و توسعه زیرساخت‌های کلان‌داده نقش حیاتی

دارد. همچنین حرکت به سمت نوآوری باز، همکاری با استارت‌آپ‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان و مراکز دانشگاهی می‌تواند ظرفیت نوآوری صنعت خودرو را افزایش دهد. از منظر سیاستی نیز، افزایش شفافیت، ارتقای حکمرانی داده‌محور و اصلاح ساختارهای نهادی به سمت رقابت‌پذیری بیشتر از الزامات کلیدی محسوب می‌شود.

با وجود این نتایج، پژوهش حاضر دارای محدودیت‌هایی است. نخست، تمرکز مطالعه بر صنعت خودرو باعث محدود شدن قابلیت تعمیم نتایج به سایر صنایع شده است. دوم، استفاده از تعداد محدود پیشران‌ها در سناریوسازی (دو پیشران کلیدی) می‌تواند دامنه تنوع سناریوها را کاهش دهد. سوم، برابر در نظر گرفتن وزن شاخص‌ها ممکن است دقت نتایج در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین اتکای قابل توجه به داده‌های قضاوتی خبرگان، هرچند با روش فازی کنترل شده، همچنان می‌تواند نوعی سوگیری ادراکی ایجاد کند.

دست آخر، برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده‌پژوهی در سایر صنایع به‌ویژه صنایع خدماتی و تولیدی دیگر انجام شود تا امکان مقایسه بین‌بخشی فراهم گردد. همچنین استفاده از تعداد بیشتری از پیشران‌ها در طراحی سناریوها، به کارگیری روش‌های ترکیبی پیشرفته‌تر مانند BWM برای وزن‌دهی معیارها، و استفاده از روش‌های کیفی عمیق‌تر مانند تحلیل تم یا تحلیل لایه‌ای علت‌ها می‌تواند به غنای نتایج کمک کند. علاوه بر این، بررسی تجربی پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴ در سطح شرکت‌های خودروسازی داخلی می‌تواند مسیر تحقیقات کاربردی آینده را تقویت نماید.

منابع پژوهش

- زراوشانی، و. (۱۳۹۹). ایمنی و سلامت شغلی و پاسخ به کووید ۱۹ با استفاده از فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم. *بهداشت و ایمنی کار*. ۱۰ (۴)، ۳۴۸-۳۲۹.
- شریف پور، ح.، آقاجانی، ح. ع.، و صفایی قادیکلایی، ع. ح. (۱۳۹۹). بررسی روابط تعاملی تکنولوژی‌های صنعت نسل چهارم در صنایع غذایی منتخب با رویکرد دیمتل تجدید نظر شده. *تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات*، ۵ (۲)، ۱۶۶-۱۵۱.
- شهبابی، و.، آذر، ع.، فائزی رازی، ف.، و فلاح شمس، م. ف. (۱۴۰۰). مدلسازی تأثیر انقلاب صنعتی چهارم بر زنجیره تأمین خدمات بانکی با استفاده از رویکرد پویایی سیستم و تکنیک دیماتل فازی. *نشریه علمی پژوهشی مدیریت کسب و کارهای بین‌المللی*، ۴ (۱)، ۶۷-۸۹. doi: 10.22034/jiba.2021.43213.1589
- Ahmadi, M., Rousta, A., Maleki, M. H., & Asayesh, F. (2022). Future Study of Marketing in the Banking Industry with a focus on Blockchain Technology. *Journal of System Management*, 5(4), 133.
- Bai, C., & Sarkis, J. (2020). A supply chain transparency and sustainability technology appraisal model for blockchain technology. *International Journal of Production Research*, 58(7), 2142-2162.
- Brozzi, R., Forti, D., Rauch, E., & Matt, D. T. (2020). The advantages of industry 4.0 applications for sustainability: results from a sample of manufacturing companies. *Sustainability*, 12(9), 3647.
- Chauhan, A., & Vimala Rani, M. (2026). Resilient supply chains in the automotive industry: a risk prioritization framework for electric and traditional vehicles in Industry 4.0. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 75(2), 353-374.
- Cheng, G. J., Liu, L. T., Qiang, X. J., & Liu, Y. (2016, June). Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing. In *2016 international conference on information system and artificial intelligence (ISAI)* (pp. 407-410). IEEE.

- Ebrahimi, M., Baboli, A., & Rother, E. (2019). The evolution of world class manufacturing toward Industry 4.0: A case study in the automotive industry. *Ifac-Papersonline*, 52(10), 188-194.
- Fernandes, J., Reis, J., Melão, N., Teixeira, L., & Amorim, M. (2021). The role of Industry 4.0 and BPMN in the arise of condition-based and predictive maintenance: A case study in the automotive industry. *Applied Sciences*, 11(8), 3438.
- Firu, A. C., Tapîrdea, A. I., Feier, A. I., & Drăghici, G. (2021). Virtual reality in the automotive field in industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4177-4182.
- Gruber, F. E. (2013, October). Industry 4.0: A best practice project of the automotive industry. In *IFIP international conference on digital product and process development systems* (pp. 36-40). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Habibi, A., Sarafrazi, A., & Jahantigh, F. F. (2015). Fuzzy Delphi technique for forecasting and screening items. *Asian journal of research in business economics and management*, 5(2), 130.
- Helper, S., Martins, R., & Seamans, R. (2019). Who profits from industry 4.0? theory and evidence from the automotive industry. *Theory and Evidence from the Automotive Industry* (January 31, 2019). NYU Stern School of Business.
- Imran, R., & Ullah, K. (2025). Circular intuitionistic fuzzy EDAS approach: A new paradigm for decision-making in the automotive industry sector. *Spectrum of Engineering and Management Sciences*, 3(1), 76-92.
- Jena, A., & Patel, S. K. (2023). A hybrid fuzzy based approach for industry 4.0 framework implementation strategy and its sustainability in Indian automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, 138369.
- Kabasakal, I., Keskin, F. D., Ventura, K., & Soyuer, H. (2017). From mass customization to product personalization in automotive industry: potentials of industry 4.0. *Journal of Management Marketing and Logistics*, 4(3), 244-250.
- Kamble, S., Gunasekaran, A., & Dhone, N. C. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1319-1337.
- Khan, M. I., Yasmeen, T., Khan, M., Hadi, N. U., Asif, M., Farooq, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2025). Integrating industry 4.0 for enhanced sustainability: Pathways and prospects. *Sustainable Production and Consumption*, 54, 149-189.
- Khan, T., & Emon, M. M. H. (2025). Supply chain performance in the age of Industry 4.0: evidence from manufacturing sector. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 22(1), 2434-2434.
- Krishnan, R., Phan, P. Y., Krishnan, S. N., Agarwal, R., & Sohal, A. (2025). Industry 4.0-driven business model innovation for supply chain sustainability: An exploratory case study. *Business Strategy and the Environment*, 34(1), 276-295.
- Krishnan, R., Phan, P. Y., Krishnan, S. N., Agarwal, R., & Sohal, A. (2025). Industry 4.0-driven business model innovation for supply chain sustainability: An exploratory case study. *Business Strategy and the Environment*, 34(1), 276-295.
- Ligarski, M. J., Rożałowska, B., & Kalinowski, K. (2021). A study of the human factor in industry 4.0 based on the automotive industry. *Energies*, 14(20), 6833.
- Liu, H., Zhang, B., Wu, V., Yang, X., & Wang, L. (2025). Review of digital twin in the automotive industry on products, processes and systems. *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*, 4(1), 6.
- Maleki, M. H., Bahnamiri, M. J. Z., & Dadashi, I. (2022). A Framework for Identifying and Analyzing Drivers Affecting the Futures of Cryptocurrency FinTechs in Iran with Fuzzy Delphi and Fuzzy Dematel. *Fuzzy Optimization and Modeling Journal (FOMJ)*, 3(4), 37-50.

- Maleki, M. H., Nasrollahi, M., & Mohammadi, Z. (2025). Identifying and Prioritizing Drivers Affecting the Future of the Healthcare Supply Chain with a Focus on Fourth-Generation Technologies. *Journal of Foresight and Health Governance*, 2(3), 1-13.
- Malik, A. A., Masood, T., & Kousar, R. (2020). Repurposing factories with robotics in the face of COVID-19. *Science Robotics*, 5(43).
- Mekinjić, B. (2019). The impact of industry 4.0 on the transformation of the banking sector. *Journal of contemporary economics*, 1(1).
- Morales Matamoros, O., Takeo Nava, J. G., Moreno Escobar, J. J., & Ceballos Chávez, B. A. (2025). Artificial intelligence for quality defects in the automotive industry: A systemic review. *Sensors*, 25(5), 1288.
- Mrugalska, B., & Wyrwicka, M. K. (2017). Towards lean production in industry 4.0. *Procedia engineering*, 182, 466-473.
- Nemeth, M., & Peterkova, A. (2018, June). Proposal of data acquisition method for industrial processes in automotive industry for data analysis according to Industry 4.0. In *2018 IEEE 22nd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)* (pp. 000157-000162). IEEE.
- Ojubanire, O. A., Marhraoui, M. A., Sebti, H., & Berbain, S. (2026). Industry 4.0 in Africa: challenges and opportunities in the Moroccan and Nigerian automotive industries. *International Journal of Lean Six Sigma*, 17(2), 511-541.
- Rani, P., Mishra, A. R., Tirkolaee, E. B., Alshamrani, A. M., & Alrasheedi, A. F. (2025). Pythagorean fuzzy comprehensive distance-based ranking approach for assessing industry 4.0 adoption strategies in the automotive manufacturing sector. *Advanced Engineering Informatics*, 65, 103359.
- Rizvi, S. W. H., Agrawal, S., & Murtaza, Q. (2023). Automotive industry and industry 4.0- Circular economy nexus through the consumers' and manufacturers' perspectives: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113517.
- Rother, E., & Baboli, A. (2019, April). Lean Manager in the Factory of the Future: Case study in automotive industry. In *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)* (pp. 218-224). IEEE.
- Sanchez-Franco, M. J., Cepeda-Carrion, G., & Roldán, J. L. (2019). Understanding relationship quality in hospitality services: A study based on text analytics and partial least squares. *Internet Research*.
- Sordan, J. E., Oprime, P. C., Pimenta, M. L., Andersson, R., Antony, J., Garza-Reyes, J. A., & Luz Tortorella, G. (2025). Lean Six Sigma practices supported by Industry 4.0 technologies: evidence from heavy vehicle manufacturers. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 36(2), 504-533.
- Sunny, S. R. (2025). AI-driven defect prediction for aerospace composites using Industry 4.0 technologies. *Zenodo Preprint*.
- Thames, L., & Schaefer, D. (2017). *Cybersecurity for industry 4.0*. Heidelberg: Springer.
- Tortorella, G., Miorando, R., & Mac Cawley Vergara, A. F. (2019). The moderating effect of Industry 4.0 on the relationship between lean supply chain management and performance improvement.
- Verma, A., & Venkatesan, M. (2021). Industry 4.0 workforce implications and strategies for organisational effectiveness in Indian automotive industry: a review. *Technology Analysis & Strategic Management*, 1-9.
- Wang, L., & Wang, G. (2016). Big data in cyber-physical systems, digital manufacturing and industry 4.0. *International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM)*, 6(4), 1-8.
- White, L., & Taket, A. (1997). Beyond appraisal: Participatory appraisal of needs and the development of action (PANDA). *Omega*, 25(5), 523-534.

Winkelhake, U., Winkelhake, & Schilgerius. (2018). *Digital transformation of the automotive industry*. New York, NY: Springer International Publishing AG.

Zhao, G., Liu, S., Lopez, C., Lu, H., Elgueta, S., Chen, H., & Boshkoska, B. M. (2019). Blockchain technology in agri-food value chain management: A synthesis of applications, challenges and future research directions. *Computers in Industry*, 109, 83-99.