



Identification and Neutrosophic Structural Modeling of Sustainable Production System Challenges in Iran's Petrochemical Industry

Amin Askari*

Mohsen Jalali Majidi**

Arnoosh Shakeri***

Hossein Shirazi****

Extended Abstract

Introduction: Increasing environmental pressures, institutional requirements, and global competitiveness have compelled energy-intensive industries to move toward sustainable production systems. The Iranian petrochemical industry, as a key pillar of the national economy and a major resource consumer and polluter, faces multifaceted challenges in adopting such systems. Despite extensive literature on sustainable production, a localized and structured framework for systematically analyzing these challenges and clarifying their causal and hierarchical relationships in Iran's petrochemical industry remains underdeveloped. Therefore, this study aims to identify, screen, and design a neutrosophic structural model of the challenges of sustainable production systems in this industry and to explain the influence–dependence relationships among their dimensions under uncertainty.

Methods: This research is applied–developmental in purpose and analytical in nature and was conducted through a two-stage approach. In the first stage, 45 challenges categorized into 12 dimensions were identified through literature review and validated using second-order confirmatory factor analysis within a formative–reflective measurement model based on data from 225 industry and academic experts. Convergent and discriminant validity, composite reliability, and collinearity diagnostics for formative constructs were assessed to ensure the adequacy of the measurement model. In the second stage, causal relationships and hierarchical structuring of the challenge dimensions were analyzed using the Neutrosophic Interpretive Structural Modeling (N-ISM) approach. Based on the judgments of 19 petrochemical experts, direct-relationship matrices were developed and transitivity relationships were applied to determine the hierarchical structure of the challenge dimensions under ambiguity and uncertainty.

Received: Nov. 24, 2023; Revised: Dec. 14, 2023; Accepted: Jan. 22, 2024; Published Online: Apr. 25, 2024.

*Ph.D. Student, Department of Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

**Assistant Professor, Department of Industrial Management, Tabas Branch, Islamic Azad University, Tabas, Iran.

Corresponding Author: mj.majidi@iau.ac.ir

***Assistant Professor, Department of Management and Economics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

****Assistant Professor, Department of Technology Management, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran.



Results and discussion: The results of the factor analysis showed that among the 45 initially identified challenges, 41 were statistically significant in the context of Iran's petrochemical industry and contributed to the construct of "challenges of sustainable production systems." Reliability and validity indices confirmed the adequacy of the measurement model, and the path coefficients indicated that the human resources ($\beta = 0/33$), economic-financial ($\beta = 0/316$), and organizational ($\beta = 0/247$) dimensions are the most critical focal points for the transition toward sustainable production systems in this industry. Subsequently, neutrosophic structural modeling revealed the hierarchical structure of the challenge dimensions across three levels. In this approach, the use of neutrosophic logic, through the quantification of degrees of truth, falsity, and indeterminacy, enabled the analysis of causal relationships under ambiguous expert judgments and strengthened the robustness of the modeling process. The findings showed that at the third level (root driving factors), the dimensions of organizational, human resource, social, economic/financial, and technological challenges were positioned, forming the fundamental drivers underlying other challenges and functioning as critical bottlenecks. At the second level (intermediate dimensions), governmental and managerial challenges were identified as linking mechanisms between underlying infrastructures and operational outcomes. At the first level (outcome dimensions), informational, market, complexity, external, and environmental challenges were positioned, largely reflecting the conditions of the underlying levels. This hierarchical structure suggests that focusing only on superficial actions, such as market adjustments or temporary environmental projects, without addressing the underlying human, economic, and technological foundations will not lead to the effective implementation of sustainable production systems in the petrochemical industry.

Conclusions: The findings indicated that the transition toward sustainable production in Iran's petrochemical industry requires structural reforms at foundational levels, particularly in human capital, financial capacity, and organizational and technological maturity. Accordingly, policy and managerial interventions should focus on these key leverage points. By clarifying the causal and hierarchical relationships among the challenge dimensions, the proposed model offers a localized and reliable framework for prioritizing interventions and designing a strategic roadmap for sustainable production, and can serve as a basis for future developmental and comparative studies in other process-based industries.

Keywords: Confirmatory Factor Analysis; Neutrosophic Interpretive Structural Modeling; Neutrosophic Set Theory; Petrochemical Industry; Sustainable Production Systems.

How to Cite: Askari, Amin; Jalali Majidi, Mohsen; Shakeri, Arnoosh; Shirazi, Hossein (2026). Identification and Neutrosophic Structural Modeling of Sustainable Production System Challenges in Iran's Petrochemical Industry. *Ind. Manag. Persp.*, 16(2), 205-235 (In Persian).



شناسایی و طراحی مدل ساختاری نوتروسوفیک چالش‌های سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران

امین عسکری*

محسن جلالی مجیدی**

آرنوش شاکری***

حسین شیرازی****

چکیده گسترده

مقدمه و اهداف: تشدید فشارهای زیست‌محیطی، الزامات نهادی و رقابت‌پذیری جهانی، صنایع انرژی‌بر را ناگزیر از گذار به سیستم‌های تولید پایدار کرده است. صنعت پتروشیمی ایران به‌عنوان یکی از ارکان اصلی اقتصاد ملی و در عین حال از کانون‌های مصرف منابع و تولید آلاینده‌ها، با چالش‌های چندوجهی در پذیرش و استقرار این سیستم‌ها مواجه است. با وجود گستره ادبیات در حوزه تولید پایدار، در بافت صنعت پتروشیمی ایران هنوز چارچوبی بومی و ساختارمند که بتواند چالش‌های این حوزه را به‌صورت نظام‌مند و با تبیین روابط علی و سلسله‌مراتبی میان آن‌ها تحلیل کند، به‌طور کافی توسعه نیافته است. از این‌رو، هدف پژوهش حاضر شناسایی، غربال‌سازی و طراحی مدل ساختاری نوتروسوفیک چالش‌های سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران و تبیین روابط اثرگذاری و اثرپذیری میان وجوه آن‌ها در شرایط عدم قطعیت است.

روش‌ها: پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی-توسعه‌ای و از حیث ماهیت تحلیلی است و با رویکردی دو مرحله‌ای انجام شده است. در مرحله نخست، با انجام مطالعات عمیق کتابخانه‌ای و شناسایی ۴۵ چالش در ۱۲ وجه، این چالش‌ها با بهره‌گیری از رویکرد تحلیل عاملی تأییدی مرتبه دوم در قالب مدل شکل‌گیرنده-انعکاسی در نمونه‌ای ۲۲۵ نفری از خبرگان صنعت و دانشگاه اعتبارسنجی و غربال شدند. در این راستا، روایی همگرا و واگرا، پایایی ترکیبی و آزمون هم‌خطی برای سازه‌های شکل‌گیرنده مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله دوم، روابط علی و سطح‌بندی وجوه چالش‌ها با استفاده از رویکرد مدل‌سازی ساختاری تفسیری نوتروسوفیک (N-ISM) و بر مبنای قضاوت ۱۹ صاحب‌نظر صنعت پتروشیمی، در قالب ماتریس‌های ارتباطات مستقیم و اعمال روابط تعدی تحلیل گردید تا ساختار سلسله‌مراتبی وجوه چالش‌ها در شرایط ابهام تبیین شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۶، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۱۳.

* دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

** استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد طبس، دانشگاه آزاد اسلامی، طبس، ایران.

نویسنده مسئول: mj.majidi@iaui.ac.ir

*** استادیار، گروه مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

**** استادیار، گروه مدیریت تکنولوژی، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران.



یافته‌ها: نتایج تحلیل عاملی نشان داد از میان ۴۵ چالش اولیه، ۴۱ چالش در صنعت پتروشیمی ایران معنادار بوده و در شکل‌گیری سازه کلان «چالش‌های سیستم تولید پایدار» نقش دارند. شاخص‌های پایایی و روایی، کفایت مدل اندازه‌گیری را تأیید کرده و ضرایب مسیر بیانگر آن بود که وجوه منابع انسانی ($\beta=0/33$)، اقتصادی-مالی ($\beta=0/316$) و سازمانی ($\beta=0/247$) کانون‌های حساس گذار به سیستم تولید پایدار در این صنعت محسوب می‌شوند. در ادامه، مدل‌سازی ساختاری نوتروسوفیک، ساختار وجوه چالش‌ها را در سه سطح سلسله‌مراتبی آشکار ساخت. در این رویکرد، کاربرد منطق نوتروسوفیک با کمی‌سازی درجات تأیید، رد و بی‌اطلاعی، امکان تحلیل روابط علی در شرایط قضاوتی مبهم را فراهم ساخته و دقت مدل‌سازی را تقویت کرد. یافته‌های این بخش حاکی از آن بود که در سطح سوم (محرک‌های ریشه‌ای)، وجوه چالش‌های سازمانی، منابع انسانی، اجتماعی، اقتصادی/مالی و فناوری قرار گرفتند که زیربنای سایر چالش‌ها را شکل می‌دادند و نقش گلوگاهی داشتند. در سطح دوم (وجوه واسطه‌ای)، وجوه چالش‌های دولتی و مدیریتی به‌عنوان حلقه اتصال میان زیرساخت‌های ریشه‌ای و پیامدهای عملیاتی شناسایی شدند. در سطح اول (وجوه پیامدی)، چالش‌های اطلاعاتی، بازار، پیچیدگی، خارجی و زیست‌محیطی قرار گرفتند که عمدتاً بازتابی از وضعیت سطوح زیرین بودند. این سطح‌بندی نشان داد که تمرکز بر اقدامات سطحی نظیر اصلاحات بازاری یا پروژه‌های مقطعی زیست‌محیطی، بدون اصلاح بنیان‌های انسانی، اقتصادی و فناورانه، به کاربست اثربخش سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی منجر نخواهد شد.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها بیانگر آن بود که گذار به تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران مستلزم اصلاحات ساختاری در سطوح ریشه‌ای، به‌ویژه در حوزه سرمایه انسانی، تأمین مالی و بلوغ سازمانی و فناورانه است و سیاست‌ها و اقدامات مدیریتی باید بر این گلوگاه‌ها متمرکز شوند. مدل ارائه‌شده با تبیین روابط علی و سلسله‌مراتبی وجوه چالش‌ها، چارچوبی بومی و قابل اتکا برای اولویت‌بندی مداخلات و طراحی نقشه راه گذار به تولید پایدار فراهم نموده و می‌تواند مبنای مطالعات توسعه‌ای و تطبیقی در سایر صنایع فرایندی قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: سیستم تولید پایدار، صنایع پتروشیمی، تحلیل عاملی تأییدی، نظریه مجموعه‌های نوتروسوفیک، مدل‌سازی ساختاری تفسیری نوتروسوفیک.

استناددهی: عسکری، امین؛ جلالی مجیدی، محسن؛ شاکری، آرنوش؛ شیرازی، حسین (۱۴۰۵). شناسایی و طراحی مدل ساختاری نوتروسوفیک چالش‌های سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۶(۲)، ۲۰۵-۲۳۵.



۱. مقدمه

صنایع تولیدی در دهه‌های اخیر به یکی از کانون‌های اصلی مصرف فشرده منابع طبیعی و انتشار آلاینده‌ها تبدیل شده‌اند؛ وضعیتی که در کنار شتاب‌گیری تغییرات اقلیمی، تخریب بوم‌سازگان‌ها و محدودیت‌های روبه‌افزایش منابع، صنعت را با موجی از مطالبات نهادی و اجتماعی مواجه کرده است. از یک‌سو، سیاست‌گذاران با سخت‌گیرانه‌تر کردن استانداردها و الزامات قانونی می‌کوشند اثرات نامطلوب فعالیت‌های تولیدی را کنترل کنند [۸۰]. از سوی دیگر، بازار و جامعه، به‌ویژه در قالب تغییر ترجیحات مصرف‌کنندگان، در حال بازتعریف معیارهای ارزش هستند و از شرکت‌ها انتظار دارند علاوه بر کارایی اقتصادی، مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی و اجتماعی را نیز در تصمیم‌های عملیاتی خود وارد کنند [۴۶]. این همگرایی فشارهای نهادی، رقابتی و اجتماعی سبب شده است گذار از الگوهای سنتی تولید به رویکردهای سازگار با پایداری، از سطح یک انتخاب داوطلبانه فراتر رفته و به ضرورتی راهبردی برای حفظ تاب‌آوری، رقابت‌پذیری و مشروعیت اجتماعی سازمان‌ها تبدیل شود [۶۷، ۷۴].

در این چارچوب، مفهوم توسعه پایدار به‌مثابه جهت‌گیری کلان، در حال شکل دادن به سیاست‌گذاری و مدیریت صنعتی است [۴۱، ۴۷]. توسعه پایدار برای بنگاه‌ها صرفاً یک شعار نیست، بلکه می‌تواند به کاهش ریسک‌های بلندمدت ناشی از ناپایداری و تقویت قابلیت انطباق در محیط‌های متلاطم بینجامد. به همین دلیل، افزایش دغدغه‌های ذی‌نفعان نسبت به ابعاد اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی، تصمیم‌گیرندگان را به سمت ادغام ملاحظات پایداری در نظام‌های مدیریتی و فرایندهای تصمیم‌گیری سوق داده است [۶۲]. در اقتصادهای در حال توسعه نیز، عملکرد پایدار حوزه‌ای حیاتی محسوب می‌شود؛ زیرا این کشورها باید میان رشد اقتصادی و مسئولیت‌های زیست‌محیطی - اجتماعی توازن ایجاد کنند، آن هم در شرایطی که محدودیت منابع، شکاف‌های فناورانه و فشارهای نهادی، هزینه‌های گذار را افزایش می‌دهند [۶].

بازتاب صنعتی این تحول را می‌توان در برجسته شدن تولید پایدار مشاهده کرد؛ رویکردی که می‌کوشد فرآیندهای تولید کالا و ارائه خدمات را به گونه‌ای طراحی و اجرا کند که ضمن حفظ بهره‌وری و ارزش‌آفرینی اقتصادی، مصرف انرژی و منابع را کاهش دهد، تولید پسماند و انتشار آلاینده‌ها را حداقل کند و هم‌زمان پیامدهای اجتماعی مطلوب‌تری بر کارکنان و جامعه برجای گذارد [۳۶، ۶۹]. تولید پایدار از این منظر، یک راهبرد اجرایی است که باید در لایه‌های مختلف سازمان، از طراحی محصول و فرایند تا زنجیره تأمین و مدل کسب‌وکار، نهادینه شود. مرورهای اخیر نیز نشان می‌دهد توجه به تولید پایدار افزایش یافته و ابعاد کلیدی آن طیفی از موضوعات فناورانه، مدیریتی، سیاستی و اجتماعی را دربر می‌گیرد [۶۶]. در عمل، بهره‌گیری از مواد و فناوری‌های کم‌مصرف، کاهش ضایعات و شفافیت بیشتر در زنجیره تأمین می‌تواند هم‌زمان ردپای زیست‌محیطی را کاهش داده و مزیت‌هایی مانند بهبود کارایی عملیاتی، تقویت اعتبار برند و افزایش وفاداری مشتری ایجاد کند [۱۱]. با این حال، ادبیات جدید تأکید می‌کند که تحقق تولید پایدار صرفاً مسئله فناوری نیست و به حکمرانی، سیاست‌ها، سازوکارهای مدیریتی و پیامدهای اجتماعی مثبت نیز وابسته است [۶۶]. به بیان دیگر، حرکت از تمایل به پایداری به عملکرد پایدار مستلزم تصمیم‌گیری‌هایی است که هم‌زمان منافع کوتاه‌مدت اقتصادی و پیامدهای بلندمدت اجتماعی - زیست‌محیطی را ملاحظه کند [۵۵]. یکی از محرک‌های مهم این گذار، رشد مطالبه‌گری عمومی نسبت به محصولات و فعالیت‌های سازگار با محیط‌زیست است. افزایش آگاهی از آسیب‌های محیط‌زیستی سبب شده مصرف‌کنندگان به شرکت‌هایی گرایش یابند که بتوانند هم‌زمان تقاضا برای محصولات سبز و ایمن را پاسخ دهند و دستاوردهای اقتصادی و عملیاتی را حفظ کنند. در نتیجه، مسئولیت کاهش مصرف منابع و انتشار آلاینده‌ها تنها بر عهده دولت‌ها نیست و بنگاه‌ها نیز باید در طراحی عملیات، افق نسل‌های آینده را لحاظ کنند [۶۳]. این ضرورت در صنایع انرژی‌بر اهمیت بیشتری دارد، زیرا شدت مصرف منابع و دامنه پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی خطاهای مدیریتی در آن‌ها بالاتر است [۶۹].

در میان صنایع انرژی‌بر، صنعت پتروشیمی جایگاهی ویژه دارد: از یک‌سو موتور مهم ارزش‌افزوده صنعتی و پیشران اشتغال و توسعه زنجیره‌های پایین‌دستی است و از سوی دیگر، به دلیل ماهیت فرایندها، مصرف قابل توجه انرژی و آب و تولید آلاینده‌ها و پسماندهای شیمیایی، حساسیت بالایی از منظر پایداری دارد. در ایران نیز پتروشیمی هم‌زمان یک بخش استراتژیک اقتصادی و یک حوزه حساس از منظر

الزامات زیست‌محیطی و اجتماعی است. از این رو، همگام با تشدید الزامات محیط‌زیستی، تغییر انتظارات ذی‌نفعان و رقابت جهانی، شرکت‌های پتروشیمی ناگزیرند رویکردهای تولیدی خود را بازاندیشی کنند و از منطق تولید سنتی به سمت تولید پایدار حرکت نمایند. با وجود این، گذار در پتروشیمی صرفاً با توصیه‌های کلی یا شعارهای سیاستی محقق نمی‌شود؛ زیرا در بسیاری از اقتصادهای در حال توسعه، محدودیت‌های سرمایه‌گذاری و دشواری جذب فناوری‌های نوین، ابهام‌های بازار و پیچیدگی‌های مقرراتی می‌تواند اجرای ابتکارات پایداری را پرهزینه و کند کند [۵۵].

بنابراین، در پتروشیمی ایران، پذیرش و استقرار سیستم‌های تولید پایدار را باید یک مسئله گذار دانست که در آن سازمان ناگزیر است سه دسته هدف را هم‌زمان پیگیری کند: (۱) پایداری اقتصادی و رقابت‌پذیری، (۲) کاهش اثرات زیست‌محیطی و انطباق با استانداردها و الزامات نوظهور و (۳) بهبود پیامدهای اجتماعی در حوزه‌هایی مانند ایمنی، سلامت و مسئولیت‌پذیری اجتماعی. این همان منطقی است که ادبیات سه‌گانه اقتصادی-اجتماعی-زیست‌محیطی بر آن تأکید دارد و مطالعات جدید نیز آن را مبنای ارزیابی و طراحی رویکردهای تولید پایدار قرار می‌دهند [۴۷، ۶۰]. با این حال، پژوهش‌ها نشان می‌دهد تولید پایدار اغلب با مجموعه‌ای از چالش‌ها و موانع مواجه است؛ از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و کمبود تخصص فنی تا دشواری‌های مدیریتی و نهادی [۶۹]. در نتیجه، هرچند تولید پایدار از منظر نظری و سیاستی جذاب است، موفقیت آن در صنعتی پیچیده و سرمایه‌بر مانند پتروشیمی، وابسته به شناخت دقیق نیروهای بازدارنده و پیشران‌های زمینه‌ای است.

در این نقطه، یکی از خلأهای کلیدی در ادبیات، شکاف میان توصیف مفهومی تولید پایدار و تحلیل عملیاتی چالش‌های استقرار آن در صنایع خاص است. بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها درباره موانع تولید پایدار در قالب مرورهای نظام‌مند و مطالعات کتابخانه‌ای ارائه شده و عمدتاً به جمع‌بندی نظری یا دسته‌بندی مفهومی محدود مانده‌اند [۴، ۳۷، ۳۸، ۴۲]. در مقابل، برخی مطالعات نیز بیشتر به تولید سبز پرداخته‌اند و عملاً وجه زیست‌محیطی را بر سایر ابعاد پایداری غالب کرده‌اند [۵۶]. از منظر بافت صنعتی نیز، مطالعات تجربی غالباً بر صنایعی مانند خودرو، نساجی، داروسازی، کشاورزی و فولاد متمرکز بوده‌اند و بافت پتروشیمی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و به‌طور مشخص ایران، کمتر به‌صورت مسئله‌محور و نظام‌مند مطالعه شده است [۲۲، ۵۴]. پیامد چنین وضعیتی آن است که مدیران و سیاست‌گذاران پتروشیمی، هنگام تصمیم‌گیری برای گذار به تولید پایدار، با کمبود چارچوب‌های بومی و قابل اتکا مواجه‌اند؛ چارچوب‌هایی که چالش‌ها را نه به‌صورت فهرستی از موانع مستقل، بلکه به‌عنوان یک سیستم با روابط متقابل و تقدم‌تأخیرهای اجرایی آشکار سازد.

از سوی دیگر، ماهیت چالش‌های استقرار تولید پایدار غالباً شبکه‌ای و درهم‌تنیده است؛ یعنی چالش‌های منفرد به‌صورت مستقل عمل نمی‌کنند و در قالب مجموعه‌ای از روابط علی و وابستگی‌ها بر یکدیگر اثر می‌گذارند. افزون بر این، ارزیابی شدت اثرگذاری و اثرپذیری چالش‌ها معمولاً با عدم قطعیت همراه است، زیرا به قضاوت‌های خبرگی و داده‌های ناقص یا متغیر وابسته می‌شود. ادبیات جدید روش‌شناسی بر ضرورت استفاده از رویکردهایی تأکید می‌کند که بتوانند هم ساختار روابط را تبیین کنند و هم ابهام قضاوت‌ها را بهتر بازنمایی نمایند [۴۷]. همچنین برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند اتکای صرف به بهبودهای تدریجی برای تحول عمیق کافی نیست و سازمان‌ها برای نیل به پایداری به فهم ساختاری از عوامل اثرگذار و بازدارنده نیاز دارند [۳]. بنابراین، اگر هدف، طراحی نقشه راه گذار باشد، گام نخست، شناخت نظام‌مند چالش‌ها و نحوه اثرگذاری آن‌ها بر یکدیگر است. بر این اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر صنعت پتروشیمی ایران می‌کوشد چالش‌های استقرار سیستم تولید پایدار را شناسایی و به‌صورت ساختاری مدل‌سازی کند؛ به نحوی که هم ساختار وجوه چالش‌ها روشن شود و هم روابط و سطح‌بندی آن‌ها تبیین گردد. برای تحقق این هدف، پژوهش از ترکیب دو منطق مکمل بهره می‌گیرد: نخست، شناسایی، غربال‌سازی و تناسب بخشی وجوه و چالش‌های سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران با استفاده از مطالعات عمیق کتابخانه‌ای و رویکرد تحلیل عاملی تأییدی^۱ (CFA)؛ و سپس، مدل‌سازی ساختاری تفسیری نوتروسوفیک^۲ (N-ISM) برای سطح بندی و تبیین روابط وابستگی و

1. Confirmatory Factor Analysis

2. Neutrosophic Interpretive Structural Modelling

تقدم‌وتأخر میان وجوه چالش‌ها. این ترکیب روش‌شناختی، ضمن پاسخ به نیاز ادبیات برای نگاه ساختاری و سطح‌بندی‌شده، امکان مواجهه مناسب‌تر با عدم قطعیت قضاوت‌های خبرگان را نیز فراهم می‌کند و از مطالعاتی که صرفاً به فهرست‌سازی چالش‌ها بسنده می‌کنند [۶۶، ۶۹]، متمایز است. این پژوهش علاوه بر غنای نظری، از منظر مدیریتی نیز ارزش‌آفرین است؛ زیرا در مواجهه با الزامات نوظهور پایداری، مدیران پتروشیمی نیازمند ابزارهایی هستند که بتوانند اولویت‌های مداخله را در میان چالش‌های متعدد تعیین کنند. یک مدل ساختاری مبتنی بر روابط علی و سطح‌بندی می‌تواند مبنایی برای طراحی نقشه راه گذار، تخصیص منابع، تعریف برنامه‌های بهبود و تسهیل گفت‌وگوی ذی‌نفعان فراهم سازد؛ چراکه نشان می‌دهد کدام چالش‌ها ریشه‌ای‌ترند و کنترل آن‌ها می‌تواند به کاهش مجموعه‌ای از پیامدهای وابسته منجر شود [۵۵، ۱۱]. از این رو، مسئله اصلی پژوهش آن است که «وجوه و چالش‌های کلیدی استقرار سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران چیست و این وجوه در قالب چه ساختار علی و سلسله‌مراتبی با یکدیگر مرتبط می‌شوند؟». در راستای پاسخ به مسئله پژوهش، ادامه مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است.

در بخش بعدی با مروری بر مطالعات پیشین، به تبیین شکاف تحقیقاتی و سهم دانش افزایی پژوهش حاضر در پر کردن این شکاف پرداخته می‌شود. سپس روش‌شناسی و سنخ‌شناسی پژوهش به تفصیل تشریح می‌گردد. در ادامه، یافته‌ها تحلیل و تفسیر می‌شوند. بخش پایانی به نتیجه‌گیری از یافته‌ها با تمرکز بر پیامدهای مدیریتی، شرح محدودیت‌ها و پیشنهادها و کاربردی و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی، اختصاص خواهد یافت.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

سیستم تولید پایدار به عنوان یکی از ستون‌های اصلی مدیریت نوین صنعتی، بر پایه ایجاد توازن میان ارکان سه‌گانه پایداری یعنی ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی استوار است. این سیستم، سازمان‌ها را متعهد می‌سازد تا به طور هم‌زمان سودآوری، حفاظت از محیط زیست و رفاه اجتماعی را دنبال کنند [۴۹]. مفهوم تولید پایدار که برای نخستین بار در سال ۱۹۹۲ در کنفرانس زمین سازمان ملل متحد مطرح شد، با هدف تولید کالاها و خدماتی شکل گرفت که ضمن کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و بهینه‌سازی مصرف انرژی، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و برای جوامع و کارگران ایمن باشند [۱]. در دهه‌های اخیر، فشارهای ناشی از محدودیت منابع طبیعی و افزایش آگاهی مشتریان نسبت به محصولات دوست‌دار محیط زیست، صنایع را ناگزیر به حرکت به سمت الگوهای تولیدی پایدار کرده است تا با کاهش ردپای کربن در تمامی عملیات‌ها، به تقاضای فزاینده بازار پاسخ دهند [۳۱]. در واقع، تولید پایدار با در نظر گرفتن کل چرخه حیات محصول، فرآیندهای تولیدی را به گونه‌ای بازطراحی می‌کند که منجر به افزایش بهره‌وری منابع و تقویت رقابت‌پذیری سازمان شود [۲۱]. در صنعت پتروشیمی، به دلیل ماهیت پیچیده فنی و اثرات گسترده زیست‌محیطی، استقرار سیستم‌های تولید پایدار اهمیتی حیاتی یافته است. این صنعت به واسطه مصرف بالای انرژی و تولید آلاینده‌های گازی و مایع، با چالش‌های متعددی در زمینه هزینه، زمان و کیفیت پروژه‌ها مواجه است که لزوم گذار به فناوری‌های پاک و مدیریت بهینه پسماند را دوجندان می‌کند [۵، ۵۳]. با توجه به این‌که فعالیت‌های پتروشیمی مستقیماً بر اکوسیستم‌ها و سلامت انسان تأثیر می‌گذارند، بهبود کارایی فرآیندها و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نه تنها یک مسئولیت اجتماعی، بلکه ضرورتی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار و ارتقای جایگاه رقابتی در بازارهای جهانی محسوب می‌شود [۶۴].

ادبیات جهانی در حوزه سیستم‌های تولید پایدار طی سال‌های اخیر رشد قابل ملاحظه‌ای داشته و مطالعات مختلف ابعاد متنوعی از این پدیده نوظهور را مورد واکاوی قرار داده‌اند. با این وجود صورت‌بندی غالب آن هنوز به‌طور کامل با مسئله پذیرش و استقرار هم‌راستا نشده است. مرور نظام‌مند ستیادی^۱ و همکاران (۲۰۲۵) نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از پژوهش‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ حول فناوری‌های نوظهور و رویکردهای ارتقای کارایی (مانند هوش مصنوعی، دوقلوی دیجیتال، بلاک‌چین و اقتصاد چرخشی) در تولید پایدار سامان یافته‌اند و در کنار برجسته‌سازی ظرفیت این ابزارها برای کاهش مصرف انرژی و ائتلاف منابع، به کمبود پرداخت تحلیلی به ابعاد اجتماعی، سیاست‌گذاری و مقررات اشاره می‌کنند.

بر این اساس، در بسیاری از مطالعات، پایداری به‌مثابه مجموعه‌ای از راهکارهای فنی یا بهبودهای عملیاتی فهم می‌شود. در حالی که استقرار سیستم تولید پایدار در عمل یک گذار سازمانی-نهادی است و بدون درک سازوکارهای پذیرش، هم‌راستاسازی ذی‌نفعان و رفع موانع مدیریتی/حکمرانی، حتی پیشرفته‌ترین راهکارها نیز به مرحله نهادینه‌سازی نمی‌رسند. در امتداد همین چالش، بخشی از ادبیات خارجی با تمرکز بر موانع، تلاش کرده است تصویری از عوامل بازدارنده پیاده‌سازی ارائه دهد؛ اما این تلاش‌ها نیز اغلب پراکنده و بیشتر در سطح مرورهای نظری یا دسته‌بندی عوامل باقی مانده‌اند [۴، ۳۷، ۳۸، ۶۵]. اهمیت این مجموعه آن است که نشان می‌دهد موانع، چندبعدی و چندسطحی‌اند و از سطح منابع و قابلیت‌ها تا سطح ساختارهای سازمانی و محیط نهادی امتداد می‌یابند؛ با این حال، نقد کلیدی آن است که بسیاری از این آثار به جای تبیین منطق استقرار، به فهرست‌سازی و تجمیع عوامل اکتفا می‌کنند و کمتر روشن می‌سازند کدام موانع ریشه‌ای‌ترند، کدام‌ها پیامدند و چگونه یکدیگر را بازتولید می‌کنند. این ضعف، زمانی پررنگ‌تر می‌شود که برخی پژوهش‌ها اساساً مسئله را از سیستم تولید پایدار به تولید سبز تقلیل می‌دهند و پایداری را عمدتاً در وجه زیست‌محیطی خلاصه می‌کنند [۱۸، ۵۶]. چنین تقلیل‌گرایی، فهم پذیرش و استقرار را محدود می‌کند، زیرا شکست یا موفقیت استقرار معمولاً فقط تابع معیارهای محیط‌زیستی نیست، بلکه برآیند هم‌زمان محدودیت‌های اقتصادی، سازوکارهای مدیریتی، فرهنگ سازمانی و فشارهای نهادی است.

مرور پژوهش‌های تجربی خارجی نشان می‌دهد تمرکز صنعت‌محور مطالعات، عمدتاً بر حوزه‌هایی غیر از پتروشیمی بوده است؛ از جمله خودرو [۵۱، ۷۵]، نساجی [۲۲]، داروسازی [۴۲] و کشاورزی [۵۴]. این توزیع موضوعی دو پیامد دارد: نخست آن که دانش موجود درباره موانع استقرار، بیشتر از صنایعی با منطق فرایندی و ریسک‌های متفاوت استخراج شده و تعمیم آن به صنایع فرایندی بزرگ‌مقیاس همواره بدیهی نیست؛ دوم آن که در بدنه‌ای که ادعا می‌کند درباره سیستم تولید پایدار سخن می‌گوید، فقدان تمرکز ویژه بر پتروشیمی قابل مشاهده است؛ در حالی که ویژگی‌های این صنعت (سرمایه‌بری، حساسیت‌های ایمنی و زیست‌محیطی، وابستگی شدید به زنجیره تأمین و انرژی) می‌تواند ماهیت موانع و ترتیب مداخله برای استقرار را تغییر دهد. بنابراین، آنچه در ادبیات خارجی به دست می‌آید بیشتر یک تصویر کلی از موانع و چالش‌ها است، نه یک الگوی استقرار صنعت‌ویژه که بتواند به تصمیم‌های اجرایی تبدیل شود.

از سوی دیگر، بخشی از ادبیات جدید که در سطح سامانه به ارزیابی عملکرد و پایداری می‌پردازند [۶۰] یا بر نقش ارزیابی چرخه عمر برای اهداف کربن خالص صفر تأکید دارند [۷۳]، ظرفیت بالایی برای سنجش و پایش فراهم می‌کنند، اما لزوماً نشان نمی‌دهند چگونه باید موانع نهادی-سازمانی را مدیریت کرد تا سازمان‌ها واقعاً به سمت استقرار سیستم تولید پایدار حرکت کنند. حتی در ادبیات فناوری‌محور صنعت ۴ و ۵ که غالباً به‌عنوان پیشران تولید پایدار معرفی می‌شود [۱۹، ۳۶، ۶۷]، مسئله پذیرش معمولاً در حاشیه می‌ماند و بیشتر به توانمندسازهای فنی پرداخته می‌شود؛ در حالی که همان آثار نیز به‌طور ضمنی از چالش‌هایی مانند یکپارچگی، ریسک‌های امنیتی و ملاحظات اخلاقی سخن می‌گویند که جنس آن‌ها حکمرانی و پذیرش است نه صرف فناوری. بنابراین، ادبیات فناورانه زمانی برای پژوهش حاضر معنادار است که نه به‌عنوان محور، بلکه به‌عنوان زمینه‌ای که موانع پذیرش را پیچیده‌تر می‌کند خوانده شود.

در ایران، بدنه پژوهش درباره تولید پایدار محدودتر و عمدتاً پراکنده است و بیشتر با رویکردهای کمی در صنایعی نظیر خودرو و غذا به شناسایی محرک‌ها و موانع پرداخته شده است [۵، ۲۵، ۵۸، ۶۸]. این مطالعات از یک سو نشان می‌دهند عوامل زیست‌محیطی، درون‌سازمانی، مالی و تا حدی فناورانه در موفقیت اقدامات پایدار اثرگذارند؛ اما از سوی دیگر، غالباً در سطح شناسایی عوامل یا بیان روابط مستقیم باقی می‌مانند و کمتر به این می‌پردازند که موانع چگونه در قالب یک شبکه علی به هم متصل‌اند و کدام دسته از موانع، پیشران و مولد سایر موانع‌اند. علاوه بر این، تمرکز صریح بر صنعت پتروشیمی ایران و بر مفهوم سیستم تولید پایدار (نه صرفاً تولید سبز) در پیشینه داخلی کم‌رنگ است؛ در نتیجه، دانش موجود برای طراحی مداخله‌های مرحله‌بندی‌شده و واقع‌بینانه در این صنعت کفایت تحلیلی لازم را ندارد.

برآیند مرور پیشینه نشان می‌دهد شکاف پژوهش در سه سطح شکل می‌گیرد: نخست، شکاف بافتی/صنعتی؛ زیرا علی‌رغم مطالعات متعدد در صنایع مختلف، پژوهشی که چالش‌های پذیرش و استقرار سیستم تولید پایدار را به‌طور ویژه در صنعت پتروشیمی واکاوی کند در بدنه مرور شده مشاهده نمی‌شود [۲۲، ۴۲، ۵۱، ۵۴، ۷۵]. دوم، شکاف تحلیلی/تبیینی؛ زیرا بخش زیادی از ادبیات یا در سطح مرورهای تجمیعی

باقی مانده [۴، ۳۷، ۳۸، ۶۵] بی‌آنکه ساختار علی و تقدم مداخله‌ها برای استقرار را روشن کند. سوم، شکاف اجرایی؛ بدین معنا که ادبیات سنجش پیامدهای پایداری [۶۰، ۷۳] و ادبیات فناوری محور [۱۹، ۳۶] اگرچه ابزار و زبان ارزیابی را توسعه داده‌اند، اما فاصله میان امکان‌پذیری فنی/ارزیابی‌پذیری و نهادینه‌سازی و پذیرش سازمانی-نهادی همچنان به‌طور نظام‌مند پر نشده است [۶۶].

بنابراین، سهم دانش‌افزایی پژوهش حاضر در آن است که با تمرکز بر پذیرش و استقرار سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران، از سطح شناسایی کلی عوامل یا توصیه‌های عمومی فراتر می‌رود و به تولید دانشی صنعت‌ویژه درباره چالش‌های استقرار می‌پردازد؛ دانشی که بتواند مبنای تصمیم‌سازی مدیریتی و سیاستی قرار گیرد. افزون بر این، پژوهش با اتخاذ رویکرد تحلیلی ترکیبی، می‌کوشد روابط اثرگذاری/اثرپذیری میان چالش‌ها را روشن سازد تا گلوگاه‌های ریشه‌ای از پیامدها تفکیک شوند و امکان طراحی مداخله‌های مرحله‌ای و اولویت‌بندی‌شده فراهم آید؛ بدین ترتیب، پژوهش حاضر پلی میان ادبیات غالباً فهرست‌محور چالش‌ها و نیاز واقعی صنعت به یک منطق اجرایی برای گذار و نهادینه‌سازی تولید پایدار ایجاد می‌کند.

نوآوری پژوهش حاضر در توسعه یک چارچوب یکپارچه و صنعت‌ویژه برای شناسایی، اعتبارسنجی و ساختاربندی چالش‌های استقرار سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران است. در این چارچوب، ابتدا چالش‌های استخراج‌شده از ادبیات با استفاده از تحلیل عاملی تأییدی مرتبه دوم در بستر تجربی صنعت پتروشیمی غربال و اعتبارسنجی شده و سپس وجوه تأییدشده با استفاده از N-ISM در قالب یک ساختار سلسله‌مراتبی تحلیل می‌شوند. بدین ترتیب، پژوهش حاضر از سطح شناسایی و فهرست‌سازی چالش‌ها فراتر رفته و مشخص می‌کند کدام وجوه نقش ریشه‌ای، واسطه‌ای یا پیامدی در ساختار چالش‌های تولید پایدار دارند. انتخاب منطق نوتروسوفیک نیز متناسب با ماهیت مسئله صورت گرفته است. روابط میان وجوه چالش‌ها ماهیتی مستقیم و قابل مشاهده نداشته و تعیین آن‌ها عمدتاً به قضاوت خبرگان وابسته است؛ ازاین‌رو، عدم قطعیت، اختلاف نظر و ابهام در ارزیابی روابط اجتناب‌ناپذیر است. برخلاف رویکردهای فازی که عمدتاً شدت یا درجه عضویت یک رابطه را بازنمایی می‌کنند، منطق نوتروسوفیک امکان تفکیک مستقل درجه درستی، نامعینی و نادروستی قضاوت را فراهم می‌سازد. این ویژگی به‌ویژه در شرایطی اهمیت دارد که خبره درباره وجود یا شدت یک رابطه اطمینان کامل نداشته یا میان قضاوت‌های خبرگان تعارض وجود داشته باشد. بنابراین، N-ISM در پژوهش حاضر صرفاً به‌عنوان یک روش پیچیده‌تر از ISM فازی انتخاب نشده، بلکه با ماهیت قضاوتی، مبهم و متعارض روابط میان چالش‌های تولید پایدار تناسب روش‌شناختی دارد.

بر این مبنای، نوآوری و سهم اصلی پژوهش را می‌توان در سه گزاره خلاصه کرد: ۱) بومی‌سازی و اعتبارسنجی تجربی چالش‌های تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران؛ ۲) گذار از شناسایی منفرد چالش‌ها به تبیین ساختار وابستگی و سلسله‌مراتبی آن‌ها؛ و ۳) استفاده از روش N-ISM برای بازنمایی هم‌زمان تأیید، عدم قطعیت و رد در قضاوت خبرگان درباره روابط میان وجوه چالش‌ها.

۳. روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نظر هدف، در زمره مطالعات کاربردی-توسعه‌ای قرار داشته و ضمن توسعه یک چارچوب کاربردی در حوزه واکاوی چالش‌های پذیرش و استقرار سیستم تولید پایدار، در پی حل مسئله‌ای واقعی در صنعت پتروشیمی ایران است. از حیث ماهیت، این پژوهش تحلیلی بوده و فراتر از شناسایی صرف چالش‌ها، به دنبال تبیین روابط علی و ساختاری میان وجوه چالش‌های پذیرش و استقرار سیستم تولید پایدار است. از منظر رویکرد روش‌شناختی، مطالعه دارای ماهیتی کمی است؛ به‌گونه‌ای که در فاز نخست با اتکا به ادبیات نظری، چالش‌ها استخراج شده و بر مبنای قرابت مفهومی در وجوه منطقی سازماندهی می‌شوند. سپس با رویکرد تحلیل عاملی تأییدی برای صنعت پتروشیمی ایران، اعتبارسنجی و غربال‌سازی می‌شوند. در فاز دوم، با بهره‌گیری از قضاوت خبرگان، روابط ساختاری میان وجوه چالش‌ها با رویکرد مدل‌سازی ساختاری تفسیری نوتروسوفیک مدل‌سازی می‌گردد. از این‌رو، راهبرد پژوهش، دو مرحله‌ای، خبره‌محور و مقطعی است.

با توجه به ماهیت پژوهش حاضر، به منظور گردآوری داده‌ها با جامعه خبرگی سروکار خواهیم داشت، زیرا داده‌ها عمدتاً در اختیار مدیران و معاونین، سیاست‌گذاران و کارشناسان کلیدی شرکت‌های پتروشیمی و نیز اساتید و صاحب‌نظران دانشگاهی دارای تخصص مرتبط قرار دارد. در فاز نخست (بخش

کمی و اعتبارسنجی سازه‌ها)، به‌منظور تعیین حجم نمونه از قاعده سرانگشتی و نیز ملاحظات روش کوهن^۱ (۱۹۹۲) استفاده شد و حجم نمونه ۲۲۵ نفر تعیین و گردآوری داده‌ها با رویکرد نمونه‌گیری در دسترس/هدفمند انجام گرفت. ویژگی‌های پاسخ‌دهندگان فاز اول و اطلاعات جمعیت‌شناسی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. اطلاعات جمعیت‌شناسی پاسخ‌دهندگان فاز اول

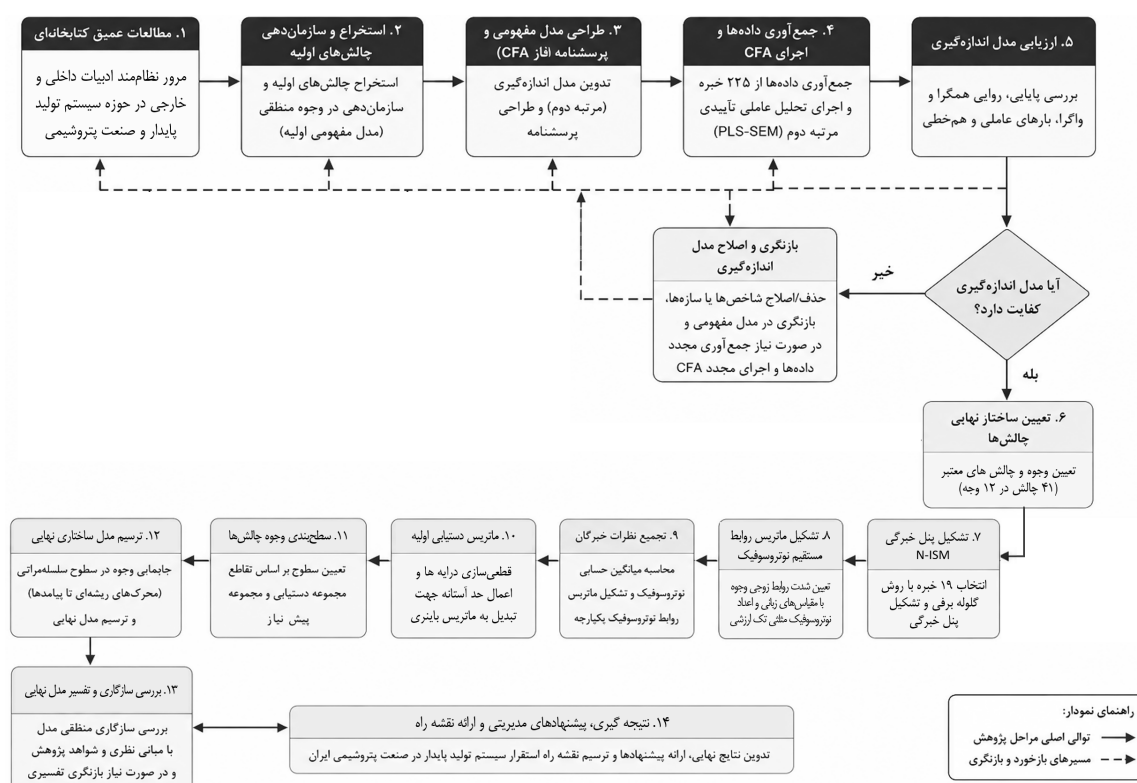
متغیر	گروه	فراوانی	درصد
جنسیت	مرد	۱۶۸	۷۴.۶۷
	زن	۵۷	۲۵.۳۳
تحصیلات	کارشناسی	۶۳	۲۸.۰۰
	کارشناسی ارشد	۱۱۸	۵۲.۴۴
	دکتری	۴۴	۱۹.۵۶
وابستگی سازمانی	شرکت‌های پتروشیمی	۱۴۹	۶۶.۲۲
	نهادهای دولتی و سیاست‌گذار	۲۵	۱۱.۱۱
	دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی	۵۱	۲۲.۶۷
سمت شغلی	مدیر ارشد/مدیر میانی	۳۲	۱۴.۲۲
	کارشناس/کارشناس ارشد تولید و عملیات	۵۹	۲۶.۲۲
	عضو هیئت علمی/پژوهشگر	۸۸	۳۹.۱۱
	سایر	۴۶	۲۰.۴۴
سابقه فعالیت مرتبط	کمتر از ۵ سال	۲۹	۱۲.۸۹
	۵ تا ۱۰ سال	۱۲۷	۵۶.۴۴
	۱۱ تا ۲۰ سال	۵۳	۲۳.۵۶
	بیش از ۲۰ سال	۱۶	۷.۱۱
حوزه تخصصی	مدیریت و سازمان	۲۳	۱۰.۲۲
	تولید و عملیات	۹۵	۴۲.۲۲
	HSE و محیط‌زیست	۲۸	۱۲.۴۴
	انرژی و منابع	۱۹	۸.۴۴
	فناوری و تحول دیجیتال	۳۰	۱۳.۳۳
	مالی و اقتصادی	۹	۴.۰۰
	زنجیره تأمین/بازار	۱۵	۶.۶۷
	سایر	۶	۲.۶۷
مجموع پاسخ‌دهندگان		۲۲۵	

در فاز دوم که هدف آن تبیین روابط علی، سطح‌بندی و مدل‌سازی ساختاری چالش‌ها است، یک پنل خبرگی متشکل از مدیران عالی، معاونین، مدیران تولید و سیاست‌گذاران شرکت‌های پتروشیمی که استقرار تولید پایدار را به‌عنوان یک ضرورت راهبردی برای رقابت‌پذیری در بازارهای بین‌المللی تلقی می‌کردند، تشکیل شد و در نهایت ۱۹ خبره با روش نمونه‌گیری غیرتصادفی گلوله‌برفی برای مشارکت در این مرحله انتخاب شدند. ویژگی‌های پاسخ‌دهندگان فاز دوم و اطلاعات جمعیت‌شناسی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. اطلاعات جمعیت‌شناسی پاسخ‌دهندگان فاز دوم

متغیر	گروه	فراوانی	درصد
جنسیت	مرد	۱۳	۶۸.۴
	زن	۶	۳۱.۶
تحصیلات	کارشناسی ارشد	۴	۲۱.۱
	دکتری	۱۵	۷۸.۹
وابستگی سازمانی	شرکت‌های پتروشیمی	۱۳	۶۸.۴
	نهادهای دولتی/سیاست‌گذار	۲	۱۰.۵
	دانشگاه و مراکز پژوهشی	۴	۲۱.۱
	مدیر ارشد	۵	۲۶.۳
سمت یا جایگاه حرفه‌ای	معاون/مدیر میانی	۲	۱۰.۵
	مدیر تولید یا عملیات	۶	۳۱.۶
	سیاست‌گذار/نماینده نهاد تنظیم‌گر	۲	۱۰.۵
	عضو هیئت علمی/پژوهشگر	۴	۲۱.۱
سابقه فعالیت مرتبط	۱۰ تا ۱۵ سال	۷	۳۶.۸
	۱۶ تا ۲۰ سال	۵	۲۶.۳
	بیش از ۲۰ سال	۷	۳۶.۸
حوزه تخصصی	تولید پایدار	۳	۱۵.۸
	مدیریت تولید و عملیات	۶	۳۱.۶
	HSE و محیط‌زیست	۲	۱۰.۵
	انرژی و فناوری	۱	۵.۲۶
	مدیریت صنعتی و سازمانی	۴	۲۱.۱
	سیاست‌گذاری و حکمرانی	۳	۱۵.۸
مجموع پاسخ‌دهندگان		۱۹	

برای گردآوری داده‌ها، دو پرسشنامه محقق‌ساخته متناسب با مقتضیات هر فاز طراحی گردید. برای سنجش اعتبار پرسشنامه‌ها از روایی صوری بهره گرفته شد و آزمون پایایی سازه‌های مدل تحلیل عاملی تأییدی با کاربست پایایی درونی، روایی همگرا و واگرا انجام گرفت. شکل ۱ مراحل طرح پژوهش حاضر جهت شناسایی و مدل‌سازی ساختاری نوتروسوفیک چالش‌های پذیرش و استقرار سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران را به طور خلاصه و شماتیک نشان می‌دهد. نظر به آن‌که طرح پژوهش حاضر از نظر روش تحلیل داده‌ها بر رویکرد تحلیل عاملی تأییدی، نظریه مجموعه‌های نوتروسوفیک و روش مدل‌سازی ساختاری تفسیری نوتروسوفیک استوار است، لذا در ادامه هریک از این روش‌ها به تفصیل معرفی می‌شوند.



شکل ۱. طرح پژوهش

روش تحلیل عاملی تأییدی (CFA). تحلیل عاملی تأییدی، ابزاری بنیادین برای ارزیابی برازش ساختار عاملی مفروض با داده‌های تجربی و آزمون نظریات است [۷۰، ۷۸]. این روش، ضمن کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی ساختار سازه‌ها، اعتبار پرسشنامه را تضمین می‌کند [۸۱]. با توجه به ماهیت سازه‌های پژوهش، CFA از طریق رویکرد حداقل مربعات جزئی^۱ (PLS) جهت سنجش انطباق میان عوامل نظری و داده‌های مشاهده‌شده به کار می‌رود [۳۵، ۴۰]. CFA با ارزیابی دقیق بارگذاری شاخص‌ها بر متغیرهای پنهان و کنترل خطاهای اندازه‌گیری، زیربنای لازم برای مدل‌سازی معادلات ساختاری^۲ (SEM) را فراهم می‌آورد [۱۷، ۴۸]. این توالی روش‌شناختی، استحکام مدل پیش از آزمون فرضیات ساختاری را تضمین می‌کند [۷۰]. در پژوهش حاضر، به‌منظور غربال‌سازی و تناسب‌بخشی چالش‌های سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران، از تحلیل عاملی تأییدی مرتبه دوم در نرم‌افزار SmartPLS 3 استفاده شده است که مطابق با طرح پژوهش در پنج گام اصلی اجرا می‌شود.

نظریه مجموعه‌های نوتروسوفیک. نظریه مجموعه‌های نوتروسوفیک نخستین بار توسط اسمرانداج^۳ (۱۹۹۸) معرفی شد [۷۲] و به‌عنوان بخشی از نوتروسوفی، به مطالعه منشأ، ماهیت و دامنه «بی‌طرفی/خنثی بودن» و تعامل آن با طیف‌های مختلف اندیشه می‌پردازد. این منطق، نسخه‌ای تعمیم‌یافته از مجموعه‌های کلاسیک، فازی و فازی شهودی است که به‌طور کارآمدتری عدم قطعیت، عدم‌سازگاری و پیچیدگی مسائل دنیای واقعی را مدل می‌کند [۲۶]. در این چارچوب، هر مجموعه نوتروسوفیک با سه تابع عضویت مستقل^۴ درست^۵ (T)، نامعینی^۵ (I) و نادرستی^۶ (F) مشخص می‌شود، به‌گونه‌ای که رابطه $0 \leq T + I + F \leq 3$ برقرار است؛ نامعینی به‌عنوان پارامتر سوم، فراتر از منطق فازی

1. Partial Least Square
2. Structural Equation Modeling
3. Smarandache
4. Truth
5. Indeterminacy
6. Falsehood

شهودی، امکان بازنمایی دقیق‌تر نواحی نامعلوم در قضاوت خبرگان را فراهم می‌سازد و هیچ محدودیتی برای درجات درستی، نامعینی و نادرستی وجود ندارد [۳۲]. به طور کلی، منطق مجموعه‌های نوتروسوفیک با مفاهیم نوینی چون مجموعه‌های نوتروسوفیک تک ارزشی^۱ [۷۶]، مجموعه‌های نوتروسوفیک ذوزنقه‌ای^۲ [۲۹، ۲۸، ۱۵]، مجموعه‌های نوتروسوفیک بازه‌ای^۳ [۷۶]، مجموعه‌های نوتروسوفیک مثلثی^۴ [۲۸، ۲۹] و غیره توسعه یافته اند. مجموعه‌های نوتروسوفیک تک‌ارزشی، زیرمجموعه‌ای مناسب برای مسائل تصمیم‌گیری با داده‌های ناقص و مبهم هستند و زمینه را برای تعریف مجموعه‌های نوتروسوفیک مثلثی/ذوزنقه‌ای مبتنی بر ترکیب اعداد فازی و نوتروسوفیک فراهم کرده‌اند [۲۸، ۲۹، ۵۰، ۷۹]. در این پژوهش، برای تحلیل روابط وجوه چالش‌های سیستم‌های تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران، از اعداد نوتروسوفیک مثلثی تک‌ارزشی^۵ (SVTNNs) استفاده می‌شود؛ رویکردی که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده در حل مسائل تصمیم‌گیری به‌کار رفته است [۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۲].

در تعریف عمومی، یک مجموعه نوتروسوفیک A بر روی فضای X دارای سه تابع عضویت درستی $T_A(x)$ ، نامعینی $I_A(x)$ و نادرستی $F_A(x)$ است که به بازه‌های حقیقی (استاندارد یا غیراستاندارد) $[0^- 1^+]$ نگاشت می‌شوند و محدودیتی بر مجموع آن‌ها وجود ندارد. در حالت تک‌ارزشی، مجموعه نوتروسوفیک ψ روی X به‌صورت $\psi = \{ \langle x, T_\psi(x), I_\psi(x), F_\psi(x) \rangle : x \in X \}$ با نگاشت هر سه تابع عضویت به بازه $[0, 1]$ و قید $0 \leq T_\psi(x) + I_\psi(x) + F_\psi(x) \leq 3$ تعریف می‌شود. فرض شود $(\mu, \nu, w) \in [0, 1]$ و $(a^l, a^m, a^u) \in \mathbb{R}$ طوری که $a^l \leq a^m \leq a^u$. در این صورت عدد نوتروسوفیک مثلثی تک‌ارزشی $\tilde{\psi} = \langle (a^l, a^m, a^u); \mu, \nu, w \rangle$ یک مجموعه نوتروسوفیک ویژه بر روی مجموعه حقیقی $\mathbb{R}$ است که در آن، توابع عضویت درستی $T_{\tilde{\psi}}$ ، نامعینی $I_{\tilde{\psi}}$ و نادرستی $F_{\tilde{\psi}}$ به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۹، ۶۱]:

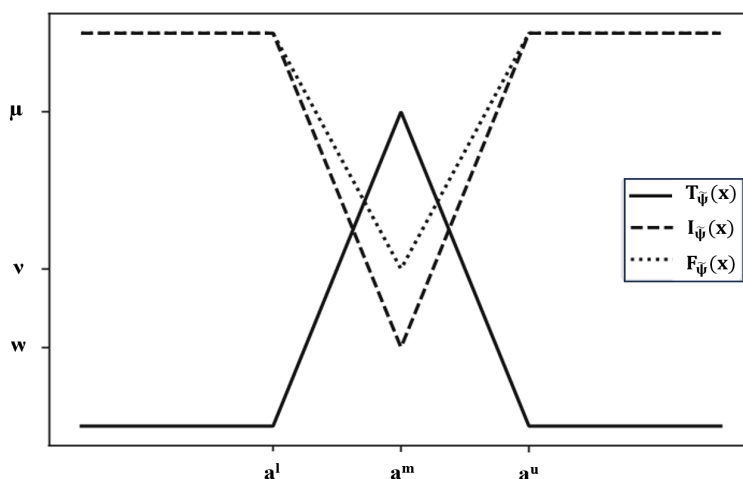
$$T_{\tilde{\psi}}(x) = \begin{cases} \mu \left(\frac{x-a^l}{a^m-a^l} \right) & ; \quad a^l \leq x \leq a^m \\ \mu & ; \quad x = a^m \\ \mu \left(\frac{a^u-x}{a^u-a^m} \right) & ; \quad a^m \leq x \leq a^u \\ 0 & ; \quad \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$I_{\tilde{\psi}}(x) = \begin{cases} \nu \left(\frac{a^m-x}{a^m-a^l} \right) & ; \quad a^l \leq x \leq a^m \\ \nu & ; \quad x = a^m \\ \nu \left(\frac{x-a^u}{a^u-a^m} \right) & ; \quad a^m \leq x \leq a^u \\ 0 & ; \quad \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$F_{\tilde{\psi}}(x) = \begin{cases} w \left(\frac{a^m-x}{a^m-a^l} \right) & ; \quad a^l \leq x \leq a^m \\ w & ; \quad x = a^m \\ w \left(\frac{x-a^u}{a^u-a^m} \right) & ; \quad a^m \leq x \leq a^u \\ 0 & ; \quad \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad \text{رابطه (۳)}$$

شکل ۲ توابع عضویت درستی، نامعینی و نادرستی اعداد نوتروسوفیک مثلثی تک‌ارزشی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

1. Single-Valued Neutrosophic Sets
2. Trapezoidal Neutrosophic Sets
3. Interval Neutrosophic Sets
4. Triangular Neutrosophic Sets
5. Single-Valued Triangular Neutrosophic Numbers



شکل ۲. توابع عضویت درستی، نامعینی و نادرستی اعداد نوتروسوفیک مثلثی تک ارزشی [۶۸]

با توجه به این شکل، ملاحظه می‌شود که $T_{\psi}(x)$ در بازه $a^l \leq x \leq a^m$ یک تابع صعودی، یکنواخت و پیوسته و در بازه $a^m \leq x \leq a^u$ یک تابع نزولی، یکنواخت و پیوسته است. برعکس، توابع عضویت $I_{\psi}(x)$ و $F_{\psi}(x)$ در بازه $a^l \leq x \leq a^m$ ، نزولی، یکنواخت و پیوسته و در بازه $a^m \leq x \leq a^u$ ، صعودی، یکنواخت و پیوسته هستند. بنابراین، در توابع عضویت مطروحه، مقادیر μ ، v و w به ترتیب بیانگر بیشینه درجه عضویت درستی، کمینه درجه عضویت نامعینی و کمینه درجه عضویت نادرستی بوده که مستقل از یکدیگر هستند.

انتخاب منطق نوتروسوفیک در پژوهش حاضر مبتنی بر ماهیت قضاوتی و عدم قطعیت موجود در ارزیابی روابط میان وجوه چالش‌های سیستم تولید پایدار است. روابط بین چالش‌هایی نظیر محدودیت‌های مالی، ضعف منابع انسانی، موانع فناورانه، ساختار سازمانی و الزامات دولتی، روابطی مستقیم و عینی نیستند و تعیین شدت و حتی میزان اطمینان نسبت به این روابط عمدتاً به دانش و قضاوت خبرگان وابسته است. در چنین شرایطی، خبره ممکن است وجود یک رابطه را تأیید کند، نسبت به شدت یا جهت آن اطمینان کامل نداشته باشد یا حتی درباره وجود رابطه دیدگاه متفاوتی داشته باشد. بنابراین، ابهام موجود در مسئله صرفاً به تعیین «شدت رابطه» محدود نمی‌شود، بلکه درجه تأیید، میزان نامعینی و درجه رد قضاوت نیز می‌تواند هم‌زمان مطرح باشد. این ویژگی، استفاده از منطق نوتروسوفیک را نسبت به منطق‌های قطعی و فازی متعارف مناسب‌تر می‌سازد؛ زیرا در چارچوب نوتروسوفیک، این سه مؤلفه به‌صورت مستقل مدل می‌شوند. در نتیجه، استفاده از SVTNNs در پژوهش حاضر امکان می‌دهد عدم قطعیت و ابهام موجود در قضاوت خبرگان درباره روابط میان وجوه چالش‌ها بدون تحمیل یک مقدار قطعی یا یک درجه عضویت منفرد بازنمایی شود.

روش مدل‌سازی ساختاری تفسیری نوتروسوفیک (N-ISM). مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM) که نخستین بار توسط وارفیلد^۱ (۱۹۷۶) معرفی شد [۷۷]، رویکردی کل‌نگر برای تحلیل روابط مفهومی میان متغیرها از طریق تبدیل تصورات ذهنی به ساختارهای سلسله‌مراتبی است. این روش با کاهش ۵۰ تا ۸۰ درصدی نیاز به پرسش‌های ارتباطی [۱۲، ۵۷]، امکان شناسایی عوامل محرک، تأثیرگذار و تأثیرپذیر را بدون نیاز به حجم بالای داده‌های کمی فراهم می‌آورد [۲۳، ۳۴]. انتخاب مدل‌سازی ساختاری تفسیری نوتروسوفیک در پژوهش حاضر با توجه به ماهیت چندبعدی، وابسته و تا حد زیادی قضاوتی چالش‌های سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی صورت گرفته است. چالش‌های شناسایی شده در این پژوهش در وجوه مختلفی از یکدیگر مستقل نیستند؛ بلکه تغییر یا تشدید یک وجه می‌تواند از طریق روابط مستقیم یا غیرمستقیم بر سایر وجوه اثرگذار باشد. از سوی دیگر، روابط میان وجوه چالش‌ها در پژوهش حاضر بر مبنای قضاوت خبرگان صنعت پتروشیمی تعیین می‌شود و ماهیت این قضاوت‌ها با عدم قطعیت، ابهام و احتمال وجود دیدگاه‌های متفاوت میان خبرگان همراه است. در چنین شرایطی، مدل‌سازی ساختاری تفسیری کلاسیک که روابط را عمدتاً به‌صورت قطعی و دودویی نمایش می‌دهد، قادر نیست تمام ابعاد عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان را بازنمایی کند. به همین دلیل، در پژوهش حاضر نسخه نوتروسوفیک ISM به کار گرفته شده

است؛ زیرا چارچوب نوتروسوفیک با تفکیک درجات درستی (T)، نامعینی (A) و نادرستی (F)، امکان بازنمایی هم‌زمان میزان تأیید یک رابطه، عدم قطعیت نسبت به آن و میزان عدم تأیید رابطه را فراهم می‌کند [۸، ۲]. این قابلیت به‌ویژه در شرایطی اهمیت دارد که خبرگان درباره وجود یا شدت روابط میان چالش‌های پیچیده و به‌هم‌پیوسته اجماع کامل ندارند N-ISM با استفاده از مقادیر زبانی و تبدیل آن‌ها به اعداد نوتروسوفیک، امکان مدل‌سازی در شرایط مبهم را فراهم کرده و فراتر از رویکرد فازی، نه تنها قوت رابطه، بلکه میزان اطمینان خبره به قضاوت خود را نیز لحاظ می‌کند [۳۳، ۱۶]. بنابراین، انتخاب این روش ناشی از صرفاً نوین بودن یا پیچیدگی ابزار نیست، بلکه از تناسب روش با ماهیت مسئله پژوهش ناشی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که N-ISM به‌طور هم‌زمان سه نیاز اصلی پژوهش حاضر، یعنی تحلیل وابستگی میان وجوه چالش‌ها، استخراج ساختار سلسله‌مراتبی و مدیریت عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان را پوشش می‌دهد. در پژوهش حاضر با الهام و توسعه الگوی مطروحه در مطالعات عبدالباسط^۱ و همکاران (۲۰۱۹)، گو و وانگ^۲ (۲۰۲۱)، کارادایی-اوستا^۳ (۲۰۲۲)، وارفیلد (۱۹۷۶) و اسمرانداج (۱۹۹۸)، از رویکرد مدل‌سازی ساختاری تفسیری نوتروسوفیک در فضای تصمیم‌گیری گروهی برای مدل‌سازی و سطح‌بندی وجوه چالش‌های سیستم تولید پایدار صنعت پتروشیمی طی هفت گام اصلی زیر استفاده می‌شود:

- ۱) شناسایی مؤلفه‌ها: استخراج وجوه چالش‌ها از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و روش تحلیل عاملی تأییدی؛
- ۲) تشکیل ماتریس روابط مستقیم نوتروسوفیک: نظرسنجی از خبرگان پیرامون شدت روابط زوجی وجوه با مقیاس‌های زبانی؛
- ۳) یکپارچه‌سازی نظرات خبرگان: محاسبه میانگین حسابی نظرات و تشکیل ماتریس روابط نوتروسوفیک یکپارچه؛
- ۴) تشکیل ماتریس دستیابی اولیه $[D]$: قطعی‌سازی درایه‌ها و اعمال حد آستانه (λ) برای تبدیل به ماتریس باینری؛
- ۵) ایجاد سازگاری و تشکیل ماتریس نهایی $[T]$: اعمال قانون تعدی از طریق جبر بولی برای تکمیل روابط غیرمستقیم؛
- ۶) تعیین سطوح ساختاری: سطح‌بندی وجوه چالش‌ها بر اساس تقاطع مجموعه دستیابی و مجموعه پیش‌نیاز؛
- ۷) ترسیم مدل نهایی: جانمایی وجوه در سطوح مختلف (از محرک‌ها در پایین تا تأثیرپذیرها در بالا) برای نمایش جریان علی سیستم.

از آن‌جا که ساختار روابط در N-ISM بر قضاوت خبرگان درباره اثرگذاری مستقیم میان وجوه استوار است، پیش از تشکیل ماتریس روابط مستقیم یکپارچه، میزان همگرایی قضاوت‌های خبرگان در سطح روابط زوجی تک تک ماتریس‌های روابط مستقیم وجوه بررسی می‌شود. در این مرحله، ماتریس‌های روابط مستقیم نوتروسوفیک که به‌صورت مستقل توسط خبرگان تکمیل می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از قطعی‌سازی قضاوت‌های نوتروسوفیک بر اساس تابع امتیاز مورد استفاده در پژوهش، قضاوت هر خبره درباره رابطه به مقدار دودویی تبدیل می‌شود؛ به‌گونه‌ای که تأیید وجود رابطه مقدار ۱ و عدم تأیید آن مقدار صفر دریافت می‌کند. سپس برای هر زوج از وجوه، نرخ توافق خبرگان از حاصل تقسیم مجموع فراوانی نظرات مشابه خبرگان بر تعداد کل خبرگان محاسبه می‌شود. بدین ترتیب، برخلاف تجمیع صرف مقادیر نوتروسوفیک، میزان همگرایی دیدگاه خبرگان درباره هر رابطه به‌صورت مستقل قابل مشاهده و کنترل می‌شود. برای تعیین روابط قابل پذیرش در ماتریس گروهی، قاعده اکثریت دو سوم خبرگان به‌عنوان آستانه توافق مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معیار در مطالعات ISM به‌عنوان یک قاعده سخت‌گیرانه‌تر از اکثریت ساده برای تجمیع قضاوت‌های خبرگان به کار رفته است [۷۱] و بر اساس آن، چنانچه دو سوم یا بیشتر خبرگان در وجود یا عدم وجود یک رابطه نظر مشابه داشته باشند، رابطه در ماتریس تجمیعی حفظ یا رد می‌شود؛ در غیر این صورت نیاز است آن رابطه مجدداً مورد نظرسنجی قرار گیرد.

۴. یافته‌ها

گذار به سیستم‌های تولید پایدار در صنعت پتروشیمی، بدون شناخت عمیق و ساختارمند چالش‌های پیش‌رو، عملاً به یک شعار استراتژیک تقلیل می‌یابد. مطالعات عمیق کتابخانه‌ای نشان می‌دهد که چالش‌های گذار به تولید پایدار در یک طیف متکثر از وجوه قرار می‌گیرند. با جمع‌بندی مطالعات مرتبط پیشین ملاحظه شد که پذیرش و استقرار سیستم‌های تولید پایدار در صنایع تولیدی با ۴۵ چالش متداول مواجه است که این چالش‌ها بر مبنای قرابت مفهومی در ۱۲ وجه اعم از سازمانی، دولتی، اطلاعاتی، مدیریتی، بازار، پیچیدگی، خارجی، منابع انسانی، زیست‌محیطی، اجتماعی،

اقتصادی/مالی و فناوریانه سازماندهی می‌شوند (جدول ۳). تنوع وجوه چالش‌ها بیانگر چندلایه بودن فرایند پایداری در صنایع فرایندی است. این دسته‌بندی دلالت بر این دارد که تولید پایدار، صرفاً یک اصلاح فنی نیست، بلکه یک تغییر پارادایم است که کل اکوسیستم سازمان را درگیر می‌کند.

جدول ۳. وجوه و چالش‌های پذیرش و استقرار سیستم تولید پایدار

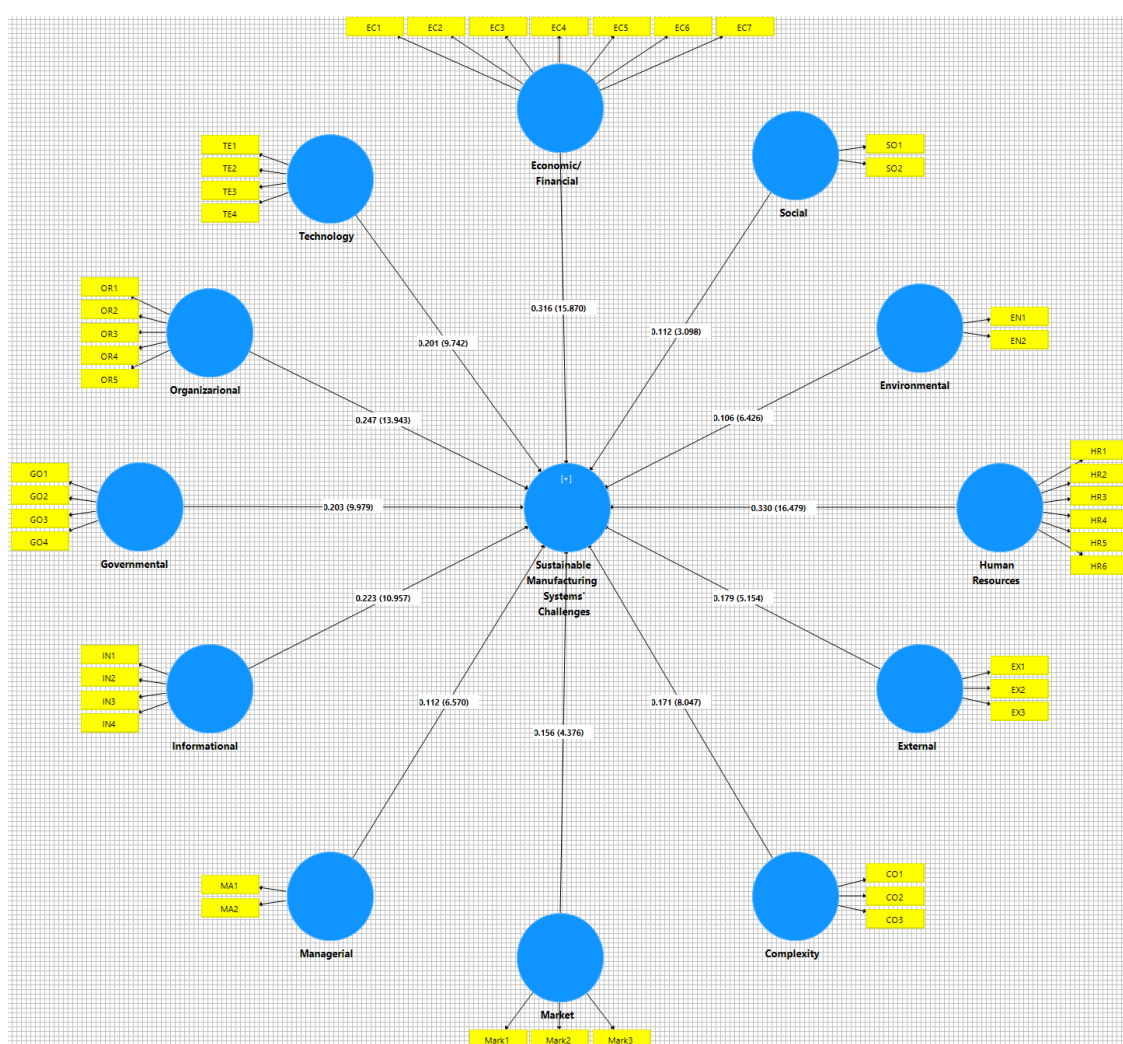
وجوه	چالش‌ها	نماگر	مراجع
سازمانی (OR)	ارتباطات ضعیف داخلی و خارجی بین اعضا سازمان و شرکای زنجیره ارزش	OR1	[۷، ۹، ۱۳، ۱۴، ۲۲، ۲۷، ۳۸، ۳۹، ۴۳، ۴۵، ۵۴، ۵۹]
	چشم انداز و راهبرد نامشخص در گذار به تولید پایدار	OR2	
	نبود گواهینامه، استانداردهای فنی و مقررات معین برای تولید پایدار	OR3	
	عدم تناسب فرهنگ، ساختار سازمانی و مدل کسب و کار فعلی با تولید پایدار	OR4	
	فقدان معیارهای پایشی استاندارد و سیستم ارزیابی عملکرد	OR5	
دولتی (GO)	نبود راهنمای مدون بومی برای پذیرش و پیاده سازی سیستم تولید پایدار	GO1	[۷، ۹، ۱۳، ۱۴، ۲۲، ۲۷، ۳۸، ۳۹، ۴۳، ۴۵، ۵۴، ۵۹]
	عدم وجود مشوق و تخصیص رایانه برای گذار به تولید پایدار	GO2	
	قانون گذاری ضعیف	GO3	
	عدم برخورداری از خط مشی و حمایت دولتی	GO4	
اطلاعاتی (IN)	چالش کیفیت، شفافیت، امنیت و اشتراک گذاری داده ها	IN1	[۷، ۹، ۱۳، ۱۴، ۲۲، ۲۷، ۳۸، ۳۹، ۴۳، ۴۵، ۵۴، ۵۹]
	فقدان اطلاعات به روز در خصوص محصولات و منابع پایدار	IN2	
	عدم آگاهی از مفهوم سیستم تولید پایدار و سازوکار پذیرش و اجرای آن	IN3	
	عدم آگاهی مشتریان نسبت به مشخصه‌های محصول پایدار	IN4	
مدیریتی (MA)	تخصص ناکافی مدیریت و رهبری سازمان در زمینه شیوه‌های تولید پایدار	MA1	[۷، ۹، ۱۳، ۱۴، ۲۲، ۳۸، ۳۹، ۴۳، ۴۵، ۵۴، ۵۹]
	عدم حمایت، تعهد و علاقه مدیریت ارشد به تولید پایدار	MA2	
بازار (MARK)	رقابت تنگاتنگ در بازار کسب و کار	MARK1	[۷، ۱۴، ۲۷، ۳۸، ۳۹، ۴۳، ۵۴، ۵۹]
	عدم نگرانی و فشار از سوی جامعه در خصوص تولید محصولات پایدار	MARK2	
	علاقه کم مشتریان و تقاضای غیرقطعی آنها از محصولات پایدار	MARK3	
پیچیدگی (CO)	دشواری ارزیابی عملکرد سیستم تولید پایدار	CO1	[۲۲، ۳۸، ۳۹، ۴۵، ۵۴، ۵۹]
	پیچیدگی‌های مدیریتی تولید پایدار	CO2	
	پیچیدگی طراحی محصولات، فرایندها و سیستم تولید پایدار	CO3	
خارجی (EX)	تأمین کنندگان غیرقابل اعتماد	EX1	[۷، ۱۴، ۲۲، ۲۷، ۳۸، ۳۹، ۴۳، ۵۴]
	مقررات ناپایدار و جو سیاسی و اقتصادی متغیر	EX2	
	وقفه‌ها و چالش‌های زنجیره تأمین	EX3	
منابع انسانی (HR)	مقاومت در برابر تغییر	HR1	[۷، ۹، ۱۳، ۱۴، ۲۲، ۲۷، ۳۸، ۳۹، ۴۵، ۵۴، ۵۹]
	کار تیمی ضعیف	HR2	
	تعهد و مشارکت کم کارکنان	HR3	
	فقدان سیستم پاداش و ترفیع برای کارکنان	HR4	
	فقدان برنامه آموزشی مستمر و اثربخش برای کارکنان و مدیریت	HR5	
	نیروی کار کم مهارت برای تولید پایدار	HR6	
زیست محیطی (EN)	فقدان یا ضعف عملکرد سیستم‌های مدیریت زیست محیطی	EN1	[۹، ۱۳، ۲۲، ۲۷، ۳۹، ۵۴، ۵۹]
	دسترسی محدود به منابع پایدار و انرژی‌های تجدیدپذیر	EN2	

وجوه	چالش‌ها	نماگر	مراجع
اجتماعی (SO)	نقشه راه نامنتطبق با موازین اجتماعی در پذیرش سیستم تولید پایدار	SO1	[۵۹، ۴۳، ۲۲، ۱۴]
	فقدان یا ضعف مسئولیت اجتماعی شرکت	SO2	
اقتصادی / مالی (EC)	هزینه قابل توجه دفع و بازیافت زباله‌های تولیدی	EC1	[۷، ۹، ۱۳، ۱۴، ۲۲، ۲۷، ۳۸، ۳۹، ۴۳، ۵۴، ۵۹]
	هزینه بالای تولید، تأمین و بسته بندی پایدار	EC2	
	محدودیت‌های مالی شرکت	EC3	
	عدم قطعیت در سودآوری و هزینه‌های تولید پایدار	EC4	
	دوره بازگشت سرمایه طولانی مدت سیستم تولید پایدار	EC5	
	هزینه بالای سرمایه گذاری	EC6	
	هزینه بالای نگهداری و تعمیرات فناوری‌های پایدار	EC7	
فناوری (TE)	عدم دسترسی به فناوری‌های کم مصرف	TE1	[۷، ۹، ۱۳، ۱۴، ۲۲، ۲۷، ۳۹، ۴۳، ۴۵، ۵۴، ۵۹]
	فقدان زیرساخت‌های نرم افزاری و سخت افزاری تولید پایدار	TE2	
	فقدان دانش و تخصص فنی و فناوری	TE3	
	عدم ارتقاء فناوری (ضعف در تحقیق و توسعه)	TE4	

از آن‌جاکه وجوه و چالش‌های پذیرش و استقرار سیستم‌های تولید پایدار در صنایع گوناگون، متأثر از عوامل گوناگونی چون ماهیت فعالیت‌ها، میزان پیچیدگی فرایندهای تولید، شدت سرمایه‌بری، ساختار سازمانی، بلوغ فناوریانه، الزامات نهادی و فشارهای محیطی-اجتماعی است؛ از این‌رو نمی‌توان آن‌ها را مجموعه‌ای همگن و جهان‌شمول تلقی کرد. این مسئله در صنعت پتروشیمی که با فرایندهای پیوسته، ریسک‌های بالای ایمنی و زیست‌محیطی، فناوری‌های پیچیده و تعامل گسترده با نهادهای تنظیم‌گر همراه است، نمود بارزتری دارد؛ چراکه الگوی بروز و اهمیت نسبی چالش‌ها در این صنعت به‌طور معناداری با سایر صنایع تفاوت می‌کند. بدین ترتیب، رویکردهای ساده‌انگارانه یا تک‌بعدی قادر به بازتابی واقع‌بینانه این پیچیدگی نیستند و ضرورت بهره‌گیری از چارچوبی تحلیلی احساس می‌شود که بتواند هم تنوع ابعاد را پوشش دهد و هم ویژگی‌های خاص صنعت را لحاظ کند. تحلیل عاملی تأییدی مرتبه دوم، به‌عنوان یک رویکرد ساختاریافته و نظریه‌محور، چنین امکانی را فراهم می‌سازد. در این چارچوب، وجوه دوازده‌گانه چالش‌ها به‌عنوان سازه‌های مرتبه اول تعریف شده و هر یک به صورت بازتابی از طریق مجموعه‌ای از گویه‌ها عملیاتی می‌شوند. این مرحله، امکان ارزیابی مستقل هر وجه و شناسایی الگوهای خاص بروز چالش‌ها در پتروشیمی ایران را میسر می‌سازد. در سطح بالاتر، سازه کلان «چالش‌های سیستم تولید پایدار» به‌عنوان یک سازه مرتبه دوم از نوع شکل‌گیرنده در نظر گرفته می‌شود که برآیندی از ترکیب و شدت ابعاد مرتبه اول است. این تفکیک، با منطق بومی‌سازی هم‌خوانی کامل دارد، چراکه وضعیت کلی چالش‌ها را نه بازتاب یک عامل نهفته یکنواخت، بلکه حاصل ترکیب خاص و وزن متفاوت هر یک از وجوه می‌داند. در نتیجه، مدل قادر به غربالگری وجوه و چالش‌هایی است که در بستر صنعت پتروشیمی نقش مؤثرتری در پذیرش و استقرار سیستم تولید پایدار ایفا می‌کنند، درحالی‌که برخی دیگر ممکن است وزن کمتری داشته و حتی در شرایط خاص قابل حذف باشند.

با توجه به ماهیت چارچوب نظری پژوهش، مدل‌سازی به روش «شکل‌گیرنده-بازتابی» انجام گرفت تا ناهمگونی و اهمیت منحصربه‌فرد هر وجه لحاظ گردد. با توزیع پرسشنامه میان ۲۲۵ نفر از خبرگان و تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار SmartPLS، ضریب آلفای کرونباخ برای تمامی سازه‌ها (وجوه) بیش از ۰/۷ بدست آمد و همچنین مقدار این ضریب برای کل گویه‌ها، معادل ۰/۸۴۱ حاصل گردید و پایایی پرسشنامه تأیید شد. همچنین در ارزیابی مدل اندازه‌گیری (سازه‌های انعکاسی)، نتایج بارهای عاملی استاندارد شده نشان داد که تمامی ۴۵ گویه از آستانه قابل قبول (۰/۵) فراتر رفته و اکثر آن‌ها از حد مطلوب (۰/۷) عبور کرده‌اند. شاخص‌های برازش سازه شامل پایایی ترکیبی ($CR > 0/7$) و میانگین واریانس استخراج‌شده ($AVE > 0/5$) حاکی از روایی همگرایی بسیار مطلوب بود. همچنین، ارزیابی روایی واگرا به روش فورنل-لارکر، استقلال مفهومی و تمایز وجوه دوازده‌گانه را به اثبات رساند، به‌طوری‌که همبستگی هر سازه با سایر سازه‌ها در سطح کنترل‌شده‌ای قرار داشت.

در ادامه، اعتبارسنجی سازه‌های شکل‌گیرنده مدل، از دو مسیر (۱) بررسی هم‌خطی بین ابعاد مرتبه اول و (۲) معناداری و اهمیت وزن‌های شکل‌گیرنده، انجام گرفت. با پیاده‌سازی الگوریتم PLS، ضریب تورم واریانس^۱ (VIF) بین وجوه مرتبه اول محاسبه شد. نتایج حاصله حاکی از مقادیر کوچکتر از ۵ برای ضرایب هم‌خطی بود که مؤید عدم وجود هم‌خطی بحرانی و استقلال سهم هر وجه در تبیین سازه کلان بود. در مدل‌های شکل‌گیرنده، وجوه مرتبه اول علت شکل‌گیری سازه نهفته هستند؛ بنابراین، برخلاف سازه‌های بازتابی، وزن‌ها، معیار اصلی اهمیت هر چالش‌پذیرش و استقرار سیستم تولید پایدار محسوب می‌شوند، نه بارهای عاملی. هر وزن نشان می‌دهد که آن چالش مشروط بر کنترل سایر چالش‌ها تا چه اندازه به‌صورت منحصربه‌فرد در تبیین سازه کلان نقش دارد. از آن‌جا که وزن‌های شکل‌گیرنده دارای توزیع نرمال مفروض نیستند، آزمون معناداری آن‌ها صرفاً از طریق فرمان بوت استرپینگ امکان‌پذیر است. لذا با انجام این فرمان، وزن چالش‌ها در شکل‌گیری سازه مرتبه دوم به صورت شکل ۳ حاصل گردید.



شکل ۳. ارزیابی معناداری سهم هریک از وجوه در شکل‌گیری سازه کلان

خروجی مدل نشان داد که اکثر مؤلفه‌های مرتبه اول، با مقادیر آماره تی فراتر از $1/96$ و سطح معناداری کمتر از $0/05$ ، پیوند علی و مؤثری با سازه کلان «چالش‌های سیستم تولید پایدار» دارند. این واقعیت آماری، فرضیه شکل‌گیرنده بودن مدل را تأیید می‌کند؛ به این معنا که سازه مرتبه دوم، نه یک متغیر تک‌بعدی، بلکه برآیندی ترکیبی از وجوه مستقل و مکمل است. وجوهی نظیر پیچیدگی، امور مالی-اقتصادی، محیط‌زیست، فشارهای برون‌سازمانی، سیاست‌های دولتی، منابع انسانی، سیستم‌های اطلاعاتی، ساختار سازمانی و تکنولوژی، همگی نقش‌های تفکیک‌شده و مثبتی در تبیین کلیت چالش‌های این صنعت ایفا می‌کنند. تحلیل ضرایب مسیر حاکی از آن است که اگرچه تمامی وجوه دوازده‌گانه در شکل‌گیری سازه کلان «چالش‌های سیستم تولید پایدار» نقش دارند، اما سهم آن‌ها یکسان نیست؛ در این سلسله‌مراتب، وجوهی با ضرایب بالاتر، نقش موتور محرک و وجوه با ضرایب کمتر، نقش مکمل را ایفا می‌کنند. بر این اساس، وجه «منابع انسانی» با ضریب مسیر $0/33$ و آماره تی $16/48$ ، وجه «اقتصادی-مالی» با ضریب مسیر $0/316$ و آماره تی $15/87$ و وجه «سازمانی» با ضریب مسیر $0/247$ و آماره تی $13/94$ ، کانون‌های تمرکز و نقاط حساس در پذیرش و استقرار سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران تلقی می‌شوند. در سوی دیگر، بررسی معناداری وزن عاملی گویه‌ها بیانگر آن بود که برخی چالش‌های زیرمجموعه مدیریت، بازار و اجتماعی (به‌طور مشخص گویه‌های MA1، Mark1، Mark3 و SO1) به ترتیب با مقدار آماره تی $1/474$ ، $1/886$ ، $0/295$ و $1/218$ از نظر آماری در این ساختار معنادار نیستند ($t > 1/96$). در منطق مدل‌های شکل‌گیرنده، چنین وضعیتی به معنای نقص در ساختار کلی نیست، بلکه گویای آن است که در حضور سایر متغیرهای پیشران، این موارد سهم ناچیزی در تبیین سازه اصلی دارند. بنابراین، خبرگان صنعت پتروشیمی بر این باورند که از میان ۴۵ چالش اولیه‌ی احصاشده، ۴۱ مورد به طور جدی برای این صنعت در ایران موضوعیت دارد.

حذف چالش MA1 برگرفته از ویژگی‌های تخصصی صنعت پتروشیمی است. شرکت‌های فعال در این صنعت به دلیل ماهیت پیچیده و سرمایه‌بر فعالیت‌های خود، معمولاً از ساختارهای مدیریتی تخصصی و نیروی مدیریتی دارای تجربه صنعتی برخوردارند؛ از این رو، کمبود تخصص مدیریت در حوزه تولید پایدار، در مقایسه با چالش‌هایی نظیر محدودیت منابع انسانی، مالی، سازمانی و فناورانه، به عنوان یک مانع مستقل و تعیین‌کننده ادراک نشده است. بنابراین، نتیجه حاصل بیشتر بیانگر پایین‌تر بودن سهم نسبی این چالش در ساختار کلی موانع است تا فقدان کامل مسئله تخصص مدیریت.

در خصوص چالش MARK1، مقدار آماره t برابر با $1/886$ ، هرچند به آستانه متعارف معناداری نزدیک است، برای تأیید سهم معنادار این چالش در سطح موردنظر کافی نبوده است. از نظر عملی، به نظر می‌رسد فشار ناشی از رقابت بازار در صنعت پتروشیمی ایران، به صورت مستقیم تعیین‌کننده اصلی گذار به تولید پایدار نیست و تصمیم‌های مرتبط با این گذار بیشتر تحت تأثیر محدودیت‌های مالی، الزامات نهادی، ظرفیت‌های فناورانه، منابع انسانی و عوامل سازمانی قرار می‌گیرند. از این رو، رقابت تنگاتنگ بازار در مدل نهایی سهم مستقلی در تشکیل سازه کلان نشان نداده است.

در میان چهار چالش حذف‌شده، MARK3 با آماره t برابر با $0/295$ کمترین میزان شواهد آماری را برای حضور در مدل نشان داد. این نتیجه را می‌توان با ویژگی بازار محصولات پتروشیمی نیز تبیین کرد. بخش قابل توجهی از معاملات این صنعت در قالب روابط بنگاه با بنگاه و در زنجیره‌های صنعتی پایین‌دستی انجام می‌شود و بنابراین، فشار مستقیم ناشی از ترجیحات مصرف‌کننده نهایی برای محصولات پایدار ممکن است در مقایسه با صنایع مصرفی، نقش محدودتری در تصمیم‌های مرتبط با استقرار تولید پایدار داشته باشد. در نتیجه، علاقه کم مشتریان و تقاضای غیرقطعی نتوانسته است سهم معناداری در شکل‌دهی سازه کلان چالش‌ها داشته باشد.

همچنین، عدم معناداری چالش SO1 نشان می‌دهد که عدم انطباق نقشه راه با موازین اجتماعی در نمونه مورد مطالعه به عنوان یک چالش مستقل و تعیین‌کننده ظاهر نشده است. این نتیجه لزوماً به معنای کم‌اهمیت بودن ملاحظات اجتماعی نیست؛ زیرا سایر مؤلفه‌های اجتماعی، از جمله مسئولیت اجتماعی شرکت، در ساختار اولیه چالش‌ها لحاظ شده‌اند. به نظر می‌رسد ملاحظات اجتماعی در صنعت پتروشیمی بیشتر از طریق سازوکارهای سازمانی، نهادی، محیط‌زیستی و مسئولیت اجتماعی شرکت بازتاب پیدا می‌کنند و بنابراین، صورت‌بندی مشخص این چالش در قالب عدم انطباق نقشه راه با موازین اجتماعی سهم مستقل و معناداری در مدل نهایی ایجاد نکرده است.

در مجموع، حذف این چهار چالش نشان می‌دهد که ساختار چالش‌های تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران را نمی‌توان صرفاً با فهرستی از موانع استخراج‌شده از ادبیات توصیف کرد؛ بلکه اهمیت و نقش هر چالش به ویژگی‌های نهادی، بازار، سازمانی و عملیاتی بستر مورد مطالعه وابسته است. از این منظر، غربال‌سازی تجربی انجام‌شده در پژوهش حاضر امکان بومی‌سازی چارچوب اولیه و تمرکز مدل نهایی بر چالش‌هایی را فراهم کرده است که در شرایط صنعت پتروشیمی ایران نقش معنادارتری در شکل‌گیری چالش‌های تولید پایدار دارند.

پیچیدگی ذاتی در سیستم وجوه چالش‌های سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران که ناشی از تعاملات چندبعدی میان آن‌ها است، ایجاب می‌کند که در کنار چارچوب تحلیل روابط علی و چارچوب ساختاری نیز مورد استفاده قرار گیرد. روش مدل‌سازی ساختاری تفسیری امکان استخراج سطوح سلسله‌مراتبی میان وجوه را فراهم می‌کند و با نمایش جهت اثرگذاری‌ها در سطوح مختلف، درک جامعی از پویایی سیستم ارائه می‌دهد. نسخه نوتروسوفیک این روش، با قابلیت مدیریت عدم قطعیت و ابهام در قضاوت‌های خبرگان، دقت تحلیل را در محیط‌های واقعی و پرابهام افزایش می‌دهد. در صنعت پتروشیمی که تصمیم‌گیری‌ها اغلب با عدم قطعیت همراهند، چنین رویکردی قادر است روابط پنهان میان عوامل را آشکار سازد و مبنایی علمی برای سیاست‌گذاری پایدار ایجاد کند. مطابق با الگوریتم N-ISM ضمن نظرسنجی از ۱۹ نفر از مدیران عالی، معاونین، مدیران تولید و سیاست‌گذاران شرکت‌های پتروشیمی که استقرار تولید پایدار را به‌عنوان یک ضرورت راهبردی برای رقابت‌پذیری در بازارهای بین‌المللی تلقی می‌کردند، داده‌ها در قالب ماتریس‌های ارتباطات مستقیم نوتروسوفیک جمع‌آوری شد. در این نظرسنجی، دیدگاه خبرگان پیرامون تأثیرگذاری زوج وجوه، از بدون تأثیر $(0\ 0\ 0)$; $T_z\ I_z\ F_z$ تا تأثیر بسیار زیاد $(4\ 4\ 4)$; $T_z\ I_z\ F_z$ اعلام شد. برای کنترل کیفیت و سنجش توافق قضاوت‌های خبرگان بر روی روابط میان چالش‌ها در مدل N-ISM، شاخص همگرایی نظرات خبرگان بر مبنای قاعده اکثریت دو سوم به عنوان حد آستانه استفاده شد. پس از قطعی‌سازی ماتریس‌های روابط مستقیم نوتروسوفیک انفرادی، فراوانی نظرات روی وجود هر رابطه محاسبه گردید و حد آستانه همگرایی معادل ۷۰ درصد (موافق بودن یا عدم موافقت حداقل ۱۳ خبره از ۱۹ خبره به ترتیب بر روی وجود یا عدم وجود رابطه) مبنای قرار گرفت. با محاسبه شاخص همگرایی نظرات برای تک تک درایه‌های ماتریس روابط مستقیم ملاحظه شد که مقدار این شاخص برای تمام درایه‌ها بالای حد آستانه ۷۰ درصد قرار گرفت که نشان می‌داد قضاوت‌های خبرگان، در مجموع از اعتبار کافی برخوردار است.

پس از اعتبارسنجی نظر خبرگان، با محاسبه میانگین حسابی نظرات آن‌ها، ماتریس ارتباطات مستقیم نوتروسوفیک یکپارچه وجوه به صورت جدول ۴ حاصل گردید.

جدول ۴. ماتریس ارتباطات مستقیم نوتروسوفیک یکپارچه وجوه

سازمانی (OR)	دولتی (GO)	اطلاعاتی (IN)	مدیریتی (MA)	فناوری (TE)	...
سازمانی (OR)	$(0, 0, 0); 0/7, 0/6, 0/5$	$(1/91, 2/46, 3/12); 0/7, 0/6, 0/5$	$(2/17, 2/67, 3/36); 0/7, 0/6, 0/5$	$(2/46, 2/87, 3/38); 0/7, 0/6, 0/5$	$(2/25, 2/71, 3/36); 0/7, 0/6, 0/5$
دولتی (GO)	$(2/08, 2/6, 3/32); 0/7, 0/6, 0/5$	$(0, 0, 0); 0/7, 0/6, 0/5$	$(1/36, 1/96, 2/86); 0/7, 0/6, 0/5$	$(1/5, 2/22, 3/09); 0/7, 0/6, 0/5$	$(0/69, 1/28, 2/28); 0/7, 0/6, 0/5$
اطلاعاتی (IN)	$(2/06, 2/68, 3/46); 0/7, 0/6, 0/5$	$(1/18, 1/58, 2/47); 0/7, 0/6, 0/5$	$(0, 0, 0); 0/7, 0/6, 0/5$	$(2/2, 2/81, 3/47); 0/7, 0/6, 0/5$	$(2/52, 2/97, 3/52); 0/7, 0/6, 0/5$
مدیریتی (MA)	$(2/38, 2/86, 3/39); 0/7, 0/6, 0/5$	$(1/68, 2/43, 3/29); 0/7, 0/6, 0/5$	$(2/13, 2/55, 3/19); 0/7, 0/6, 0/5$	$(0, 0, 0); 0/7, 0/6, 0/5$	$(1/47, 2/23, 3/1); 0/7, 0/6, 0/5$
فناوری (TE)	$(2/55, 2/85, 3/35); 0/7, 0/6, 0/5$	$(1/86, 2/33, 3/1); 0/7, 0/6, 0/5$	$(2/16, 2/69, 3/36); 0/7, 0/6, 0/5$	$(2/47, 2/9, 3/44); 0/7, 0/6, 0/5$	$(0, 0, 0); 0/7, 0/6, 0/5$

در ادامه، به منظور مقایسه دقیق‌تر و محاسبه اثرات مستقیم و غیرمستقیم وجوه، مقادیر نوتروسوفیک، قطعی‌سازی شده و ماتریس امتیاز وجوه $S(\tilde{G}_D)$ با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد.

$$S(\tilde{G}_D) = \frac{1}{8} [a_i^l + a_i^m + a_i^u] \times (2 + \mu_i - \nu_i - w_i) \quad \text{رابطه (۴)}$$

با انجام محاسبات مربوطه، ماتریس امتیاز وجوه به صورت جدول ۵ حاصل گردید.

جدول ۵. ماتریس امتیاز وجوه

TE	EC	SO	EN	HR	EX	CO	MARK	MA	IN	GO	OR	
۱/۶۶	۱/۶۱	۱/۷۵	۱/۸۳	۱/۴۶	۱/۲۲	۱/۳۲	۱/۸۸	۱/۷۴	۱/۶۴	۱/۵	۰	سازمانی (OR)
۰/۸۵	۱/۶۳	۱/۰۹	۱/۸	۱/۰۲	۱/۹۲	۱/۵۵	۱/۷۶	۱/۳۶	۱/۲۴	۰	۱/۶	دولتی (GO)
۱/۸	۱/۶۱	۱/۷۶	۱/۶۹	۱/۶۵	۱/۵۶	۱/۶۲	۱/۶۵	۱/۷	۰	۱/۰۵	۱/۶۴	اطلاعاتی (IN)
۱/۳۶	۱/۸۱	۱/۸۴	۱/۸۲	۱/۹۱	۱/۸۳	۱/۹۱	۱/۲۷	۰	۱/۵۷	۱/۴۸	۱/۷۳	مدیریتی (MA)
۱/۵۸	۱/۶۵	۱/۴۱	۱	۰/۹	۱/۷۲	۱/۸۳	۰	۱/۵۵	۱/۷۹	۱/۸۴	۱/۴۵	بازار (MARK)
۱/۴۷	۱/۷۴	۰/۸۵	۱/۱۷	۱/۵۵	۰/۹۷	۰	۱/۰۲	۱/۶۹	۱/۵۶	۱/۹	۱/۹۲	پیچیدگی (CO)
۱/۵۴	۱/۶۱	۱/۳۵	۱/۵۸	۱/۱۱	۰	۱/۱۵	۱/۶۹	۱/۶	۱/۶۴	۱/۷۵	۰/۹	خارجی (EX)
۱/۹۴	۱/۶۸	۱/۸۸	۰/۹۳	۰	۰/۸۸	۱/۹۸	۱/۱۵	۱/۷۸	۱/۶۵	۱/۱۷	۱/۶۷	منابع انسانی (HR)
۱/۶۵	۱/۶۴	۱/۶۱	۰	۰/۹۱	۱/۷۲	۱/۴۳	۱/۵۶	۱/۸۵	۱/۸۵	۱/۵۶	۱/۶۳	زیست محیطی (EN)
۱/۷۲	۱/۷۸	۰	۱/۰۱	۱/۸۴	۱/۲	۱/۵۹	۱/۶۴	۱/۷۲	۱/۰۴	۱/۳	۱/۷۲	اجتماعی (SO)
۱/۷۴	۰	۱/۶۳	۱/۸۸	۱/۲۶	۱/۶۷	۱/۰۸	۱/۶	۱/۶۱	۱/۷۲	۱/۷۷	۱/۹۸	اقتصادی / مالی (EC)
۰	۱/۹	۱/۸۲	۱/۶۴	۱/۸۱	۱/۷۸	۱/۷۷	۱/۷۲	۱/۷۶	۱/۶۴	۱/۴۶	۱/۷۵	فناوری (TE)

با محاسبه میانگین حسابی درایه‌های این ماتریس و نظرسنجی از خبرگان، حد آستانه پذیرش وجود ارتباط میان زوج وجوه و استخراج ماتریس دستیابی اولیه $[D]$ ، ۲۰ درصد بیش از مقدار میانگین (یعنی $\lambda=1/65$) به صورت قراردادی در نظر گرفته شد. بر این اساس، مقدار درایه‌هایی از ماتریس امتیاز وجوه که بزرگتر یا مساوی با حد آستانه $1/65$ بود عدد متناظر ۱ و مقدار درایه‌های کمتر از $1/65$ ، عدد متناظر صفر را در ماتریس دستیابی اولیه به خود اختصاص می‌دهند (جدول ۶).

جدول ۶. ماتریس دستیابی اولیه وجوه $[D]$

TE	EC	SO	EN	HR	EX	CO	MARK	MA	IN	GO	OR	
۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	سازمانی (OR)
۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	دولتی (GO)
۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	اطلاعاتی (IN)
۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	مدیریتی (MA)
۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	بازار (MARK)
۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	پیچیدگی (CO)
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	خارجی (EX)
۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	منابع انسانی (HR)
۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	زیست محیطی (EN)
۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	اجتماعی (SO)
۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	اقتصادی / مالی (EC)
۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	فناوری (TE)

با تبدیل درایه‌های قطر اصلی ماتریس دستیابی اولیه به ۱ (تشکیل ماتریس خودتعالی ساختاری) و ایجاد سازگاری در این ماتریس با اعمال روابط تعدی برای احصاء روابط غیر مستقیم میان وجوه، ماتریس دستیابی نهایی وجوه $[T]$ به صورت جدول ۷ بدست آمد.

جدول ۷. ماتریس دستیابی نهایی وجوه $[T]$

TE	EC	SO	EN	HR	EX	CO	MARK	MA	IN	GO	OR	
۱	۱*	۱	۱	۱*	۱*	۱*	۱	۱	۱*	۱*	۱	سازمانی (OR)
۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱*	۱	۱*	۱*	۱*	۰	دولتی (GO)
۱	۱*	۱	۱	۱*	۱*	۱*	۱*	۱	۱*	۰	۱*	اطلاعاتی (IN)
۱*	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱*	۱*	۱*	۱*	۱	مدیریتی (MA)
۱*	۱*	۱*	۱*	۰	۱	۱	۱*	۱*	۱	۱	۱*	بازار (MARK)
۱*	۱	۱*	۱*	۱*	۱*	۱*	۱*	۱	۱*	۱	۱	پس‌پسندگی (CO)
۰	۰	۰	۱*	۰	۱*	۱*	۱	۰	۱*	۱	۰	خارجی (EX)
۱	۱	۱	۱*	۱*	۱*	۱	۱*	۱	۱*	۱*	۱	منابع انسانی (HR)
۱*	۱*	۱*	۱*	۱*	۱	۱*	۱*	۱	۱	۱*	۱*	زیست محیطی (EN)
۱	۱	۱*	۱*	۱	۱*	۱*	۱*	۱	۱*	۱*	۱	اجتماعی (SO)
۱	۱*	۱*	۱	۱*	۱	۱*	۱*	۱*	۱	۱	۱	اقتصادی / مالی (EC)
۱*	۱	۱	۱*	۱	۱	۱	۱	۱	۱*	۱*	۱	فناوری (TE)

با تشکیل ماتریس دستیابی نهایی، مجموعه دستیابی و مجموعه پیش‌نیاز هریک از وجوه به ترتیب با جمع سطری و ستونی درایه‌های این ماتریس به صورت جدول ۸ بدست می‌آید.

جدول ۸. مجموعه‌های دستیابی و پیش‌نیاز وجوه

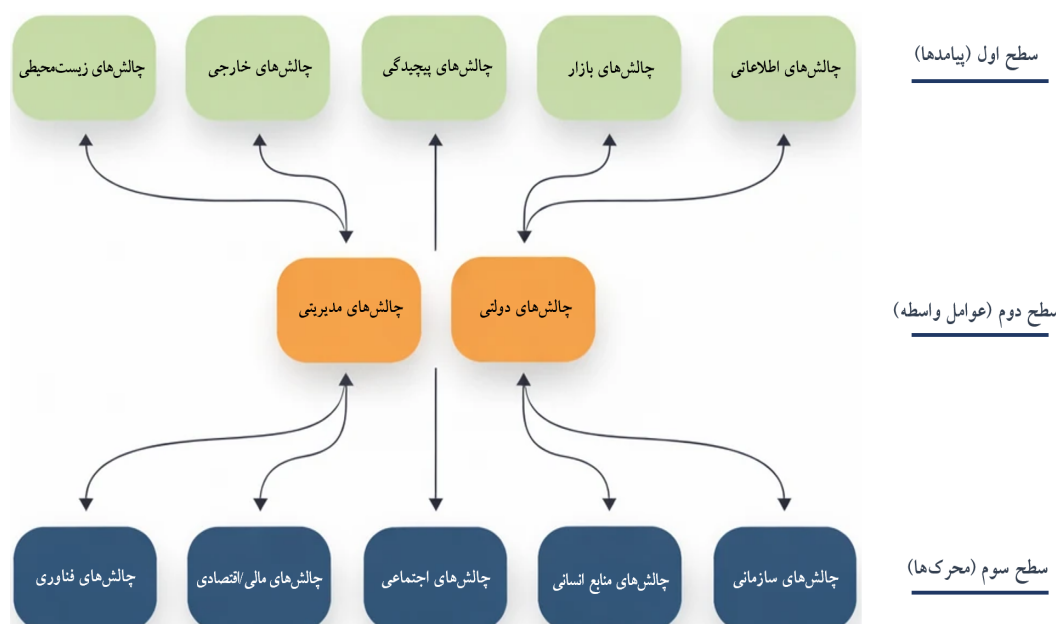
TE	EC	SO	EN	HR	EX	CO	MARK	MA	IN	GO	OR	وجوه
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۶	۱۲	۱۱	۱۲	۱۱	۷	۱۲	مجموعه دستیابی
۱۰	۱۰	۱۰	۱۲	۹	۱۲	۱۲	۱۲	۱۱	۱۲	۱۱	۱۰	مجموعه پیش‌نیاز

پس از تعیین مجموعه دستیابی و پیش‌نیاز، به منظور سطح‌بندی وجوه، نخست، عناصر مشترک میان این دو مجموعه برای هر وجه مشخص شد. سپس با توجه به این سه مجموعه (دستیابی، پیش‌نیاز و عناصر مشترک)، سطح هر وجه تعیین می‌شود. در نخستین مرحله سطح‌بندی، وجهی در بالاترین سطح قرار می‌گیرد که مجموعه دستیابی آن کاملاً با عناصر مشترک برابر باشد. پس از شناسایی این وجه یا وجوه، آن‌ها از جدول حذف شده و مرحله بعدی با وجوه باقیمانده تکرار می‌شود. این روند به صورت گام‌به‌گام ادامه می‌یابد تا سطح تمامی وجوه تعیین گردد. در این پژوهش فرآیند سطح‌بندی وجوه چالش‌های پذیرش و استقرار سیستم‌های تولید پایدار در صنایع پتروشیمی ایران طی سه تکرار مطابق با جدول ۹ انجام پذیرفت.

جدول ۹. فرآیند سطح‌بندی وجوه چالش‌های پذیرش و استقرار سیستم‌های تولید پایدار در صنایع پتروشیمی ایران

خروجی هر راند از الگوریتم	ردیف	مجموعه دستیابی	مجموعه پیش‌نیاز	عناصر مشترک
راند اول				
	۱	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D3, D4, D5, D6, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D3, D4, D5, D6, D8, D9, D10, D11, D12
	۲	D2, D3, D4, D5, D6, D7, D9	D1, D2, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D2, D4, D5, D6, D7, D9
خروجی -- سطح ۱	۳	D1, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12
	۴	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D8, D9, D10, D11, D12
خروجی -- سطح ۱	۵	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D9, D10, D11, D12	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D9, D10, D11, D12
خروجی -- سطح ۱	۶	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12
خروجی -- سطح ۱	۷	D2, D3, D5, D6, D7, D9	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D2, D3, D5, D6, D7, D9
	۸	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D3, D4, D6, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D3, D4, D6, D8, D9, D10, D11, D12
خروجی -- سطح ۱	۹	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12
	۱۰	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D3, D4, D5, D6, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D3, D4, D5, D6, D8, D9, D10, D11, D12
	۱۱	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D3, D4, D5, D6, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D3, D4, D5, D6, D8, D9, D10, D11, D12
	۱۲	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D3, D4, D5, D6, D8, D9, D10, D11, D12	D1, D3, D4, D5, D6, D8, D9, D10, D11, D12
راند دوم				
	۱	D1, D2, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D4, D8, D10, D11, D12
خروجی -- سطح ۲	۲	D2, D4	D1, D2, D4, D8, D10, D11, D12	D2, D4
خروجی -- سطح ۲	۴	D1, D2, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D2, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D2, D4, D8, D10, D11, D12
	۸	D1, D2, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D4, D8, D10, D11, D12
	۱۰	D1, D2, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D4, D8, D10, D11, D12
	۱۱	D1, D2, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D4, D8, D10, D11, D12
	۱۲	D1, D2, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D4, D8, D10, D11, D12	D1, D4, D8, D10, D11, D12
راند سوم				
خروجی -- سطح ۳	۱	D1, D8, D10, D11, D12	D1, D8, D10, D11, D12	D1, D8, D10, D11, D12
خروجی -- سطح ۳	۸	D1, D8, D10, D11, D12	D1, D8, D10, D11, D12	D1, D8, D10, D11, D12
خروجی -- سطح ۳	۱۰	D1, D8, D10, D11, D12	D1, D8, D10, D11, D12	D1, D8, D10, D11, D12
خروجی -- سطح ۳	۱۱	D1, D8, D10, D11, D12	D1, D8, D10, D11, D12	D1, D8, D10, D11, D12
خروجی -- سطح ۳	۱۲	D1, D8, D10, D11, D12	D1, D8, D10, D11, D12	D1, D8, D10, D11, D12

با مشخص شدن روابط و سطوح وجوه، مدل ساختاری (سلسله‌مراتبی) نهایی به صورت شکل ۴ حاصل گردید.



شکل ۴. مدل ساختاری (سلسله‌مراتبی) وجوه چالش‌های پذیرش و استقرار سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران

با توجه به این مدل ساختاری ملاحظه می‌شود که در سطح سوم، یعنی عوامل محرک ریشه‌ای، پنج وجه از چالش‌ها اعم از: سازمانی (D1)، منابع انسانی (D8)، اجتماعی (D10)، اقتصادی/مالی (D11) و فناوری (D12) قرار گرفته‌اند. استقرار این وجوه در این سطح نشان می‌دهد که موانع اصلی پذیرش و استقرار سیستم‌های تولید پایدار در صنایع پتروشیمی ایران، بیش از آن‌که در لایه‌های بیرونی و سطحی نمود پیدا کنند، ریشه در «ساختار و فرهنگ سازمانی»، «کیفیت سرمایه انسانی»، «بستر اجتماعی و فرهنگ عمومی»، «قیود و عدم قطعیت‌های اقتصادی/مالی» و «زیرساخت و بلوغ فناوری» دارند. به بیان دیگر، اگر سازمان‌ها ساختارهای انعطاف‌پذیر، رویه‌های رسمی حامی پایداری، نظام‌های انگیزشی همسو، نیروی انسانی توانمند و آشنا با مفاهیم پایداری، حمایت اجتماعی نسبی و حداقلی از سوی جامعه پیرامونی، توجیه‌پذیری اقتصادی و دسترسی به فناوری‌های کارآمد و به‌روز نداشته باشند، هرگونه مداخله در سایر وجوه عمدتاً در سطح «شعار» باقی می‌ماند. این سطح‌بندی، تصویری انتقادی از وضعیت موجود ارائه می‌کند: ضعف در این پنج وجه، به‌مثابه «گلوگاه‌های عمیق» عمل کرده و حتی سیاست‌های حمایتی یا فشارهای بیرونی را نیز تا حد زیادی خنثی می‌کند.

در سطح دوم، یعنی عوامل واسطه‌ای/پیوندی، دو وجه دولتی (D2) و مدیریتی (D4) قرار گرفتند. این جایگاه نشان می‌دهد که سیاست‌ها، مقررات و مشوق‌های دولتی از یک‌سو و سبک رهبری، نظام تصمیم‌گیری و کیفیت حکمرانی شرکتی از سوی دیگر، نه کاملاً ریشه‌ای‌اند و نه صرفاً پیامدی؛ بلکه نقش «مبدل» را بین زیرساخت‌های ریشه‌ای (سازمانی، انسانی، اجتماعی، اقتصادی، فناوری) و پیامدهای عینی (بازار، اطلاعات، پیچیدگی، محیط‌زیست، فشارهای خارجی) ایفا می‌کنند. به بیان دیگر، اگرچه دولت و مدیریت می‌توانند با تدوین سیاست‌های الزام‌آور، حمایت‌های مالیاتی، یارانه‌ای و تنظیمی و نیز با اتخاذ استراتژی‌های روشن و پایدار، بستر اجرای تولید پایدار را تسهیل کنند، اما خود آن‌ها نیز تا حد زیادی از وضعیت ریشه‌ای سازمان، ظرفیت منابع انسانی، محدودیت‌های مالی و بلوغ فناوری تأثیر می‌پذیرند. در عین حال، سطح‌بندی نشان می‌دهد که هرگونه اصلاح در وجه دولتی و مدیریتی می‌تواند اثرات نسبتاً سریعی بر وجوه پیامدی بگذارد؛ بنابراین، این دو وجه، نقاط مداخله‌ای «سیاست‌گذارانه» و «مدیریتی» محسوب می‌شوند که می‌توانند با طراحی هوشمندانه، شکاف بین شرایط ریشه‌ای و پیامدهای مطلوب را کاهش دهند.

در سطح اول، یعنی عوامل پیامدی/وابسته، پنج وجه اطلاعاتی (D3)، بازار (D5)، پیچیدگی (D6)، خارجی (D7) و زیست‌محیطی (D9) قرار گرفتند. این سطح نشان می‌دهد که کیفیت نظام اطلاعاتی و شفافیت داده‌ها، وضعیت تقاضای بازار و ترجیحات مشتریان، ادراک بنگاه‌ها از پیچیدگی

فنی و اجرایی تولید پایدار، شدت فشارهای خارجی (از سوی نهادهای بین‌المللی، رقبا و غیره) و نهایتاً وضعیت عملکرد زیست‌محیطی، بیش از آن‌که علت اولیه باشند، بازتابی از وضعیت وجوه ریشه‌ای و نحوه مداخله دولت و مدیریت هستند. به تعبیر نقادانه، این سطح‌بندی هشدار می‌دهد که تمرکز صرف بر اصلاحات سطحی مانند کمپین‌های اطلاع‌رسانی، برندسازی سبز، پاسخ‌گویی موردی به فشارهای بین‌المللی یا اجرای پراکنده پروژه‌های زیست‌محیطی، بدون اصلاح جدی در وجوه ریشه‌ای و واسطه‌ای، منجر به بهبود پایدار نخواهد شد. این وجوه پیامدی، در واقع شاخص‌های بیرونی موفقیت یا شکست راهبردهای عمیق‌تر در حوزه سازمان، منابع انسانی، اقتصاد، فناوری و حاکمیت دولتی/مدیریتی هستند و باید بیشتر به‌عنوان ابزار پایش و ارزیابی موفقیت سیاست‌ها و مداخلات ریشه‌ای دیده شوند تا نقطه شروع اقدام.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر با هدف شناسایی، غربال‌سازی و تبیین ساختار علی و سلسله‌مراتبی چالش‌های پذیرش و استقرار سیستم تولید پایدار در صنعت پتروشیمی ایران انجام شد. در مرحله نخست، ۴۵ چالش در قالب ۱۲ وجه از مطالعات پیشین استخراج و با استفاده از تحلیل عاملی تأییدی مرتبه دوم در بستر صنعت پتروشیمی ایران ارزیابی شد که در نهایت ۴۱ چالش در ساختار نهایی باقی ماندند. نتایج نشان داد وجوه منابع انسانی، اقتصادی/مالی و سازمانی بیشترین نقش را در شکل‌گیری سازه کلان چالش‌های تولید پایدار دارند. در مرحله دوم نیز، به‌کارگیری مدل‌سازی ساختاری تفسیری نوتروسوفیک نشان داد که وجوه فناوری، اقتصادی/مالی، اجتماعی، منابع انسانی و سازمانی در سطح ریشه‌ای، وجوه دولتی و مدیریتی در سطح واسطه‌ای و وجوه اطلاعاتی، بازار، پیچیدگی، خارجی و زیست‌محیطی در سطح پیامدی قرار دارند. بنابراین، گذار به تولید پایدار در صنعت پتروشیمی را نمی‌توان صرفاً از طریق مداخلات فنی یا اصلاحات سطحی دنبال کرد؛ بلکه موفقیت آن به اصلاح هم‌زمان بنیان‌های سازمانی، انسانی، مالی و فناورانه وابسته است.

پیامدهای نظری

از منظر نظری، پژوهش حاضر سه سهم اصلی برای ادبیات تولید پایدار به همراه داشت. نخست، در حالی که بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین به شناسایی یا دسته‌بندی موانع تولید پایدار پرداخته‌اند، پژوهش حاضر این چالش‌ها را در بافت صنعت‌ویژه پتروشیمی ایران اعتبارسنجی و غربال کرده و از این طریق نشان داد که همه چالش‌های استخراج‌شده از ادبیات الزاماً در یک بستر صنعتی اهمیت یکسانی ندارند. حذف چهار چالش غیرمعنادار از فهرست اولیه ۴۵‌گانه نیز مؤید اهمیت بومی‌سازی چارچوب‌های عمومی در مطالعات تولید پایدار است.

دوم، پژوهش حاضر از سطح فهرست‌سازی چالش‌ها فراتر رفته و با ترکیب رویکردهای تحلیل عاملی تأییدی و N-ISM، ساختار علی و سلسله‌مراتبی وجوه چالش‌ها را آشکار ساخت. این رویکرد نشان داد که چالش‌های تولید پایدار مجموعه‌ای از موانع مستقل نیستند، بلکه در قالب سطوح ریشه‌ای، واسطه‌ای و پیامدی به یکدیگر وابسته‌اند. از این منظر، یافته‌های پژوهش به ادبیات موجود کمک می‌کند تا میان چالش‌های مولد و چالش‌های پیامدی تمایز قائل شود.

سوم، استفاده از منطق نوتروسوفیک در مدل‌سازی روابط میان وجوه، امکان لحاظ کردن درستی، نادرستی و نامعینی در قضاوت خبرگان را فراهم ساخت؛ موضوعی که در مسائل پیچیده و چندبعدی تولید پایدار، به‌ویژه در شرایطی که روابط میان چالش‌ها برای خبرگان کاملاً قطعی نیست، اهمیت دارد. در نتیجه، پژوهش حاضر علاوه بر ارائه یک مدل صنعت‌ویژه، یک چارچوب روش‌شناختی برای تحلیل ساختاری چالش‌های پایداری در محیط‌های تصمیم‌گیری مبهم ارائه نمود.

پیامدهای مدیریتی

از منظر مدیریتی، مهم‌ترین پیام پژوهش آن است که مدیران پتروشیمی نباید منابع و اقدامات پایداری را صرفاً به چالش‌های قابل مشاهده در سطح عملیاتی، مانند کنترل آلاینده‌ها یا بهبود اطلاعات، اختصاص دهند. قرار گرفتن وجوه منابع انسانی، سازمانی، اقتصادی/مالی و فناوری در سطح ریشه‌ای نشان می‌دهد که مداخلات مؤثر باید از این لایه‌ها آغاز شوند. بنابراین، مدیران ارشد

مجتمع‌های پتروشیمی می‌توانند برنامه‌های گذار را در سه محور دنبال کنند: توانمندسازی سرمایه انسانی و توسعه شایستگی‌های پایداری، تأمین و تخصیص منابع مالی برای سرمایه‌گذاری‌های پایدار و ارتقای ظرفیت سازمانی و فناوریانه برای پذیرش تغییر. همچنین، قرار گرفتن وجوه دولتی و مدیریتی در سطح واسطه‌ای نشان می‌دهد که حتی اصلاح بنیان‌های داخلی بدون سازوکارهای مناسب مدیریتی و نهادی الزاماً به نتایج پایدار منجر نمی‌شود. از این رو، مدیران باید شاخص‌های پایداری را در نظام ارزیابی عملکرد، تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی عملیاتی وارد کنند و هم‌زمان سازوکارهای هماهنگی میان واحدهای سازمانی و زنجیره تأمین را تقویت نمایند. بر اساس ساختار مدل، بهبود چالش‌های سطح پیامدی مانند اطلاعات، بازار و محیط زیست زمانی اثربخش‌تر خواهد بود که ابتدا موانع ریشه‌ای و واسطه‌ای مورد توجه قرار گیرند.

دلالت‌های سیاستی

یافته‌های پژوهش برای سیاست‌گذاران صنعت پتروشیمی نیز پیامدهای مشخصی دارد. از آن‌جا که چالش‌های اقتصادی/مالی، فناوری و سازمانی در لایه‌های ریشه‌ای قرار گرفته‌اند، سیاست‌های حمایتی نباید صرفاً بر وضع الزامات زیست‌محیطی متمرکز باشند، بلکه باید شرایط امکان‌پذیری گذار را نیز فراهم کنند. در این راستا، سیاست‌گذاران می‌توانند مشوق‌های مالی هدفمند برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کم‌مصرف و پاک، تسهیلات برای نوسازی تجهیزات و حمایت از توسعه فناوری داخلی را در اولویت قرار دهند. همچنین، تدوین استانداردها و دستورالعمل‌های شفاف برای تولید پایدار و ایجاد سازوکارهای پایش و گزارش‌دهی عملکرد پایداری می‌تواند به کاهش ابهام نهادی و تقویت هماهنگی میان بازیگران صنعت کمک کند.

از سوی دیگر، سیاست‌گذاری باید به صورت مرحله‌ای انجام شود؛ به این معنا که اصلاحات فناوریانه و مالی، توسعه سرمایه انسانی و ارتقای ظرفیت سازمانی به عنوان پیش‌نیازهای اولیه در نظر گرفته شوند و سپس سیاست‌های مرتبط با شفافیت اطلاعات، بازار و عملکرد زیست‌محیطی توسعه یابند. چنین رویکردی با ساختار سلسله‌مراتبی مدل پژوهش سازگارتر از سیاست‌های پراکنده و منفرد است.

پیاده‌سازی پژوهش حاضر، با محدودیت‌هایی مواجه بوده است که شناخت آن‌ها، زمینه را برای تفسیر نتایج فراهم کرده و مسیرهای احتمالی را برای پژوهش‌های آتی روشن می‌سازد. نخست، پژوهش ماهیتی مقطعی داشته و مدل ارائه‌شده وضعیت چالش‌ها را در مقطع زمانی مطالعه منعکس می‌کند؛ بنابراین، تغییرات اقتصادی، فناوریانه و نهادی می‌توانند در آینده روابط میان چالش‌ها یا اهمیت نسبی آن‌ها را تغییر دهند. دوم، مدل N-ISM بر قضاوت ۱۹ خبره استوار است و اگرچه استفاده از منطق نوتروسوفیک امکان بازنمایی عدم قطعیت قضاوت‌ها را تا حد قابل توجهی فراهم کرده است، اما نمی‌تواند احتمال سوگیری ناشی از تجربه، موقعیت سازمانی یا دیدگاه فردی خبرگان را به طور کامل حذف کند. سوم، ویژگی‌های خاص صنعت پتروشیمی ایران، از جمله شرایط اقتصادی و محدودیت‌های فناوریانه، می‌تواند بر اهمیت نسبی برخی چالش‌ها اثرگذار باشد؛ بنابراین تعمیم مستقیم نتایج به سایر صنایع یا کشورها باید با احتیاط انجام شود.

بر اساس یافته‌ها و محدودیت‌های پژوهش، چند مسیر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود. نخست، پژوهش‌های آینده می‌توانند با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم‌ها، روابط شناسایی‌شده در مدل حاضر را در طول زمان بررسی کرده و حلقه‌های بازخورد و آثار بلندمدت سیاست‌های مختلف بر گذار به تولید پایدار را شبیه‌سازی کنند. دوم، انجام مطالعات تطبیقی میان مجتمع‌های پتروشیمی بالادستی و پایین‌دستی می‌تواند مشخص کند که آیا ساختار چالش‌ها و جایگاه وجوه ریشه‌ای و واسطه‌ای در بخش‌های مختلف زنجیره ارزش یکسان است یا خیر. سوم، پیشنهاد می‌شود چارچوب حاضر در سایر صنایع فرایندی و انرژی‌بر مانند فولاد، پالایشگاه‌ها و صنایع شیمیایی آزمون و با نتایج صنعت پتروشیمی مقایسه شود. چهارم، مطالعات آینده می‌توانند با ترکیب N-ISM با روش‌هایی مانند DEMATEL، ANP یا روش‌های پویای تصمیم‌گیری، شدت روابط و اولویت مداخلات را نیز کمی‌سازی کنند. در نهایت، انجام مطالعات طولی می‌تواند مشخص کند که با اجرای سیاست‌ها و اقدامات اصلاحی، جایگاه و شدت چالش‌های شناسایی‌شده در طول زمان چگونه تغییر می‌کند.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

منابع

1. Abbasi, M., & Dehghani, M. R. (2022). Structuring and weighting sustainable and green production indicators of the country's thermal power plants using the Best-Worst Method. *Industrial Management Perspective*, 12(2), 199-225. [In Persian]
2. Abdel-Basset, M., Gunasekaran, M., Mohamed, M., & Smarandache, F. (2019). A novel method for solving decision-making problems with hesitant bipolar-valued neutrosophic soft expert sets. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 36(6), 5855–5869.
3. Abdullah, M., Ullah, A., Jamal, M. F., Aldakheel, E. A., Khafaga, D. S., Sana, & Rasool, Z. (2026). How metaverse-enabled digital transformation drives sustainable supply chain innovation: evidence from Pakistan's textile industry. *Scientific Reports*.
4. Ahmad, S., Wong, K. Y., & Butt, S. I. (2023). Status of sustainable manufacturing practices: literature review and trends of triple bottom-line-based sustainability assessment methodologies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 43068-43095.
5. Ajali, M., & Tabarzadi, A. (2023). Evaluating green production drivers from the perspective of experts with the aim of improving the environment. *Journal of Environment and Development*, 14(27), 3-19. [In Persian]
6. Akram, S., & Ali, M. (2026). Impact Of Industry 4.0 Technologies On Sustainable Performance With Mediating Effect Of Sustainable Supply Chain Management. *Annual Methodological Archive Research Review*, 4(5), 19-30.
7. Alayón, C. L., Säfsten, K., & Johansson, G. (2022). Barriers and enablers for the adoption of sustainable manufacturing by manufacturing SMEs. *Sustainability*, 14(4), 2364.
8. Aliakbari Nouri, F., & Shafiei Nikabadi, M. (2025). Exploring the causal relationships between factors affecting taxpayer adoption of e-invoicing: application of interval neutrosophic DEMATEL. *Kybernetes*.
9. Alqahtani, A. Y., & Makki, A. A. (2022). Barriers to the Sustainable Implementation of Environmentally Conscious Manufacturing: A Contextual-Based Interpretive Structural Model. *Sustainability*, 14(16), 10066.
10. Ayber, S., & Erginel, N. (2020). Developing the neutrosophic fuzzy FMEA method as evaluating risk assessment tool. In *Intelligent and Fuzzy Techniques in Big Data Analytics and Decision Making: Proceedings of the INFUS 2019 Conference*, Istanbul, Turkey, July 23-25, 2019 (pp. 1130-1137). Springer International Publishing.
11. Azad, M. A. (2025). Sustainable manufacturing practices in the apparel industry: Integrating eco-friendly materials and processes. *Authorea Preprints*.
12. Balci, G., & Surucu-Balci, E. (2021). Blockchain adoption in the maritime supply chain: Examining barriers and salient stakeholders in containerized international trade. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 156, 102539.
13. Bambam, A. K., & Gajrani, K. K. (2023). Challenges in achieving sustainability during manufacturing. In *Sustainable Materials and Manufacturing Technologies* (pp. 108-124). CRC Press.
14. Batwara, A., Sharma, V., & Makkar, M. (2024). Prioritization of the approaches for overcoming smart sustainable manufacturing barriers using stochastic fuzzy EDAS method. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-23.
15. Biswas, P., Pramanik, S., & Giri, B. C. (2015). Cosine similarity measure based multi-attribute decision-making with trapezoidal fuzzy neutrosophic numbers. *Neutrosophic sets and systems*, 8, 46-56.
16. Broumi, S., Bakali, A., Talea, M., Smarandache, F., & Vladareanu, L. (2016). Shortest path problem under triangular fuzzy neutrosophic information. *Applied Mechanics and Materials*, 841, 184–191.

17. Brown, R. (2020). The social identity approach: Appraising the Tajfellian legacy. *British Journal of Social Psychology*, 59(1), 5-25.
18. Budi, P. N., Afa, Y. M. F., & Fanani, R. Z. (2020). Green Manufacturing Challenge in Small and Medium Industries (SMEs) Batik Laweyan Surakarta. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 202, p. 03011). EDP Sciences.
19. Cai, Q., Han, J., Zhou, X., Zhao, S., Li, L., Liu, H., ... & Zhu, H. (2026). A Comprehensive Review of Human-Robot Collaborative Manufacturing Systems: Technologies, Applications, and Future Trends. *Sustainability* (2071-1050), 18(1).
20. Çelikbilek, Y. (2025). Evaluation of the renewable energy sources with an integrated neutrosophic DEMATEL-ANP-VIKOR approach. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, e14589.
21. Ching, N. T., Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Maroufkhani, P., & Asadi, S. (2022). Industry 4.0 applications for sustainable manufacturing: A systematic literature review and a roadmap to sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130133.
22. Chourasiya, R., Pandey, S., & Malviya, R. K. (2024). Investigation and Assessment of the Barriers to Sustainable Manufacturing Adoption in the Indian Textile Industry. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 8(1), 81-109.
23. Çipi, A., Ferreira, A. C., Ferreira, F. A., & Ferreira, N. C. (2025). Using interpretive structural modeling (ISM) to detect and define initiatives that facilitate hemodynamic laboratory management. *International Transactions in Operational Research*, 32(4), 2117-2138.
24. Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological bulletin*, 112(1), 155.
25. Dabbagh, R., & Soltanmohammadi, M. (2021). Identifying and ranking factors affecting the achievement of sustainable production (Case study: A selected food industry company). *Commercial Surveys*, 19(106), 25-40. [In Persian]
26. Dağıstanlı, H. A. (2025). Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) using Neutrosophic Best Worst Method (BWM): A Case Study of Helicopter Assembly Line for Military Aviation Area. *Journal of Intelligent Decision Making and Information Science*, 2, 174-185.
27. Debnath, B., Taha, M. R., Siraj, M. T., Jahin, M. F., Ovi, S. I., Bari, A. M., ... & Raihan, A. (2024). A grey approach to assess the challenges to adopting sustainable production practices in the apparel manufacturing industry: Implications for sustainability. *Results in Engineering*, 22, 102006.
28. Deli, I., & Şubaş, Y. (2017a). Some weighted geometric operators with SVTrN-numbers and their application to multi-criteria decision making problems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 32(1), 291-301.
29. Deli, I., & Şubaş, Y. (2017b). A ranking method of single valued neutrosophic numbers and its applications to multi-attribute decision making problems. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 8(4), 1309-1322.
30. Edalatpanah, S. A., Sıcakyüz, Ç., Nourkhah, S. A., & Pamucar, D. (2025). Prioritizing critical success factors for wind turbine suppliers: a neutrosophic hybrid DEMATEL and ANP approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-25.
31. Farokh, M. (2023). Designing a sustainable closed-loop supply chain model by investigating carbon tax and technology selection in the battery industry. *Industrial Management Perspective*, 13(4), 46-84. [In Persian]
32. Ghag, N., Acharya, P., & Khanapuri, V. (2023). Analyzing the sustainable international competitiveness factors of SMEs by Fuzzy Delphi and Neutrosophic DEMATEL. *Business Strategy & Development*.
33. Guo, Y., & Wang, J. (2021). Neutrosophic decision-making and its application in complex systems: A comprehensive review. *Complexity*, 2021, Article 6698452.
34. Gupta, S., Raj, S., Garg, A., & Gupta, S. (2025). Analyzing shopping cart abandonment enablers: an ISM and MICMAC approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 42(1), 61-85.
35. Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2014). Exploratory factor analysis. *Multivariate data analysis*, 7, 100-100.

36. Harikannan, N., & Vinodh, S. (2025). State of art review on sustainable manufacturing and Industry 4.0. *Business Strategy and the Environment*, 34(1), 872-913.
37. Hariyani, D., Mishra, S., Hariyani, P., & Sharma, M. K. (2023a). Drivers and motives for sustainable manufacturing system. *Innovation and Green Development*, 2(1), 100031.
38. Hariyani, D., Mishra, S., & Sharma, M. K. (2023b). A descriptive statistical analysis of barriers to the adoption of integrated sustainable-green-lean-six sigma-agile manufacturing system (ISGLSAMS) in Indian manufacturing industries. *Benchmarking: An International Journal*, 30(8), 2705-2733.
39. Hariyani, D., Mishra, S., Sharma, M. K., & Hariyani, P. (2023c). Organizational barriers to the sustainable manufacturing system: A literature review. *Environmental Challenges*, 100606.
40. Henseler, J., Hubona, G., & Ray, P. A. (2016). Using PLS path modeling in new technology research: updated guidelines. *Industrial management & data systems*, 116(1), 2-20.
41. Isik, M. (2025). Prospects and challenges of the metaverse in pursuing sustainable development. *Journal of Operations Intelligence*, 3(1), 256-266.
42. Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., Kumar, A., Luthra, S., & Pongsakornrunsilp, S. (2021). Two decades of research trends and transformations in manufacturing sustainability: A systematic literature review and future research agenda. *Production Engineering*, 1-25.
43. Kannan, D., Gholipour, P., & Bai, C. (2023). Smart manufacturing as a strategic tool to mitigate sustainable manufacturing challenges: a case approach. *Annals of Operations Research*, 331(1), 543-579.
44. Karadayi-Usta, S. (2022). A Novel Neutrosophic Interpretive Structural Modeling Approach: Hierarchical Visual Graphs of Indeterminate Causalities.
45. Khan, S. A., Shankar, A., Singh, A. K., Gupta, S., Chaudhary, V., Gupta, P., ... & Kumar, S. (2022). Analyzing Barriers of Industry 4.0 Enabled Sustainable Manufacturing to Achieve Circular Economy. *In Biennial International Conference on Future Learning Aspects of Mechanical Engineering* (pp. 287-291). Singapore: Springer Nature Singapore.
46. Khang, A., & Akhai, S. (2024). Green Intelligent and Sustainable Manufacturing: Key Advancements, Benefits, Challenges, and Applications for Transforming Industry. *Machine Vision and Industrial Robotics in Manufacturing*, 405-417.
47. Kitila, L. G., Duc, E., Durieux, S., & Taddese, G. A. (2026). An integrated fuzzy AHP-fuzzy TOPSIS approach for multi-criteria decision-making framework in sustainable manufacturing process selection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 142(1), 559-583.
48. Kline, R. B. (2023). Principles and practice of structural equation modeling. Guilford publications.
49. Kumar, S., & Barua, M. K. (2022). Sustainability of operations through disruptive technologies in the petroleum supply chain. *Benchmarking: An International Journal*, 29(5), 1640-1676.
50. Luo, M., Wu, L., Zhou, K., & Zhang, H. (2019). Multi-criteria decision making method based on the single valued neutrosophic sets. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 37(2), 2403-2417.
51. Mathiyazhagan, K., Sengupta, S., & Poovazhagan, L. (2018). A decision making trial and evaluation laboratory approach to analyse the challenges to environmentally sustainable manufacturing in Indian automobile industry. *Sustainable Production and Consumption*, 16, 58-67.
52. Md Rodzi, Z. B., Mohd Amin, F. A., Jamiatun, N., Qaiyyum, A., Al-Sharqi, F., Zaharudin, Z. A., & Khair, M. H. M. (2023). Integrated Single-Valued Neutrosophic Normalized Weighted Bonferroni Mean (SVNNWBM)-DEMATEL for Analyzing the Key Barriers to Halal Certification Adoption in Malaysia. *International Journal of Neutrosophic Science (IJNS)*, 21(3).
53. Mousavinezhad Moghaddam, S. A., Safari, H., & Bayati, A. (2025). Network analysis of hierarchical impacts and risk assessment of the petrochemical industry using Neutrosophic multi-criteria decision-making methods. *Industrial Management Perspective*, 15(4), 9-34. [In Persian]
54. Niewiadomski, P., & Stachowiak, A. (2024). Identification of Barriers to Sustainable Manufacturing Implementation—The Perspective of Manufacturers of Parts and Components for Agricultural Transport. *Sustainability*, 16(6), 2244.

55. Opoku, R. K., & Li, X. (2025). Sustainable management practices, operational and sustainable performance in manufacturing contexts: empirical evidence from a developing economy. *Journal of Responsible Production and Consumption*, 2(1), 50-84.
56. Pathak, S. K., Karwasra, K., Sharma, V., & Sharma, V. (2021). Analysis of barriers to green manufacturing using hybrid approach: an investigatory case study on Indian automotive industry. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 5, 545-560.
57. Pati, S., & Agrawal, R. (2025). Enabling sustainable circular economy in Indian municipal solid waste management system: an ISM and fuzzy MICMAC approach. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 36(2), 406-424.
58. Porvaziri, Z., Hashemzadeh Khorasgani, G., Modiri, M., & Farsijani, H. (2022). Designing a sustainable production model in the automotive industry under sanctions and with a world-class approach. *Journal of Management Development and Transformation*, 14(48), 87-103. [In Persian]
59. Prasad, S., Rao, A. N., & Lanka, K. (2022). Analysing the barriers for implementation of lean-led sustainable manufacturing and potential of blockchain technology to overcome these barriers: a conceptual framework. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 7(6), 791.
60. Priarone, P. C., & Magnanini, M. C. (2026). An approach for integrating performance evaluation and environmental sustainability assessment for hybrid additive-subtractive manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 64, 65-78.
61. Reig-Mullor, J., & Salas-Molina, F. (2022). Non-linear neutrosophic numbers and its application to multiple criteria performance assessment. *International Journal of Fuzzy Systems*, 24(6), 2889-2904.
62. Sadeghi, K., Ojha, D., Kaur, P., Mahto, R. V., & Dhir, A. (2025). Metaverse technology in sustainable supply chain management: Experimental findings. *Decision Support Systems*, 191, 114423.
63. Saeidi, M., Ebrahimpour Azbari, M., & Ramezani, M. R. (2023). Performance improvement model for sustainable small and medium enterprises in the food industry of Guilan province. *Industrial Management Studies*, 21(71), 43-78. [In Persian]
64. Sari, M. S., & Muhammad, F. (2018). Flare gas recovery as one of the clean development mechanism (CDM) practices. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 200, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
65. Sartal, A., Bellas, R., Mejías, A. M., & García-Collado, A. (2020). The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(5), 1687814020925232.
66. Setyadi, A., Soekotjo, S., Lestari, S. D., Pawirosumarto, S., & Damaris, A. (2025). Trends and opportunities in sustainable manufacturing: a systematic review of key dimensions from 2019 to 2024. *Sustainability*, 17(2), 789.
67. Shabur, M. A., Shahriar, A., & Ara, M. A. (2025). From automation to collaboration: exploring the impact of industry 5.0 on sustainable manufacturing. *Discover sustainability*, 6(1), 341.
68. Shahbandarzadeh, H., & Karami, H. (2021). Evaluating factors affecting sustainable production using the DEMATEL technique. *7th International Conference on Management, Accounting and Economic Development*, Tehran, Iran. [In Persian]
69. Sharan, S. M. I., Taimun, M. T. Y., Azad, M. A., & Joarder, M. M. I. (2025). Sustainable manufacturing and energy-efficient production systems. *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 10(4), 179-188.
70. Siriphatcharachot, P., Sukkamart, A., Thongkaw, A., Pimdee, P., & Moto, S. (2025). High school student creativity, innovation, and teamwork skills from teacher's perspective: A second-order confirmatory factor analysis. *International Journal of Instruction*, 18(1), 39-60.
71. Sim, M. J. C., Talon, M. S., Tandag, J. N., Duites, A. D., Garcia, J. M. S., Tirol, G. S., & Himang, M. (2026, May). ISM-MICMAC analysis of brittle systems components in sustainable higher education. In *Frontiers in Education* (Vol. 11, p. 1819680). Frontiers Media SA.
72. Smarandache, F. (1998). Neutrosophy: neutrosophic probability, set, and logic: analytic synthesis & synthetic analysis.

73. Theng, M. L., Tan, L. S., Liew, P. Y., Tan, J., & Nasef, M. M. (2026). Applying life cycle assessment for sustainable manufacturing and net zero carbon goal. *Climate Change Impacts on the Water-Energy-Food Nexus*, 397-406.
74. Vijay Kumar, V., & Shahin, K. (2025). Artificial intelligence and machine learning for sustainable manufacturing: current trends and future prospects. *Intelligent and Sustainable Manufacturing*, 2(1), 10002.
75. Virmani, N., Bera, S., & Kumar, R. (2021). Identification and testing of barriers to sustainable manufacturing in the automobile industry: a focus on Indian MSMEs. *Benchmarking: An International Journal*, 28(3), 857-880.
76. Wang, H., Smarandache, F., Zhang, Y., & Sunderraman, R. (2010). Single valued neutrosophic sets. *Infinite study*.
77. Warfield, J. N. (1976). *Societal systems: Planning, policy, and complexity*. New York: Wiley.
78. Whittaker, T. A., & Schumacker, R. E. (2022). *A beginner's guide to structural equation modeling*. Routledge.
79. Ye, J. (2015). Trapezoidal neutrosophic set and its application to multiple attribute decision-making. *Neural Computing and Applications*, 26(5), 1157-1166.
80. Yip, W. S., Zhou, H., & To, S. (2023). A critical analysis on the triple bottom line of sustainable manufacturing: key findings and implications. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(14), 41388-41404.
81. Zientek, L. R. (2008). Exploratory and confirmatory factor analysis: understanding concepts and applications.