

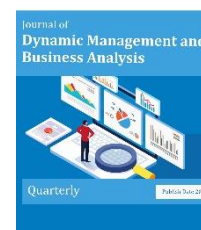


Journal Website

Article history:
Received 25 June 2025
Revised 09 November 2025
Accepted 16 November 2025
Initial Published 17 November 2025
Final Publication 18 December 2025

Dynamic Management and Business Analysis

Volume 4, Issue 3, pp 254-277



E-ISSN: 3041-8933

Strategic Evaluation of Green Technological Innovations in the Steel Industry Using the SWOT and Delphi Approach (Case Study: Khuzestan Steel Company)

Mehran. Ghazanfari¹, Heirsh. Soltanpanah^{1*}, Adel. Fatemi², Roya. Shakeri¹

¹ Department of Management, Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

² Department of Statistics, Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

* Corresponding author email address: heresh@iausdj.ac.ir

Article Info

Article type:

Original Research

How to cite this article:

Ghazanfari, M., Soltanpanah, H., Fatemi, A., & Shakeri, R. (2025). Strategic Evaluation of Green Technological Innovations in the Steel Industry Using the SWOT and Delphi Approach (Case Study: Khuzestan Steel Company). *Dynamic Management and Business Analysis*, 4(3), 254-277.

<https://doi.org/10.61838/dmbaj.261>



© 2025 the author(s). Published by Knowledge Management Scientific Association. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) License.

ABSTRACT

Objective: The study aimed to identify and strategically evaluate key factors influencing green technological innovations in the steel industry and to propose actionable strategies for environmental sustainability, focusing on Khuzestan Steel Company.

Methodology: This qualitative, applied, and inductive research involved 15 PhD-level managers and consultants selected through purposive and snowball sampling. Data were collected via questionnaires, focus group sessions, and document analysis. A three-round Delphi process was employed to identify 14 strengths, 12 weaknesses, 13 opportunities, and 12 threats, with instrument reliability confirmed by Cronbach's alpha (0.747 and 0.822). Based on the SWOT matrix, four strategic categories (SO, ST, WO, WT) were formulated, and the DEMATEL method was applied to prioritize key implementation factors.

Findings: Results indicated that environmental management programs ($R+J=33.45$) and supportive green innovation regulations ($R+J=32.48$) had the highest influence. Access to international financial resources ($R+J=31.87$), managerial coordination ($R+J=33.65$), and waste management infrastructure ($R+J=33.31$) were also critical, while R&D investment ranked lower due to lesser impact.

Conclusion: The findings highlight that focusing on environmental management, policy support, and international financing can significantly enhance green innovation and environmental performance in steel companies. The integrated SWOT–Delphi–DEMATEL framework provides a systematic model for strategic decision-making in sustainable technology development.

Keywords: Green technological innovation, Strategic evaluation, Steel industry, SWOT, Delphi, DEMATEL

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The steel industry, as one of the cornerstones of global industrialization, is simultaneously a major contributor to environmental degradation and carbon emissions. It is estimated that between 7–9% of global greenhouse gas emissions originate from steel production, primarily due to the dependence on fossil fuels and high-energy processes (Shen et al., 2025). The transition to low-carbon or “green” steel production has therefore become a critical global priority to meet the objectives of the Paris Agreement, which aims to limit global temperature rise to below 2°C. Achieving this transformation requires the integration of green technological innovations that can enhance energy efficiency, reduce environmental footprints, and promote industrial competitiveness (Mallett & Pal, 2022).

Recent global environmental policies—such as carbon trading, green financing, and emission reduction incentives—have significantly shaped the trajectory of industrial development. Carbon trading systems, in particular, have demonstrated a strong potential in motivating corporations to invest in cleaner technologies and reduce their dependence on fossil-based production (Xi & Jia, 2025; Zou et al., 2025). Empirical evidence shows that such mechanisms not only lower carbon intensity but also stimulate firms to reorient their innovation capabilities toward sustainable technologies (Zhao et al., 2022). Simultaneously, green innovation has emerged as an intersectional force linking environmental stewardship, economic growth, and social responsibility (Gao et al., 2025).

Corporate sustainability frameworks such as Environmental, Social, and Governance (ESG) reporting have further strengthened the alignment between profitability and green responsibility (Gao et al., 2025). Firms with strong ESG performance tend to experience reduced financing costs, enhanced stakeholder trust, and greater innovation productivity (Y. Li et al., 2024). However, green innovation remains a complex process influenced by multiple interrelated dimensions—including regulatory support, financial access, technological readiness, and managerial commitment (Ren et al., 2023).

Regulatory mechanisms play a pivotal role in enabling or hindering technological progress. Studies reveal that both formal and informal environmental regulations can foster green technological innovation, although their effectiveness depends heavily on regional and institutional contexts (Ren et al., 2023; Wang et al., 2023). For example, stringent regulatory enforcement has proven beneficial for heavy industries such as steel, driving innovation and compliance through economic incentives rather than punitive measures (Cheng & Yu, 2023). On the other hand, weak or inconsistent regulatory environments, such as those observed in developing economies, often lead to stagnation in green innovation progress (Fathi et al., 2022).

From a financial perspective, the availability of green credit and international financial resources is essential to overcoming the high initial investment barriers associated with green technologies (Xu & Lin, 2025). Studies show that targeted green financing mechanisms significantly enhance innovation by reducing capital constraints and improving firms’ capacity for long-term R&D investment (Xi & Jia, 2025). Moreover, access to international financial mechanisms and partnerships can bridge the resource gap between developing and developed economies, enabling knowledge transfer and cross-border technological collaboration (Nurdiawati et al., 2025).

In the context of the steel industry, green innovation focuses on breakthroughs such as hydrogen-based direct reduction, waste recycling, renewable energy integration, and efficient water management

systems (Li et al., 2025). In the Middle East, abundant access to natural gas, solar energy, and iron ore presents unique opportunities for the development of low-carbon steel production (Nurdiawati et al., 2025). However, despite such potential, countries like Iran continue to face structural challenges—namely weak policy frameworks, insufficient coordination among stakeholders, and limited participation in international environmental initiatives (Safdari Ranjbar & Nikzad, 2024).

In Iran, the Khuzestan Steel Company serves as one of the leading producers with significant environmental and economic impact. Nonetheless, its transition toward green technological innovation has been impeded by limited access to green financing, lack of managerial coordination, and absence of comprehensive strategic frameworks (Chamran et al., 2023). Addressing these challenges necessitates a systematic strategic evaluation integrating environmental, organizational, and technological dimensions. The combination of SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats) analysis with the Delphi and DEMATEL methods provides an effective framework for identifying strategic priorities and formulating action-oriented policies (Katabchi et al., 2023).

Global literature highlights that while environmental policies can at times constrain immediate profitability, in the long run, they catalyze efficiency and resilience through technological upgrading (Wang & Yang, 2025). Moreover, the “green innovation paradox,” which posits that carbon reduction policies may initially hinder innovation quality, can be resolved through well-designed incentive structures (H. Li et al., 2024). Furthermore, regional studies have demonstrated significant disparities in green innovation efficiency due to differences in education, government support, and industrial infrastructure (Zhang et al., 2022).

Against this backdrop, the present study aims to provide a strategic evaluation of green technological innovations in the steel industry using an integrated Delphi–SWOT–DEMATEL framework, focusing on Khuzestan Steel Company as a representative case of Iran’s steel sector.

Methods and Materials

This study employed a qualitative and applied research design with an inductive reasoning approach. The data collection process was conducted through expert interviews, structured questionnaires, and focused group discussions. The statistical population comprised 15 senior managers and consultants from Khuzestan Steel Company, all possessing doctoral-level expertise in industrial management or environmental engineering.

The Delphi technique was applied in three iterative rounds to identify and validate key internal and external factors influencing green technological innovation. The final consensus included 14 strengths, 12 weaknesses, 13 opportunities, and 12 threats. Reliability of the Delphi rounds was confirmed by Cronbach’s alpha coefficients of 0.747 and 0.822 in the second and third rounds, respectively. The SWOT matrix was then used to formulate four categories of strategies—SO (Strength–Opportunity), ST (Strength–Threat), WO (Weakness–Opportunity), and WT (Weakness–Threat).

Finally, the DEMATEL method was employed to determine the causal relationships among the identified strategic factors and to prioritize them based on their influence (R+J) and dependence (R–J) indices. Data from the DEMATEL survey were obtained from five senior executives of the company, who evaluated the interrelationships between strategic components.

Findings

The Delphi analysis resulted in a validated set of key factors influencing green technological innovation in the steel industry. Strengths included well-established waste management infrastructure, regular implementation of environmental management programs, and stable raw material sourcing. Weaknesses encompassed insufficient legal support for green innovation, lack of financial resources, and managerial inconsistency. The most significant opportunities identified were the expansion of green product export markets, governmental support for emission reduction, and access to international financial resources. Conversely, the most pressing threats included high implementation costs, incomplete hazardous waste management, and supply chain vulnerabilities under climate change conditions.

The SWOT matrix led to the formulation of four major strategic types:

1. **SO strategies:** Utilizing existing waste management infrastructure to develop new green technologies and leveraging environmental programs to expand international export markets.
2. **ST strategies:** Using stable raw material supply chains to offset climate-related risks and high operational costs.
3. **WO strategies:** Developing supportive environmental regulations and leveraging international funding mechanisms to address internal weaknesses.
4. **WT strategies:** Enhancing managerial coordination and investing in R&D to mitigate resource and policy-related threats.

Based on the DEMATEL analysis, the factors with the highest influence (R+J) included environmental management programs (33.45), green innovation regulatory frameworks (32.48), and international financial access (31.87). These were followed by managerial coordination (33.65) and waste management infrastructure (33.31), identified as highly dependent but essential components. Factors such as stable raw material supply (32.90) and R&D investment (29.40) exhibited relatively lower influence but remained strategically relevant for long-term planning.

Overall, the results indicated that a strategic focus on environmental management and supportive legislation would create a multiplier effect, accelerating other interdependent components within the innovation ecosystem.

Discussion and Conclusion

The findings of this study reinforce the notion that sustainable transformation in the steel industry requires not only technological advancement but also a systemic integration of regulatory, managerial, and financial enablers. The identification of environmental management programs as the most influential factor aligns with global evidence that consistent environmental monitoring and reporting enhance both operational efficiency and corporate credibility. In the case of Khuzestan Steel Company, institutionalizing environmental governance can serve as a foundation for embedding sustainability into daily operations.

The prominence of supportive regulations and policy design highlights the critical role of government in shaping industrial innovation. Effective environmental policies should balance compliance enforcement with economic incentives to prevent innovation stagnation. When properly designed, such policies can trigger positive feedback loops between environmental performance and technological upgrading, creating a virtuous cycle of sustainability-driven competitiveness.

Access to international financial resources emerged as another cornerstone of successful innovation. Green technologies often demand substantial upfront investment, and without adequate

funding, industries risk lagging behind in adopting sustainable solutions. Strengthening partnerships with global financial institutions, development banks, and environmental funds can thus bridge the financial gap and facilitate the adoption of clean technologies.

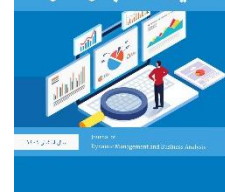
Managerial coordination and organizational learning were found to be highly interdependent yet crucial for ensuring the internal coherence of innovation strategies. Without synchronized planning and communication across departments, even the most well-designed technological initiatives can fail during implementation. This underlines the importance of cultivating a green organizational culture that values interdisciplinary collaboration, continuous training, and adaptive leadership.

The results also reveal that while R&D investments have relatively lower immediate influence, they remain vital for long-term resilience. Incremental research activities—especially those focused on hydrogen-based reduction, waste reuse, and low-carbon energy optimization—can yield transformative benefits over time. Integrating academia–industry partnerships could further enhance the efficiency of innovation diffusion within the sector.

From a broader perspective, the study suggests that the pathway toward green steel in Iran and similar developing economies hinges on three pillars: policy consistency, financial accessibility, and institutional alignment. These elements must operate cohesively within an ecosystem that encourages experimentation, collaboration, and transparency. As regional assessments have shown, countries with abundant renewable resources, such as Iran, possess a strategic advantage for developing carbon-neutral steel industries. Yet, without effective governance structures and international engagement, such potential may remain underutilized.

In conclusion, the integrated Delphi–SWOT–DEMATEL approach adopted in this study demonstrates its utility as a comprehensive framework for strategic evaluation of green technological innovation. It allows for a holistic understanding of the complex interdependencies among environmental, financial, and managerial factors influencing sustainability transitions. The findings emphasize that the success of green innovation in the steel industry is contingent upon multi-level collaboration—among government, industry, and academia—supported by coherent policies, sustainable financing, and institutional commitment.

Ultimately, fostering a culture of green innovation within the steel sector not only contributes to reducing carbon emissions but also enhances industrial resilience, global competitiveness, and alignment with international sustainability agendas. The lessons drawn from Khuzestan Steel Company can thus inform broader strategies for transitioning toward a low-carbon industrial future in the Middle East and beyond.



ارزیابی استراتژیک نوآوری‌های فناورانه سبز در صنعت فولاد با رویکرد SWOT و روش دلفی (مورد مطالعه: شرکت فولاد خوزستان)

مهران غضنفری^۱، هیرش سلطان پناه^{۱*}، عادل فاطمی^۲، رویا شاکری^۱

۱. گروه مدیریت، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

۲. گروه آمار، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: heresh@iausdj.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله

پژوهشی اصلی

نحوه استناد به این مقاله:

غضنفری، مهران، سلطان پناه، هیرش، فاطمی، عادل، و شاکری، رویا. (۱۴۰۴). ارزیابی استراتژیک نوآوری‌های فناورانه سبز در صنعت فولاد با رویکرد SWOT و روش دلفی (مورد مطالعه: شرکت فولاد خوزستان). مدیریت پویا و تحلیل کسب و کار، ۴(۳)، ۲۷۷-۲۵۴.



© ۱۴۰۴ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده(گان) است. انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY 4.0) صورت گرفته است.

هدف: هدف پژوهش، شناسایی و ارزیابی استراتژیک عوامل مؤثر بر نوآوری‌های فناورانه سبز در صنعت فولاد و ارائه راهبردهای عملی برای پایداری زیست‌محیطی با تمرکز بر شرکت فولاد خوزستان بود. **روش‌شناسی:** پژوهش از نوع کیفی با جهت‌گیری کاربردی و رویکرد استقرایی بود. جامعه آماری شامل ۱۵ نفر از مدیران و مشاوران شرکت فولاد خوزستان با مدرک دکتری بود که با روش نمونه‌گیری هدفمند و گلوله‌برفی انتخاب شدند. داده‌ها از طریق پرسشنامه‌ها، جلسات گروهی و بررسی اسناد گردآوری شد. روش دلفی در سه مرحله برای شناسایی ۱۴ قوت، ۱۲ ضعف، ۱۳ فرصت و ۱۲ تهدید به کار رفت و پایایی ابزار با آلفای کرونباخ (۰.۷۴۷ و ۰.۸۲۲) تأیید گردید. سپس با استفاده از ماتریس SWOT، چهار دسته استراتژی (WT، WO، ST، SO) تدوین شد و از روش دیمتل برای اولویت‌بندی عوامل اجرایی استفاده شد. **یافته‌ها:** نتایج نشان داد اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی ($R+J=33.45$) و تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز ($R+J=32.48$) به دلیل تأثیرگذاری بالا در اولویت نخست قرار دارند. همچنین دسترسی به منابع مالی بین‌المللی ($R+J=31.87$)، هماهنگی مدیریتی ($R+J=33.65$) و زیرساخت‌های مدیریت پسماند ($R+J=33.31$) از عوامل کلیدی شناسایی شدند. در مقابل، افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه به دلیل تأثیرپذیری بالا در رتبه پایین‌تر قرار گرفت. **نتیجه‌گیری:** نتایج پژوهش نشان می‌دهد تمرکز بر اجرای برنامه‌های زیست‌محیطی، تدوین قوانین حمایتی، و بهره‌گیری از منابع مالی بین‌المللی می‌تواند به ارتقای نوآوری‌های سبز و بهبود عملکرد زیست‌محیطی شرکت‌های فولادی منجر شود. مدل ترکیبی SWOT-دلفی-دیمتل چارچوبی نظام‌مند برای تصمیم‌گیری استراتژیک در توسعه فناوری‌های سبز ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: نوآوری فناورانه سبز، ارزیابی استراتژیک، صنعت فولاد، SWOT دلفی، دیمتل

مقدمه

صنعت فولاد به‌عنوان یکی از ارکان اصلی رشد اقتصادی و صنعتی در جهان، نقشی تعیین‌کننده در تولید ناخالص داخلی بسیاری از کشورها ایفا می‌کند؛ بااین‌حال، این صنعت یکی از بزرگ‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز محسوب می‌شود و حدود ۷ تا ۹ درصد از کل انتشار جهانی دی‌اکسیدکربن را به خود اختصاص داده است (Shen et al., 2025). با توجه به اهداف جهانی در چارچوب توافق پاریس برای محدودسازی افزایش دمای زمین به کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد، گذار به سمت تولید فولاد کم‌کربن به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. این گذار مستلزم توسعه نوآوری‌های فناورانه سبز است که بتوانند هم‌زمان به بهبود کارایی انرژی، کاهش مصرف منابع طبیعی و افزایش رقابت‌پذیری اقتصادی بینجامند (Mallett & Pal, 2022).

در دهه اخیر، سیاست‌های جهانی متعددی در جهت کاهش ردپای کربنی صنایع فولادی تدوین شده‌اند. از جمله، سیاست‌های مبتنی بر معامله انتشار کربن، مالیات‌های سبز، و حمایت از فناوری‌های کاهنده انتشار گازهای گلخانه‌ای توانسته‌اند جهت حرکت صنعت فولاد را به سمت توسعه فناوری‌های نوآورانه تغییر دهند (Xi & Jia, 2025; Zou et al., 2025). بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که تجارت کربن به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی تنظیم‌گر بازار زیست‌محیطی، در بسیاری از کشورها موجب ارتقای نوآوری فناوری سبز در شرکت‌های صنعتی شده است (Zhao et al., 2022). به طور خاص، اجرای سیاست‌های مبادله کربن در چین و اتحادیه اروپا سبب افزایش انگیزه شرکت‌ها برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز و کاهش هزینه‌های انتشار شده است (Xi & Jia, 2025).

نوآوری فناورانه سبز به‌منزله ترکیب دانش، فناوری و مدیریت در راستای حل چالش‌های زیست‌محیطی تعریف می‌شود و در عین حال ابزاری حیاتی برای دستیابی به توسعه پایدار محسوب می‌گردد (Gao et al., 2025). شرکت‌های صنعتی با تمرکز بر مسئولیت اجتماعی و عملکرد زیست‌محیطی (ESG)، می‌توانند ضمن ارتقای اعتبار خود در بازار جهانی، هزینه‌های تأمین مالی را نیز کاهش دهند و از طریق بهبود بهره‌وری منابع، به مزیت رقابتی پایدار دست یابند (Gao et al., 2025). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که عملکرد ESG نه تنها موجب تحریک نوآوری فناوری سبز می‌شود، بلکه به شکل‌گیری «اثر ریزش دانش» میان صنایع مختلف نیز کمک می‌کند که این امر در تسریع توسعه فناوری‌های پاک نقش دارد (Y. Li et al., 2024).

در سطح سیاست‌گذاری، تأثیر مقررات زیست‌محیطی بر نوآوری فناوری سبز یکی از محورهای اصلی تحقیقاتی محسوب می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که مقررات رسمی و غیررسمی زیست‌محیطی هر دو می‌توانند محرک نوآوری باشند، اما تأثیر آن‌ها در مناطق و صنایع مختلف ناهمگون است (Ren et al., 2023). به عنوان مثال، در چین مقررات سخت‌گیرانه در صنایع سنگین مانند فولاد، نوآوری فناورانه سبز را به‌طور معناداری افزایش داده است، در حالی که در صنایع سبک‌تر این اثر کمتر مشاهده می‌شود (Wang et al., 2023). همچنین بازرسی‌های مرکزی حفاظت از محیط زیست نیز به‌عنوان عاملی تحریک‌کننده در ایجاد انگیزه برای نوآوری‌های سبز شرکتی شناخته شده‌اند (Cheng & Yu, 2023).

تحلیل اقتصادی نوآوری‌های سبز نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک نیازمند نظام‌های مالی و اعتباری حمایت‌کننده است. دسترسی به «اعتبار سبز» و منابع مالی بین‌المللی می‌تواند نقشی کلیدی در تسریع نوآوری‌ها ایفا کند (Xu & Lin, 2025). از سوی دیگر، پژوهش‌های مرتبط با بازارهای مالی سبز نشان داده‌اند که سیاست‌های اعتباری هدفمند نه تنها سرمایه‌گذاری شرکت‌ها در فناوری‌های سبز را افزایش می‌دهد، بلکه از طریق کاهش عدم قطعیت مالی، به پایداری تصمیم‌گیری‌های استراتژیک نیز کمک می‌کند (Xi & Jia, 2025).

در زمینه صنعت فولاد، نوآوری‌های فناورانه سبز به‌ویژه در حوزه فناوری‌های مبتنی بر کاهش مستقیم آهن با استفاده از هیدروژن، بازیافت پسماندها و بهینه‌سازی مصرف انرژی اهمیت ویژه‌ای یافته‌اند (Shen et al., 2025). تحقیقات جدید نشان داده‌اند که استفاده از فناوری‌های مبتنی بر هیدروژن و برق تجدیدپذیر در فرآیند تولید فولاد، می‌تواند به‌طور قابل توجهی میزان انتشار دی‌اکسیدکربن را کاهش دهد و مسیر دستیابی به فولاد سبز را هموار سازد (Li et al., 2025). همچنین ارزیابی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی در خاورمیانه نشان می‌دهد که این منطقه با برخورداری از انرژی خورشیدی ارزان و منابع گاز طبیعی، ظرفیت قابل توجهی برای توسعه فولاد سبز دارد (Nurdiawati et al., 2025).

در ایران، مطالعات اخیر بیانگر آن است که نظام نوآوری فناورانه فولاد سبز با چالش‌های متعددی از جمله ضعف سیاست‌گذاری، کمبود تعاملات بین‌المللی و ناهماهنگی میان بازیگران کلیدی مواجه است (Safdari Ranjbar & Nikzad, 2024). به‌رغم وجود زیرساخت‌های صنعتی مناسب و دسترسی به منابع طبیعی گسترده، فقدان یک چارچوب استراتژیک جامع برای ارزیابی و توسعه نوآوری‌های سبز، مانع از دستیابی صنعت فولاد ایران به استانداردهای جهانی پایداری شده است. این مسئله به‌ویژه در شرکت‌های بزرگ فولادی همچون فولاد خوزستان، که از جایگاه استراتژیک در بازار داخلی و صادراتی برخوردارند، اهمیت بیشتری دارد (Chamran et al., 2023).

از منظر نظری، بسیاری از پژوهش‌ها بر پیچیدگی روابط میان کاهش انتشار کربن و نوآوری فناورانه تأکید دارند. به‌عنوان مثال، پارادوکس نوآوری سبز نشان می‌دهد که در برخی موارد، سیاست‌های کاهش انتشار ممکن است کیفیت نوآوری‌ها را کاهش دهد؛ زیرا شرکت‌ها تمرکز خود را از پژوهش‌های بنیادی به سمت نوآوری‌های زودبازده معطوف می‌کنند (H. Li et al., 2024). بااین‌حال، پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که با طراحی صحیح سیاست‌های انگیزشی، می‌توان اثرات منفی را کاهش داده و سرمایه‌گذاری در نوآوری‌های بلندمدت را تقویت کرد (Wang & Yang, 2025).

در سطح کلان، تحلیل‌های منطقه‌ای تفاوت‌های معناداری در کارایی نوآوری سبز بین مناطق مختلف جهان نشان داده‌اند. پژوهش‌ها بر مبنای شاخص جینی داگوم نشان می‌دهند که تفاوت‌های نهادی، سطح آموزش و حمایت‌های دولتی از عوامل اصلی تعیین‌کننده کارایی نوآوری فناور سبز هستند (Zhang et al., 2022). در مقابل، برخی مطالعات بر این باورند که مقررات بیش‌ازحد می‌توانند مانع خلاقیت فناورانه شوند و به جای آن باید از مشوق‌های بازاری و سیاست‌های مشارکتی استفاده شود (Li et al., 2022).

در این میان، کاربرد مدل‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره، مانند دلفی فازی، در شناسایی و اولویت‌بندی محرک‌های نوآوری سبز نقش مهمی داشته است. برای مثال، پژوهش چمران، جهانی و حاتمی نشان داد که تخصیص بودجه و منابع انسانی متخصص از جمله مهم‌ترین عوامل در ارتقای نوآوری‌های سبز در صنعت فولاد ایران هستند (Chamran et al., 2023). همچنین در مطالعه‌ای مشابه، مدل ارتقای ظرفیت جذب نوآوری‌های فناورانه سبز در صنعت پتروشیمی ایران طراحی و تأکید شد که ترکیب بینش مدیریتی و یادگیری سازمانی از الزامات موفقیت در پیاده‌سازی فناوری‌های سبز است (Ketabchi et al., 2023).

در سطح جهانی نیز بررسی ساختارهای نوآوری نشان می‌دهد که گذار به سمت فولاد سبز مستلزم همکاری‌های بین‌المللی، اصلاح نظام‌های سیاست‌گذاری و تقویت انگیزه‌های مالی است (Mallett & Pal, 2022). برای مثال، تحلیل مسیرهای فناوری خنثای کربن در صنعت فولاد چین نشان داد که سیاست‌های انگیزشی مانند یارانه‌های تحقیق و توسعه و قیمت‌گذاری کربن می‌توانند فرآیند کربن‌زدایی را تسریع کنند (Y. Li et al., 2024). این یافته‌ها با پژوهش‌های مشابه درباره صنایع فولاد آسیایی همسو است که تأکید می‌کنند توسعه تجارت آهن اسفنجی بریکت‌شده سبز (HBI) می‌تواند راهکار مؤثری برای کاهش انتشار و افزایش پایداری منطقه‌ای باشد (Li et al., 2025).

در عین حال، بررسی‌های تجربی در سطح شرکتی نشان می‌دهد که سیاست‌های سبز در صورت عدم همراهی با اصلاحات نهادی ممکن است به نتایج مطلوب منجر نشوند. برای مثال، پژوهش چن و همکاران نشان داد که رابطه بین نوآوری فناورانه سبز و شدت انتشار کربن در چین به شکل منحنی U معکوس است؛ به طوری که در مراحل اولیه، نوآوری موجب افزایش انتشار می‌شود و تنها پس از بلوغ فناورانه، اثر کاهنده خود را نشان می‌دهد (Chen et al., 2023). همچنین، پژوهش‌های مبتنی بر داده‌های شهری نشان داده‌اند که سیاست‌های تجارت انتشار کربن، هم کمیت و هم کیفیت نوآوری‌های فناورانه سبز شهری را بهبود می‌بخشند (Zou et al., 2025).

از دیدگاه اقتصادی، اجرای پروژه‌های سبز در صنعت فولاد اغلب با هزینه‌های سنگین اولیه همراه است و بدون حمایت‌های مالی، این پروژه‌ها ممکن است از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نباشند. از این رو، مدل‌های مالی پایدار و سیاست‌های اعتباری سبز باید در کنار نوآوری‌های فناورانه مورد توجه قرار گیرند (Xu & Lin, 2025). در این راستا، شرکت‌های فولادی پیشرو با ایجاد واحدهای تحقیق و توسعه سبز و بهره‌گیری از همکاری با نهادهای بین‌المللی، تلاش دارند تا ضمن کاهش هزینه‌ها، مسیر دستیابی به تولید فولاد کم‌کربن را تسهیل کنند (Shen et al., 2025).

با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی همچون نبود هماهنگی مدیریتی، کمبود منابع مالی، و ضعف در قوانین حمایتی از نوآوری سبز در بسیاری از صنایع سنگین کشورها همچنان پابرجاست. این موانع نه تنها روند توسعه فناوری‌های سبز را کند می‌کنند، بلکه موجب افزایش هزینه‌های تولید و کاهش رقابت‌پذیری جهانی شرکت‌ها نیز می‌شوند (Fathi et al., 2022).

بنابراین، ارزیابی استراتژیک نوآوری‌های فناورانه سبز در صنعت فولاد، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، ضرورتی علمی و عملی دارد. این ارزیابی می‌تواند با شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها، مسیر تصمیم‌گیری را برای سیاست‌گذاران و مدیران صنعتی روشن سازد و به طراحی استراتژی‌های کارآمد برای گذار به اقتصاد سبز کمک کند. هدف این مطالعه، ارزیابی استراتژیک نوآوری‌های فناورانه سبز در صنعت فولاد با استفاده از رویکرد تلفیقی دلفی و SWOT در شرکت فولاد خوزستان است.

روش پژوهش

در این پژوهش، جهت‌گیری کاربردی، رویکرد استقرایی، روش‌شناسی کیفی، روش گردآوری داده‌ها میدانی، راهبردها شامل استفاده از دلفی و ماتریس SWOT، و اهداف اکتشافی و پیمایشی بوده است؛ ابزارهای گردآوری داده‌ها در بخش دلفی شامل پرسشنامه‌ها و جلسات گروهی و در بخش ماتریس SWOT شامل پرسشنامه دیمتل برای بررسی اولویت‌های اجرایی می‌باشد. جامعه آماری شامل مدیران، معاونان و مشاوران شرکت فولاد خوزستان با حداقل مدرک دکتری به تعداد ۱۵ نفر است که ابتدا در قالب پنل دلفی گرد هم آمدند و سپس به پرسشنامه SWOT پاسخ دادند، و روش نمونه‌گیری هدفمند و بر اساس روش گلوله برفی بوده است. فرآیند پژوهش ابتدا با روش دلفی در سه گام آغاز شد که شامل استفاده از درصد توافق برای حذف متغیرهایی با توافق زیر ۵۱ درصد، پرسشنامه بازپاسخ در گام اول برای شناسایی نقاط قوت، ضعف‌ها، فرصت‌ها و تهدیدات و تشکیل پرسشنامه، و پرسشنامه طیف لیکرت در گام‌های دوم و سوم همراه با نرم‌افزار SPSS برای ارزیابی پایایی بود؛ سپس از ماتریس SWOT استفاده گردید و برای اولویت‌بندی و سطح‌بندی اولویت‌های اجرایی از روش دیمتل بهره گرفته شد. اعتبار پژوهش از طریق روش‌های کلیدی تضمین شد، از جمله اعتبار محتوا با بررسی کامل ادبیات موجود و ورودی کارشناسان برای پوشش جامع موضوع در دوره‌های مختلف نظرسنجی دلفی، اعتبار وابسته به معیار با مقایسه نتایج دلفی با معیارهای تثبیت‌شده یا اجماع متخصصان مستقل، صحت منابع داده‌ها برای SWOT با مقایسه اطلاعات از چند منبع معتبر به منظور کمترین انحراف و پوشش کامل عوامل مرتبط، و فرآیند بررسی هم‌تا با مشارکت همکاران آشنا به موضوع برای ارزیابی انتقادی تحلیل SWOT، انطباق و کامل بودن که بازخوردهای آن‌ها به

بهبود نتیجه‌گیری‌ها کمک کرد و اطمینان داد که تمام جنبه‌های کلیدی به طور مناسب آدرس داده شده‌اند. پایایی ابزار اندازه‌گیری در گام‌های دوم و سوم دلفی با روش آلفای کرونباخ محاسبه شد؛ پرسشنامه‌ها برای بررسی روایی به ۱۵ نفر از پاسخ‌دهندگان جامعه به صورت پیش‌آزمون ارائه شد و نتایج آلفای کرونباخ برای پرسشنامه دور دوم دلفی برابر با ۰.۷۴۷ و برای دور سوم برابر با ۰.۸۲۲ بود که نشان‌دهنده قابلیت اعتماد و پایایی لازم ابزار است و امکان پخش کلی پرسشنامه میان نمونه را فراهم کرد. پرسشنامه دیمتل نیز توسط ۵ نفر از مدیران ارشد سازمان، پاسخ داده‌شد.

یافته‌ها

گام ۱: تحلیل دلفی

برای ارزیابی استراتژیک نوآوری‌های فناورانه سبز در صنعت فولاد با رویکرد SWOT و روش دلفی با مطالعه موردی شرکت فولاد خوزستان، یک فرآیند چهار مرحله‌ای با استفاده از روش دلفی و تحلیل دیمتل انجام شد. روش دلفی در این پژوهش برای شناسایی و ارزیابی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای نوآوری‌های فناورانه سبز در صنعت فولاد در سه دور اجرا شد. در دور اول (۱۷ تا ۲۲ آذر ۱۴۰۳)، از طریق پرسشنامه باز و نظرات ۱۵ خبره (مدیران، معاونان و مشاوران با مدرک کارشناسی ارشد یا دکتری)، ۱۵ نقطه در هر دسته SWOT شناسایی و پس از پالایش، توسط سه نفر از خبرگان با مدرک دکتری تأیید شد. در دور دوم (۲۵ تا ۳۰ آذر ۱۴۰۳)، پرسشنامه‌ای با طیف لیکرت برای ارزیابی این نقاط بین همان ۱۵ خبره توزیع شد و مواردی با توافق زیر ۵۱٪ حذف شدند (۹ مورد). در دور سوم (۲ تا ۶ دی ۱۴۰۳)، پرسشنامه اصلاح‌شده با ۱۴ نقطه قوت، ۱۲ تهدید، ۱۳ فرصت و ۱۲ ضعف ارزیابی شد که همه موارد توافق بالای ۵۱٪ کسب کردند. این فرآیند به اجماع دقیق و قابل‌اعتماد در شناسایی عوامل کلیدی SWOT منجر شد.

جدول ۱

نتیجه اظهارنظر خبرگان در دور سوم اجرای روش دلفی

نقاط قوت	نمره به درصد
بهره‌مندی از فناوری‌های نوین در مدیریت انرژی.	۶۸
وجود زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت پسماند.	۸۹
تعهد به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح ملی.	۷۱
بهره‌وری بالای آب در فرآیندهای تولید.	۷۰
تجربه موفق در نوآوری فرآیندهای تولید.	۶۸
طراحی محصولات سبز مطابق با استانداردهای جهانی.	۷۲
تأمین پایدار مواد اولیه از منابع قابل اعتماد.	۸۲
اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی.	۸۹
افزایش آگاهی کارکنان از طریق آموزش و فرهنگ‌سازی.	۷۶
سرمایه‌گذاری مستمر در تحقیق و توسعه.	۷۳
وجود استانداردهای بالا برای ارتقاء سلامت و ایمنی.	۷۷
تعهد به مسئولیت اجتماعی و پاسخگویی به جامعه.	۷۵
وجود نیروهای متخصص در مدیریت نوآوری فناورانه سبز.	۷۲
ارتباط با جوامع علمی در برخی حوزه‌های تحقیقاتی.	۶۸
تهدیدها	نمره به درصد
هزینه بالای اجرای پروژه‌های سبز.	۸۴



۷۹	نبود هماهنگی کافی میان بخش‌های مختلف مدیریتی.
۷۸	ضعف در فرهنگ‌سازی پایدار در سطح کارکنان.
۷۹	تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی بر زنجیره تأمین.
۸۱	محدودیت در دستیابی به منابع مالی برای نوآوری.
۷۹	چالش‌های مرتبط با تأمین مواد اولیه پایدار.
۷۵	کمبود نیروی انسانی متخصص در حوزه‌های سبز.
۸۳	عدم مدیریت کامل بر پسماندهای خطرناک.
۷۴	نبود انگیزه کافی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای.
۷۵	عدم وجود سیاست‌های یکپارچه برای بهره‌وری آب.
۷۹	عدم تدوین راهبردهای بلندمدت زیست‌محیطی.
۷۶	نبود سرمایه‌گذاری کافی در آموزش و تحقیق.
نمره به درصد	فرصت‌ها
۷۴	افزایش تقاضای بازار برای محصولات سبز.
۷۴	حمایت‌های دولتی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای.
۹۰	توسعه فناوری‌های نوین مدیریت پسماند.
۷۴	ایجاد فرصت‌های شغلی جدید در حوزه‌های سبز.
۸۸	گسترش بازارهای صادراتی محصولات سبز.
۷۸	همکاری‌های بین‌المللی در حوزه مدیریت انرژی.
۸۱	استقبال صنعت از استانداردهای بهره‌وری آب.
۷۰	گسترش آموزش‌های تخصصی در حوزه نوآوری سبز.
۷۲	افزایش بودجه‌های تحقیق و توسعه سبز.
۷۳	افزایش آگاهی عمومی درباره مسئولیت اجتماعی.
۷۵	دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی.
۷۷	رشد روزافزون تقاضا برای نوآوری‌های فرآیندهای تولید.
۷۳	امکان بهره‌برداری از فناوری‌های پیشرفته بازیافتی.
نمره به درصد	ضعف‌ها
۷۹	تغییرات غیرمنتظره در سیاست‌های زیست‌محیطی.
۷۴	رقابت شدید در بازار جهانی محصولات سبز.
۷۸	افزایش هزینه‌های تأمین مواد اولیه.
۷۶	ریسک‌گریزی سرمایه‌گذاران و شرکت‌های بزرگ.
۷۹	کمبود منابع مالی در شرایط اقتصادی ناپایدار.
۷۳	موانع تعرفه‌ای برای صادرات محصولات سبز.
۶۹	خطرات مربوط به عدم هماهنگی بین‌المللی.
۷۸	کاهش منابع آب در دسترس برای بهره‌وری.
۷۸	افزایش تقاضا برای انرژی‌های تجدیدپذیر.
۷۴	کاهش اعتماد عمومی به تعهدات زیست‌محیطی شرکت‌ها.
۷۹	تأخیر در به‌کارگیری فناوری‌های نوین.
۸۱	نبود قوانین حمایتی کافی برای نوآوری سبز.

جدول ۲

جدول ماتریس SWOT بر اساس نقاط

نقاط قوت	نقاط ضعف
بهره‌مندی از فناوری‌های نوین در مدیریت انرژی	تغییرات غیرمنتظره در سیاست‌های زیست‌محیطی
وجود زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت پسماند	رقابت شدید در بازار جهانی محصولات سبز
تعهد به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح ملی	افزایش هزینه‌های تأمین مواد اولیه
بهره‌وری بالای آب در فرآیندهای تولید	ریسک‌گریزی سرمایه‌گذاران و شرکت‌های بزرگ
تجربه موفق در نوآوری فرآیندهای تولید	کمبود منابع مالی در شرایط اقتصادی ناپایدار
طراحی محصولات سبز مطابق با استانداردهای جهانی	موانع تعرفه‌ای برای صادرات محصولات سبز
تأمین پایدار مواد اولیه از منابع قابل اعتماد	خطرات مربوط به عدم هماهنگی بین‌المللی
اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی	کاهش منابع آب در دسترس برای بهره‌وری
افزایش آگاهی کارکنان از طریق آموزش و فرهنگ‌سازی	افزایش تقاضا برای انرژی‌های تجدیدپذیر
سرمایه‌گذاری مستمر در تحقیق و توسعه	کاهش اعتماد عمومی به تعهدات زیست‌محیطی شرکت‌ها
وجود استانداردهای بالا برای ارتقاء سلامت و ایمنی	تأخیر در به‌کارگیری فناوری‌های نوین
تعهد به مسئولیت اجتماعی و پاسخگویی به جامعه	نبود قوانین حمایتی کافی برای نوآوری سبز
وجود نیروهای متخصص در مدیریت نوآوری فناورانه سبز	
ارتباط با جوامع علمی در برخی حوزه‌های تحقیقاتی	
فرصت‌ها	تهدیدها
افزایش تقاضای بازار برای محصولات سبز	هزینه بالای اجرای پروژه‌های سبز
حمایت‌های دولتی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای	نبود هماهنگی کافی میان بخش‌های مختلف مدیریتی
توسعه فناوری‌های نوین مدیریت پسماند	ضعف در فرهنگ‌سازی پایدار در سطح کارکنان
ایجاد فرصت‌های شغلی جدید در حوزه‌های سبز	تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی بر زنجیره تأمین
گسترش بازارهای صادراتی محصولات سبز	محدودیت در دستیابی به منابع مالی برای نوآوری
همکاری‌های بین‌المللی در حوزه مدیریت انرژی	چالش‌های مرتبط با تأمین مواد اولیه پایدار
استقبال صنعت از استانداردهای بهره‌وری آب	کمبود نیروی انسانی متخصص در حوزه‌های سبز
گسترش آموزش‌های تخصصی در حوزه نوآوری سبز	عدم مدیریت کامل بر پسماندهای خطرناک
افزایش بودجه‌های تحقیق و توسعه سبز	نبود انگیزه کافی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای
افزایش آگاهی عمومی درباره مسئولیت اجتماعی	عدم وجود سیاست‌های یکپارچه برای بهره‌وری آب
دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	عدم تدوین راهبردهای بلندمدت زیست‌محیطی
رشد روزافزون تقاضا برای نوآوری فرآیندهای تولید	نبود سرمایه‌گذاری کافی در آموزش و تحقیق
امکان بهره‌برداری از فناوری‌های پیشرفته بازیافتی	

جدول ۳

جدول ماتریس SWOT بر اساس مهم‌ترین نقاط

نقاط قوت (Strengths)	نقاط ضعف (Weaknesses)
وجود زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت پسماند - ۸۹٪	نبود قوانین حمایتی کافی برای نوآوری سبز - ۸۱٪
اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی - ۸۹٪	کمبود منابع مالی در شرایط اقتصادی ناپایدار - ۷۹٪
تأمین پایدار مواد اولیه از منابع قابل اعتماد - ۸۲٪	تغییرات غیرمنتظره در سیاست‌های زیست‌محیطی - ۷۹٪
وجود استانداردهای بالا برای ارتقاء سلامت و ایمنی - ۷۷٪	تأخیر در به‌کارگیری فناوری‌های نوین - ۷۹٪
فرصت‌ها (Opportunities)	تهدیدها (Threats)
توسعه فناوری‌های نوین مدیریت پسماند - ۹۰٪	هزینه بالای اجرای پروژه‌های سبز - ۸۴٪
گسترش بازارهای صادراتی محصولات سبز - ۸۸٪	عدم مدیریت کامل بر پسماندهای خطرناک - ۸۳٪
استقبال صنعت از استانداردهای بهره‌وری آب - ۸۱٪	چالش‌های مرتبط با تأمین مواد اولیه پایدار - ۷۹٪
دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی - ۷۵٪	تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی بر زنجیره تأمین - ۷۹٪



گام ۲: تشکیل ماتریس SWOT

برای تحلیل دقیق‌تر، ماتریس SWOT با استفاده از تطبیق عوامل داخلی (W و S) با عوامل خارجی (T و O) ایجاد می‌شود. این ماتریس شامل چهار استراتژی اصلی است:

جدول ۴

ماتریس SWOT بر اساس استراتژی‌ها

عوامل خارجی/داخلی	فرصت‌ها (O)	تهدیدها (T)
	توسعه فناوری‌های نوین مدیریت پسماند گسترش بازارهای صادراتی محصولات سبز استقبال صنعت از استانداردهای بهره‌وری آب دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	هزینه بالای اجرای پروژه‌های سبز عدم مدیریت کامل بر پسماندهای خطرناک چالش‌های مرتبط با تأمین مواد اولیه پایدار تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی بر زنجیره تأمین
نقاط قوت (S)	استراتژی SO:	استراتژی ST:
وجود زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت پسماند اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی تأمین پایدار مواد اولیه از منابع قابل اعتماد وجود استانداردهای بالا برای ارتقاء سلامت و ایمنی	بهره‌گیری از زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند برای توسعه فناوری‌های نوین. استفاده از اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی برای گسترش بازارهای صادراتی محصولات سبز.	استفاده از زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت پسماند به منظور کاهش هزینه‌های اجرای پروژه‌های سبز. بهره‌گیری از تأمین پایدار مواد اولیه برای مقابله با چالش‌های تأمین مواد اولیه پایدار.
نقاط ضعف (W)	استراتژی WO:	استراتژی WT:
نبود قوانین حمایتی کافی برای نوآوری سبز کمبود منابع مالی در شرایط اقتصادی ناپایدار تغییرات غیرمنتظره در سیاست‌های زیست‌محیطی تأخیر در به‌کارگیری فناوری‌های نوین	بهره‌برداری از دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی برای نوآوری. تدوین قوانین حمایتی با استفاده از فرصت‌های بین‌المللی برای تثبیت تغییرات زیست‌محیطی.	تمرکز بر هماهنگی بخش‌های مدیریتی برای کاهش تأخیر در به‌کارگیری فناوری‌های نوین. افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه برای مقابله با چالش‌های تأمین مواد اولیه پایدار.

گام ۳: تشریح استراتژی‌های پیشنهادی

۱. استراتژی‌های SO (استفاده از نقاط قوت برای بهره‌برداری از فرصت‌ها):

بهره‌گیری از زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند برای توسعه فناوری‌های نوین.
استفاده از اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی برای گسترش بازارهای صادراتی محصولات سبز.

۲. استراتژی‌های ST (استفاده از نقاط قوت برای کاهش تهدیدها):

استفاده از زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت پسماند به منظور کاهش هزینه‌های اجرای پروژه‌های سبز.
بهره‌گیری از تأمین پایدار مواد اولیه برای مقابله با چالش‌های تأمین مواد اولیه پایدار.

۳. استراتژی‌های WO (کاهش نقاط ضعف با بهره‌برداری از فرصت‌ها):

بهره‌برداری از دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی برای نوآوری.
تدوین قوانین حمایتی با استفاده از فرصت‌های بین‌المللی برای تثبیت تغییرات زیست‌محیطی.

۴. استراتژی‌های WT (کاهش نقاط ضعف و مقابله با تهدیدها):

تمرکز بر هماهنگی بخش‌های مدیریتی برای کاهش تأخیر در به‌کارگیری فناوری‌های نوین.



افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه برای مقابله با چالش‌های تأمین مواد اولیه پایدار.

گام ۴: تعیین اولویت‌های اجرایی

در راستای تعیین اولویت‌های اجرایی، محقق بر اساس نقاط قوت، ضعف، تهدیدها و فرصت‌ها، و نیز با استفاده از استراتژی‌ها، اولویت‌های اجرایی را با همراهی ۳ نفر از مدیران سازمان با مدرک دکتری هماهنگ نمود و سپس از طریق تهیه یک پرسشنامه با استفاده از روش دیمتل به سطح‌بندی آن‌ها از طریق پخش آن در میان ۵ نفر از مدیران ارشد سازمان پرداخت. مراحل روش دیمتل به صورت زیر است:

جدول ۵

میانگین نظر خبرگان

ماتریس	استفاده از زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند	اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی	تأمین پایدار مواد اولیه	تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز	دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	تمرکز بر هماهنگی بخش‌های مدیریتی	بر افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه	مجموع
استفاده از زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند	۰	۳/۴	۲/۸	۳	۲/۴	۱/۸	۲/۴	۱۵/۸
اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی	۲/۸	۰	۳/۲	۲/۶	۳/۲	۲/۶	۲/۲	۱۶/۶
تأمین پایدار مواد اولیه	۳	۳/۲	۰	۲	۱/۲	۳/۲	۲/۶	۱۵/۲
تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز	۲/۸	۲/۸	۳/۶	۰	۱/۶	۳/۴	۲	۱۶/۲
دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	۳/۴	۲/۴	۳	۲/۶	۰	۳/۲	۱/۸	۱۶/۴
تمرکز بر هماهنگی بخش‌های مدیریتی	۲/۴	۲/۴	۲/۶	۲	۳	۰	۳/۲	۱۵/۶
افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه	۲	۱/۴	۱/۴	۳	۲/۸	۳	۰	۱۳/۶



جدول ۶

نرمالسازی یا شدت نسبی روابط مستقیم

ماتریس (M)	استفاده	از	اجرای برنامه‌های	تأمین پایدار مواد	تدوین	قوانین	دسترسی به منابع	تمرکز	بر	افزایش
	زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند	منظم مدیریت زیست‌محیطی	مدیریت	اولیه	حمایتی	برای نوآوری سبز	مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	هماهنگی بخش‌های مدیریتی	سرمايه‌گذاری در تحقیق و توسعه	
استفاده	از	۰	۰/۲۰۴۸	۰/۱۶۸۷	۰/۱۸۰۷	۰/۱۴۴۶	۰/۱۴۴۶	۰/۱۰۸۴	۰/۱۴۴۶	
زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند										
اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی	۰/۱۶۸۷	۰		۰/۱۹۲۸	۰/۱۵۶۶	۰/۱۹۲۸	۰/۱۹۲۸	۰/۱۵۶۶	۰/۱۳۲۵	
تأمین پایدار مواد اولیه	۰/۱۸۰۷	۰/۱۹۲۸	۰	۰/۱۲۰۵	۰/۰۷۲۳	۰/۱۹۲۸	۰/۱۵۶۶			
تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز	۰/۱۶۸۷	۰/۱۶۸۷	۰/۲۱۶۹	۰	۰/۰۹۶۴	۰/۲۰۴۸	۰/۱۲۰۵			
دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	۰/۲۰۴۸	۰/۱۴۴۶	۰/۱۸۰۷	۰/۱۵۶۶	۰	۰/۱۹۲۸	۰/۱۰۸۴			
تمرکز هماهنگی بخش‌های مدیریتی	۰/۱۴۴۶	۰/۱۴۴۶	۰/۱۵۶۶	۰/۱۲۰۵	۰/۱۸۰۷	۰	۰/۱۹۲۸			
افزایش سرمايه‌گذاری در تحقیق و توسعه	۰/۱۲۰۵	۰/۰۸۴۳	۰/۰۸۴۳	۰/۱۸۰۷	۰/۱۶۸۷	۰/۱۸۰۷	۰			

در این گام آلفا را در ماتریس روابط مستقیم ضرب می‌کنیم.



جدول ۷

ماتریس شدت ممکن (معکوس)

ماتریس معکوس	استفاده از زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند	اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی	تأمین پایدار مواد اولیه	تدوین قوانین حمایتی نوآوری سبز	دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	تمرکز بر هماهنگی بخش‌های مدیریتی	افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه
استفاده از زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند	۳/۳۲۱۹	۲/۴۱۵	۲/۴۹۹۲	۲/۳۱۸۴	۲/۱۷۳	۲/۵۰۹۹	۲/۱۹۰۶
اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی	۲/۵۶۷۳	۳/۳۴۰۷	۲/۶۱۷۵	۲/۳۹۲۲	۲/۲۹۷	۲/۶۴۹۶	۲/۲۷۱۹
تأمین پایدار مواد اولیه	۲/۳۸۱۳	۲/۳۱۷۶	۳/۲۵۹۱	۲/۱۸۸۲	۲/۰۴۳۲	۲/۴۷۵۴	۲/۱۲۴۳
تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز	۲/۵۰۷۴	۲/۴۳۰۹	۲/۵۷۶۶	۳/۲۰۱۴	۲/۱۷۴	۲/۶۲۴۵	۲/۲۱۵۶
دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	۲/۵۶۹۸	۲/۴۴۶۳	۲/۵۸۵۳	۲/۳۶۹۹	۳/۱۱۴۲	۲/۶۴۹۸	۲/۲۳۴۷
تمرکز بر هماهنگی بخش‌های مدیریتی	۲/۴۰۳۲	۲/۳۲۳۴	۲/۴۴۰۳	۲/۲۳۲۵	۲/۱۶۴۵	۳/۳۶۵۲	۲/۱۹
افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه	۲/۱۳۸۵	۲/۰۴	۲/۱۳۹۵	۲/۰۴۷۴	۱/۹۳۷۲	۲/۲۶۴۱	۲/۸۰۷۸

این مرحله محاسبه ماتریس شدت ممکن از روابط مستقیم و غیر مستقیم است که به صورت - معکوس I-M بدست می‌آید.



جدول ۸

ماتریس روابط کل یا شدت روابط مستقیم و غیر مستقیم

ماتریس روابط کل	استفاده از زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند	اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی	تأمین پایدار مواد اولیه	تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز	دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	تمرکز بر هماهنگی بخش‌های مدیریتی	افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه	سطری (R)
استفاده از زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند	۲/۳۲۱۹	۲/۴۱۵	۲/۴۹۹۲	۲/۳۱۸۴	۲/۱۷۳	۲/۵۰۹۹	۲/۱۹۰۶	۱۶/۴۲۸
اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی	۲/۵۶۷۳	۲/۳۴۰۷	۲/۶۱۷۵	۲/۳۹۲۲	۲/۲۹۷	۲/۶۴۹۶	۲/۲۷۱۹	۱۷/۱۳۶۲
تأمین پایدار مواد اولیه	۲/۳۸۱۳	۲/۳۱۷۶	۲/۲۵۹۱	۲/۱۸۸۲	۲/۰۴۳۲	۲/۴۷۵۴	۲/۱۲۴۳	۱۵/۷۸۹۱
تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز	۲/۵۰۷۴	۲/۴۳۰۹	۲/۵۷۶۶	۲/۲۰۱۴	۲/۱۷۴	۲/۶۲۴۵	۲/۲۱۵۶	۱۶/۷۳۰۵
دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	۲/۵۶۹۸	۲/۴۴۶۳	۲/۵۸۵۳	۲/۳۶۹۹	۲/۱۱۴۲	۲/۶۴۹۸	۲/۲۳۴۷	۱۶/۹۷۰۱
تمرکز بر هماهنگی بخش‌های مدیریتی	۲/۴۰۳۲	۲/۳۲۳۴	۲/۴۴۰۳	۲/۲۳۲۵	۲/۱۶۴۵	۲/۳۶۵۲	۲/۱۹	۱۶/۱۱۹
افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه	۲/۱۳۸۵	۲/۰۴	۲/۱۳۹۵	۲/۰۴۷۴	۱/۹۳۷۲	۲/۲۶۴۱	۱/۸۰۷۸	۱۴/۳۷۴۵
ستونی (L)	۱۶/۸۸۹۴	۱۶/۳۱۳۸	۱۷/۱۱۷۶	۱۵/۷۵	۱۴/۹۰۳۲	۱۷/۵۳۸۴	۱۵/۰۳۴۹	

این مرحله محاسبه ماتریس شدت نسبی از روابط مستقیم و غیر مستقیم (روابط کل) است که به صورت - معکوس M(I-M)

بدست می‌آید.

جدول ۹

ماتریس شدت روابط غیر مستقیم

ماتریس شدت غیر مستقیم	استفاده زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند	اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی	تأمین پایدار مواد اولیه	تدوین حمایتی نوآوری سبز	قوانین مالی از سازمان‌های بین‌المللی	دسترسی به منابع از طریق بخش‌های مدیریتی	تمرکز هماهنگی بخش‌های مدیریتی	بر افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه
استفاده زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند	از	۲/۳۲۱۹	۲/۲۱۰۲	۲/۳۳۰۶	۲/۱۳۷۶	۲/۰۲۸۵	۲/۴۰۱۴	۲/۰۴۶
اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی	۲/۳۹۸۶	۲/۳۴۰۷	۲/۴۲۴۸	۲/۲۳۵۵	۲/۱۰۴۲	۲/۴۹۲۹	۲/۱۳۹۴	
تأمین پایدار مواد اولیه	۲/۲۰۰۶	۲/۱۲۴۸	۲/۲۵۹۱	۲/۰۶۷۷	۱/۹۷۰۹	۲/۲۸۲۷	۱/۹۶۷۷	
تدوین حمایتی نوآوری سبز	۲/۳۳۸۷	۲/۲۶۲۲	۲/۳۵۹۸	۲/۲۰۱۴	۲/۰۷۷۶	۲/۴۱۹۷	۲/۰۹۵۱	
دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	۲/۳۶۵	۲/۳۰۱۷	۲/۴۰۴۶	۲/۲۱۳۳	۲/۱۱۴۲	۲/۴۵۷	۲/۱۲۶۳	
تمرکز هماهنگی بخش‌های مدیریتی	۲/۲۵۸۶	۲/۱۷۸۸	۲/۲۸۳۷	۲/۱۱۲	۱/۹۸۳۸	۲/۳۶۵۲	۱/۹۹۷۲	
افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه	۲/۰۱۸	۱/۹۵۵۷	۲/۰۵۵۲	۱/۸۶۶۷	۱/۷۶۸۵	۲/۰۸۳۳	۱/۸۰۷۸	

این مرحله محاسبه ماتریس شدت نسبی از غیر مستقیم است که به صورت $M^2(I-M)$ معکوس بدست می‌آید.



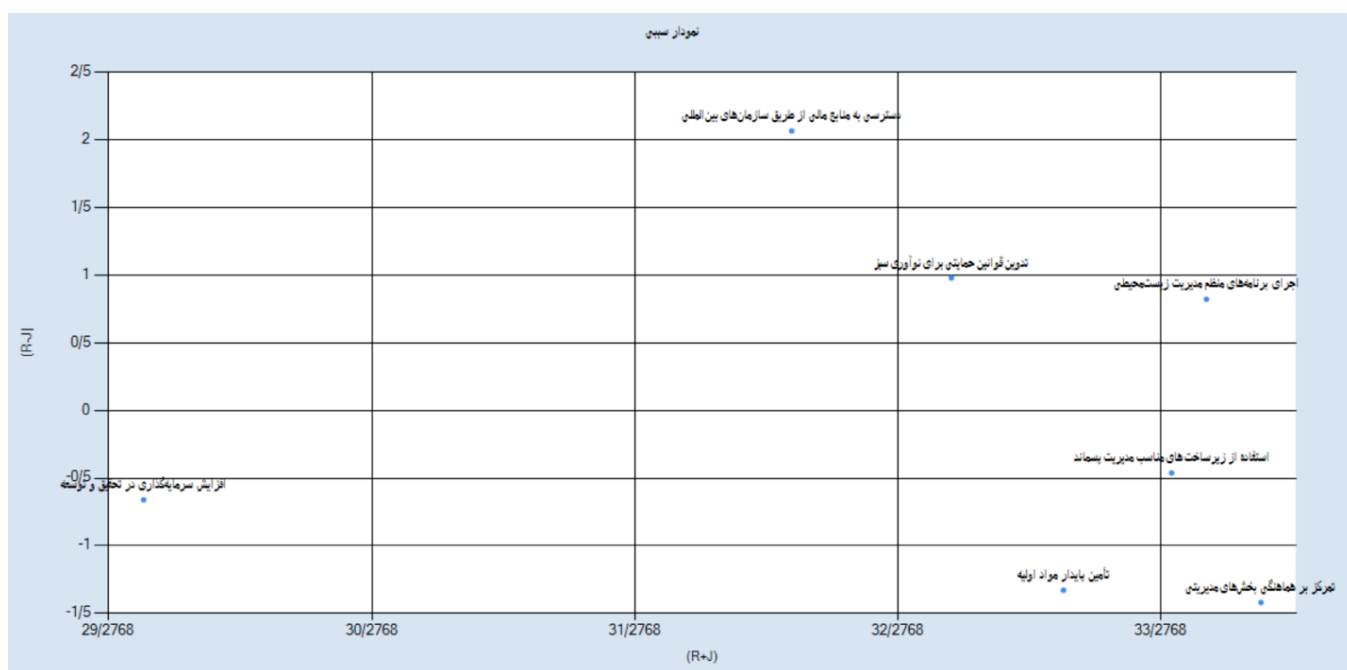
جدول ۱۰

نتیجه نهایی

نتیجه	R	J	R+J	R-J
اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی	۱۷/۱۳۶۲	۱۶/۳۱۳۸	۳۳/۴۵	۰/۸۲۲۴
دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی	۱۶/۹۷۰۱	۱۴/۹۰۳۲	۳۱/۸۷۳۳	۲/۰۶۶۹
تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز	۱۶/۷۳۰۵	۱۵/۷۵	۳۲/۴۸۰۴	۰/۹۸۰۵
استفاده از زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند	۱۶/۴۲۸	۱۶/۸۸۹۴	۳۳/۳۱۷۴	-۰/۴۶۱۴
تمرکز بر هماهنگی بخش‌های مدیریتی	۱۶/۱۱۹	۱۷/۵۳۸۴	۳۳/۶۵۷۴	-۱/۴۱۹۴
تأمین پایدار مواد اولیه	۱۵/۷۸۹۱	۱۷/۱۱۷۶	۳۲/۹۰۶۷	-۱/۳۲۸۵
افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه	۱۴/۳۷۴۵	۱۵/۰۳۴۹	۲۹/۴۰۹۴	-۰/۶۶۰۴

شکل ۱

سطح‌بندی اولویت‌ها



بر اساس خروجی دیمتل و معیار $R+J$ ، رتبه‌بندی به ترتیب اهمیت به شرح زیر است: «تمرکز بر هماهنگی بخش‌های مدیریتی» با $R+J$ برابر ۳۳/۶۵۷۴ در رتبه اول، «اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی» با $R+J$ برابر ۳۳/۴۵ در رتبه دوم، و «استفاده از زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند» با $R+J$ برابر ۳۳/۳۱۷۴ در رتبه سوم قرار دارند که همگی به عنوان عوامل بسیار مهم شناسایی شدند.

پس از آن، «تأمین پایدار مواد اولیه» با $R+J$ برابر ۳۲.۹۰۶۷ و «تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز» با $R+J$ برابر ۳۲.۴۸۰۴، هر دو در دسته بسیار مهم، به ترتیب در رتبه‌های چهارم و پنجم جای گرفتند. «دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی» با $R+J$ برابر ۳۱.۸۷۳۳ در رتبه ششم و همچنان در دسته بسیار مهم قرار دارد. در نهایت، «افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه» با $R+J$ برابر ۲۹.۴۰۹۴ در رتبه هفتم و در دسته مهم قرار گرفت.

اما در دیدگاه کل‌نگر و سیستمی و بر اساس اینکه کدام عامل بیشترین تأثیرگذاری یا تأثیرپذیری را دارد، بر اساس مقادیر $R+J$ و $R-J$ ارائه‌شده از خروجی دیمتل، اولویت اجرایی عوامل به شرح زیر است: ابتدا باید بر اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی ($R+J$: 33.45, $R-J$: 0.8224) و تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز ($R+J$: 32.4804, $R-J$: 0.9805) تمرکز کرد، زیرا این دو عامل به دلیل مقادیر بالای $R+J$ و تأثیرگذاری مثبت ($R-J$ مثبت) نقش کلیدی در هدایت سیستم دارند. سپس، دسترسی به منابع مالی از طریق سازمان‌های بین‌المللی ($R+J$: 31.8733, $R-J$: 2.0669) به دلیل تأثیرگذاری قوی و اهمیت نسبی بالا در اولویت بعدی قرار می‌گیرد. پس از آن، تمرکز بر هماهنگی بخش‌های مدیریتی ($R+J$: 33.6574, $R-J$: -1.4194) و استفاده از زیرساخت‌های مناسب مدیریت پسماند ($R+J$: 33.3174, $R-J$: -0.4614) به دلیل تأثیرپذیری ($R-J$ منفی) و اهمیت بالا باید مورد توجه قرار گیرند. تأمین پایدار مواد اولیه ($R+J$: 32.9067, $R-J$: -1.3285) نیز در ادامه اهمیت دارد، اما به دلیل وابستگی بیشتر، اولویت کمتری نسبت به عوامل تأثیرگذار دارد. در نهایت، افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه ($R+J$: 29.4094, $R-J$: -0.6604) به دلیل کمترین مقدار $R+J$ و تأثیرپذیری، در پایین‌ترین اولویت اجرایی قرار می‌گیرد و باید پس از تقویت عوامل اثرگذار، به‌صورت تدریجی مورد توجه قرار گیرد.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر که با هدف ارزیابی استراتژیک نوآوری‌های فناورانه سبز در صنعت فولاد با مطالعه موردی شرکت فولاد خوزستان انجام شد، نشان داد که اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی، تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز، و دسترسی به منابع مالی بین‌المللی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در توسعه نوآوری‌های فناورانه سبز محسوب می‌شوند. بر اساس خروجی روش دیمتل، این سه عامل بیشترین تأثیرگذاری را بر سایر مؤلفه‌های سیستم داشته و نقش راهبردی در جهت‌دهی به مسیر نوآوری سبز ایفا می‌کنند. همچنین عواملی مانند هماهنگی مدیریتی، تأمین پایدار مواد اولیه و استفاده از زیرساخت‌های مدیریت پسماند، از جمله مؤلفه‌هایی هستند که اگرچه تأثیرپذیرتر از سایر عواملند، اما برای استمرار و کارآمدی نوآوری‌های سبز ضروری محسوب می‌شوند. این نتایج به روشنی نشان می‌دهد که موفقیت در توسعه فناوری‌های سبز مستلزم یک رویکرد چندبعدی است که عوامل زیست‌محیطی، نهادی، مالی و مدیریتی را به صورت یکپارچه در بر گیرد. یافته‌های پژوهش با نتایج مطالعه (Chamran et al., 2023) همسو است که نشان داد تخصیص بودجه و وجود نیروی انسانی متخصص از جمله محرک‌های کلیدی در نوآوری‌های سبز در صنعت فولاد ایران هستند. در پژوهش حاضر نیز «دسترسی به منابع مالی بین‌المللی» و «کمیود نیروی انسانی متخصص» به ترتیب به‌عنوان فرصت و ضعف شناسایی شدند که اهمیت دوگانه منابع مالی و انسانی را در پیاده‌سازی نوآوری‌های فناورانه تأیید می‌کند. همچنین، یافته‌های تحقیق با نتایج پژوهش (Ketabchi et al., 2023) مطابقت دارد؛ زیرا هر دو مطالعه بر نقش ظرفیت جذب نوآوری و ضرورت هماهنگی در میان واحدهای مدیریتی تأکید دارند. در واقع، همان‌طور که مدل ارائه‌شده در صنعت پتروشیمی نشان داد، ظرفیت جذب دانش و همکاری میان‌بخشی، یکی از پیش‌شرط‌های اصلی برای استقرار نوآوری‌های فناورانه سبز است.

از سوی دیگر، اهمیت قوانین حمایتی و سیاست‌های تشویقی در نتایج این پژوهش نیز تأیید شد. یافته‌ها نشان دادند که «تدوین قوانین حمایتی برای نوآوری سبز» به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی با اثرگذاری مثبت (R-J مثبت) در اولویت دوم قرار دارد. این یافته با مطالعه (Wang & Yang, 2025) که تأثیر سیاست‌های زیست‌محیطی را بر تحریک نوآوری فناورانه سبز در صنایع تولیدی بررسی کرد، هم‌راستا است. هر دو پژوهش تأکید دارند که سیاست‌های زیست‌محیطی می‌توانند به‌جای نقش بازدارنده، نقش تقویت‌کننده در نوآوری ایفا کنند، به‌شرط آن‌که طراحی آن‌ها بر مبنای انگیزه‌های اقتصادی و تشویقی انجام گیرد. در همین راستا، (Ren et al., 2023) نشان داد که مقررات رسمی و غیررسمی زیست‌محیطی، هر دو، نوآوری سبز را ترویج می‌کنند اما تأثیر آن‌ها بسته به شرایط نهادی و جغرافیایی متفاوت است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که در ایران نیز باید قوانین زیست‌محیطی متناسب با ساختار صنعتی، منابع انرژی و وضعیت رقابتی تدوین شود تا اثرگذاری بیشتری بر نوآوری فناورانه داشته باشد.

نتیجه به‌دست‌آمده در خصوص اولویت اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی نیز با مطالعات جهانی همخوانی دارد. برای مثال، پژوهش (Gao et al., 2025) بیان کرد که عملکرد زیست‌محیطی و اجتماعی شرکت‌ها (ESG) رابطه مثبتی با میزان نوآوری فناورانه سبز دارد و این عملکرد نه تنها به بهبود اعتبار شرکت منجر می‌شود بلکه هزینه‌های تأمین مالی را کاهش می‌دهد. در این پژوهش نیز مشخص شد که اجرای مداوم برنامه‌های زیست‌محیطی و گزارش‌دهی عملکرد، عامل اصلی در بهبود پایداری و افزایش بهره‌وری شرکت فولاد خوزستان است.

از سوی دیگر، یافته‌ها نشان می‌دهند که نقش دسترسی به منابع مالی بین‌المللی برای توسعه فناوری‌های سبز بسیار تعیین‌کننده است؛ زیرا محدودیت‌های مالی یکی از موانع اصلی در پیاده‌سازی نوآوری‌های پرهزینه محسوب می‌شود. این یافته با پژوهش (Xu & Lin, 2025) هم‌راستاست که نشان داد اعتبار سبز (Green Credit) می‌تواند به‌طور مؤثری نوآوری فناورانه سبز را از طریق کاهش عدم قطعیت سرمایه‌گذاری و حمایت از پروژه‌های زیست‌محیطی ارتقا دهد. به‌طور مشابه، مطالعه (Xi & Jia, 2025) نشان داد که سیاست‌های تجارت کربن با کاهش محدودیت‌های تأمین مالی، نوآوری فناورانه سبز را تحریک می‌کنند. بنابراین، در شرکت فولاد خوزستان نیز توسعه روابط مالی بین‌المللی و استفاده از صندوق‌های جهانی محیط‌زیستی می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد کلیدی در تسریع نوآوری‌های سبز عمل کند.

در حوزه مدیریت و هماهنگی سازمانی نیز یافته‌های این پژوهش با نتایج تحقیق (Fathi et al., 2022) هم‌خوان است که نشان داد اجرای نظام‌های مدیریت کیفیت، در کنار مقررات محیطی، بر نوآوری سبز تأثیر معناداری دارد. در شرکت فولاد خوزستان، ضعف در هماهنگی میان سطوح مدیریتی یکی از چالش‌های شناسایی شده بود. بنابراین، برای تحقق نوآوری سبز، تنها تمرکز بر فناوری کافی نیست، بلکه وجود ساختار مدیریتی منسجم و فرآیندهای کنترل کیفیت، شرط لازم برای اثربخشی نوآوری است.

یافته‌های پژوهش حاضر همچنین اهمیت تأمین پایدار مواد اولیه را در زنجیره تأمین فولاد نشان داد. در شرایطی که نوسانات جهانی قیمت مواد اولیه و محدودیت منابع معدنی چالش‌های عمده‌ای ایجاد کرده‌اند، دسترسی به منابع مطمئن و قابل بازیافت می‌تواند به‌طور مستقیم بر پایداری تولید فولاد سبز تأثیر بگذارد. این یافته با مطالعه (Y. Li et al., 2024) هم‌راستاست که تحلیل مسیر فناوری‌های خنثای کربن در صنعت فولاد را انجام داد و نشان داد که سیاست‌های تشویقی در زمینه تأمین مواد اولیه و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند روند کربن‌زدایی را تسریع کند.

از منظر مقایسه‌ای، نتایج تحقیق حاضر همسو با پژوهش (Shen et al., 2025) است که مسیرهای کربن‌زدایی در زنجیره تأمین فولاد صنایع خودروسازی را تحلیل کرده و نشان داد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری‌های بازیافت، مهم‌ترین مسیر برای رسیدن به فولاد سبز است. یافته‌های این پژوهش نیز مؤید آن است که زیرساخت‌های مدیریت پسماند و بازیافت نقش حیاتی در راهبردهای پایدار دارند.

افزون بر این، ارزیابی زیست‌محیطی در سطح خاورمیانه نشان داده است که کشورهایی با ظرفیت تولید انرژی خورشیدی بالا، از جمله ایران، می‌توانند با سیاست‌گذاری صحیح و همکاری بین‌المللی به مراکز منطقه‌ای تولید فولاد سبز تبدیل شوند (Nurdiawati et al., 2025).

از بعد اقتصادی، یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که هزینه‌های بالای اجرای پروژه‌های سبز و محدودیت منابع مالی داخلی، از موانع کلیدی در توسعه فناوری‌های نوآورانه محسوب می‌شوند. این نتیجه با مطالعات (Zhao et al., 2022) و (Zou et al., 2025) هم‌راستا است که هر دو به نقش سیاست‌های تجارت کربن در بهبود کمیت و کیفیت نوآوری فناوری سبز اشاره کرده‌اند. این سیاست‌ها با فراهم کردن سازوکارهای مالی برای جبران هزینه‌های زیست‌محیطی، انگیزه شرکت‌ها را برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز افزایش می‌دهند.

از سوی دیگر، یافته‌های پژوهش حاضر بر نقش پیچیده روابط میان کاهش انتشار کربن و نوآوری فناورانه تأکید دارد. همان‌گونه که (H. Li et al., 2024) در تحلیل پارادوکس نوآوری سبز بیان کرد، در برخی موارد، کاهش انتشار ممکن است موجب تمرکز شرکت‌ها بر نوآوری‌های سطحی‌تر شود؛ اما طراحی صحیح سیاست‌های انگیزشی می‌تواند این روند را معکوس کند. در شرکت فولاد خوزستان نیز چنانچه حمایت مالی و قانونی کافی فراهم شود، می‌توان انتظار داشت که نوآوری‌های فناورانه عمیق‌تر و پایدارتری شکل گیرد.

در سطح کلان‌تر، نتایج این پژوهش همسو با یافته‌های (Wang et al., 2023) و (Chen et al., 2023) است که تأکید دارند مقررات محیطی ناهمگون و ناپایدار می‌توانند موجب بروز اثرات غیرخطی در نوآوری‌های سبز شوند. بدین معنا که در مراحل اولیه، فشارهای زیست‌محیطی ممکن است هزینه‌ها را افزایش دهند، اما در بلندمدت به ارتقای بهره‌وری منجر خواهند شد. چنین الگویی در نتایج حاصل از تحلیل SWOT این پژوهش نیز قابل مشاهده بود، جایی که برخی تهدیدها (مانند هزینه‌های بالای پروژه‌های سبز) در بلندمدت به فرصت تبدیل می‌شوند، مشروط بر آنکه حمایت‌های ساختاری و هماهنگی مدیریتی به‌طور مؤثر اجرا گردد.

همچنین، یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج (Zhang et al., 2022) همخوانی دارد که تفاوت‌های منطقه‌ای در کارایی نوآوری فناوری سبز را به سطح حمایت دولت و آموزش مرتبط دانست. این موضوع به‌ویژه در مورد شرکت فولاد خوزستان اهمیت دارد، زیرا ارتقای مهارت‌های نیروی انسانی و آموزش مستمر کارکنان در حوزه فناوری‌های نوین زیست‌محیطی، یکی از ابزارهای کلیدی برای بهبود اثربخشی نوآوری‌هاست.

در نهایت، این مطالعه بر اهمیت ایجاد یک رویکرد نظام‌مند برای توسعه فولاد سبز تأکید می‌کند. همان‌گونه که (Safdari Ranjbar & Nikzad, 2024) در تحلیل ساختاری نظام نوآوری فولاد سبز ایران مطرح کرده‌اند، وجود تعامل میان بازیگران کلیدی (از جمله دولت، صنعت و نهادهای علمی) شرط لازم برای توسعه موفقیت‌آمیز نوآوری فناورانه است. بنابراین، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ایجاد یک شبکه منسجم از سیاست‌گذاران، پژوهشگران و مدیران صنعتی می‌تواند به هم‌افزایی در مسیر گذار به صنعت فولاد پایدار منجر شود.

این پژوهش دارای چند محدودیت است که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. نخست آن که مطالعه حاضر به‌صورت موردی در شرکت فولاد خوزستان انجام شده است؛ بنابراین تعمیم نتایج به سایر صنایع فولادی یا کشورهای دیگر نیازمند احتیاط است. دوم آن که داده‌ها عمدتاً بر اساس دیدگاه‌های خبرگان و مدیران گردآوری شده‌اند و ممکن است دیدگاه سایر ذی‌نفعان مانند کارکنان، مشتریان یا نهادهای زیست‌محیطی لحاظ نشده باشد. سوم آن که اگرچه روش‌های دلفی، SWOT و دیمتل ترکیبی جامع ارائه می‌دهند، اما تحلیل آن‌ها ماهیتی ایستا دارد و نمی‌تواند پویایی‌های زمانی و تغییرات سیاستی را به‌طور کامل منعکس کند.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از مدل‌های پویای سیستم یا مدل‌سازی عامل‌بنیاد برای شبیه‌سازی اثرات بلندمدت استراتژی‌های نوآوری سبز در صنعت فولاد استفاده شود. همچنین مقایسه میان صنایع فولادی کشورهای مختلف می‌تواند به شناسایی شکاف‌های ساختاری و انتقال تجربیات موفق کمک کند. مطالعات آینده می‌توانند نقش فناوری‌های نوظهور مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و بلاکچین را در بهینه‌سازی مدیریت انرژی و پسماند در صنایع سنگین بررسی نمایند.



برای مدیران صنعتی و سیاست‌گذاران، نتایج این پژوهش چند توصیه کلیدی دارد: نخست، تمرکز بر اجرای برنامه‌های منظم مدیریت زیست‌محیطی و گزارش‌دهی شفاف عملکرد به‌عنوان ابزاری برای ارتقای اعتماد عمومی و کاهش هزینه‌های مالی. دوم، تدوین قوانین حمایتی در سطح ملی برای تسهیل فرایند صدور مجوز و کاهش موانع نوآوری سبز. سوم، ایجاد سازوکارهای مالی مشارکتی با سازمان‌های بین‌المللی برای تأمین منابع اجرای پروژه‌های سبز. چهارم، تقویت هماهنگی میان واحدهای مدیریتی و توسعه آموزش‌های تخصصی در حوزه فناوری‌های نوین. در نهایت، نهادینه‌سازی فرهنگ سازمانی مبتنی بر پایداری می‌تواند راه را برای تحقق اهداف توسعه پایدار در صنعت فولاد ایران هموار سازد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازن اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

شفافیت داده‌ها

داده‌ها و مآخذ پژوهش حاضر در صورت درخواست از نویسنده مسئول و ضمن رعایت اصول کپی رایت ارسال خواهد شد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

References

- Chamran, M., Jahani, M., & Hatami, A. (2023). A framework for identifying the drivers of green innovation in the steel industry using the fuzzy Delphi method. 2nd International Conference on Management, Business, Economics, and Accounting.
- Chen, H., Yi, J., Chen, A., Peng, D., & Yang, J. (2023). Green technology innovation and CO2 emission in China: Evidence from a spatial-temporal analysis and a nonlinear spatial durbin model. *Energy Policy*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113338>
- Cheng, Z., & Yu, X. (2023). Can central environmental protection inspection induce corporate green technology innovation? *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135902>
- Fathi, M. R., Nasrollahi, M., Behrouz, A., & Bargozi, F. (2022). The application of quality management systems in green innovation with the moderating role of environmental regulations (Case study: SA Iran). *Standard and Quality Management Scientific Quarterly*, 12(3), 28–52. http://www.jstandardization.ir/article_165576.html
- Gao, X., He, X., Sun, C., Wu, D., & Zhang, J. (2025). Innovation in shouldering green responsibility: ESG performance and green technology innovation. *Energy Economics*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108197>
- Ketabchi, H., Radfar, R., Tolouei Ashleghi, A., & Khamseh, A. (2023). A model for enhancing absorptive capacity of green technological innovations in the petrochemical industry. *Karafan Scientific Quarterly*, 20(1), 31–53. https://karafan.tvu.ac.ir/article_167065.html

- Li, H., Su, Y., Ding, C. J., Tian, G. G., & Wu, Z. (2024). Unveiling the green innovation paradox: Exploring the impact of carbon emission reduction on corporate green technology innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123562>
- Li, X., Huang, Y., Li, J., Liu, X., He, J., & Dai, J. (2022). The mechanism of influencing green technology innovation behavior: evidence from Chinese construction enterprises. *Buildings*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/buildings12020237>
- Li, Y., Li, J., Sun, M., Guo, Y., Cheng, F., & Gao, C. (2024). Analysis of carbon neutrality technology path selection in the steel industry under policy incentives. *Energy*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130550>
- Li, Z., Åhman, M., Algers, J., & Nilsson, L. J. (2025). Decarbonizing the Asian steel industries through green Hot Briquetted Iron trade. *Resources, Conservation and Recycling*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108275>
- Mallett, A., & Pal, P. (2022). Green transformation in the iron and steel industry in India: Rethinking patterns of innovation. *Energy Strategy Reviews*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100968>
- Nurdiawati, A., Tahir, F., Zaini, I. N., & Al-Ghamdi, S. G. (2025). Prospective environmental and economic assessment of green steel production in the Middle East. *Resources, Conservation and Recycling*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108277>
- Ren, C., Wang, T., Wang, Y., Zhang, Y., & Wang, L. (2023). The Heterogeneous Effects of Formal and Informal Environmental Regulation on Green Technology Innovation—An Empirical Study of 284 Cities in China. *International journal of environmental research and public health*, 20(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph20021621>
- Safdari Ranjbar, M., & Nikzad, A. H. (2024). Structural and functional analysis of the green steel technological innovation system in Iran: Application of the graph theory approach. *Governance Knowledge Scientific Quarterly*, 2(5), 6–31. https://www.jokog.ir/article_215201.html
- Shen, J., Zhang, Q., & Tian, S. (2025). Decarbonization pathways analysis and recommendations in the green steel supply chain of a typical steel end user—automotive industry. *Applied Energy*, 377. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124711>
- Wang, W., & Yang, X. (2025). Driving green technology innovation: The impact of environmental policies on manufacturing. *Journal of Innovation & Knowledge*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100684>
- Wang, X., Chu, B., Ding, H., & Chiu, A. S. (2023). Impacts of heterogeneous environmental regulation on green transformation of China's iron and steel industry: Evidence from dynamic panel threshold regression. *Journal of Cleaner Production*, 382. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135214>
- Xi, B., & Jia, W. (2025). Research on the impact of carbon trading on enterprises' green technology innovation. *Energy Policy*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114436>
- Xu, B., & Lin, B. (2025). How does green credit effectively promote green technology innovation? *International Review of Financial Analysis*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2025.104089>
- Zhang, L., Ma, X., Ock, Y. S., & Qing, L. (2022). Research on regional differences and influencing factors of Chinese industrial green technology innovation efficiency based on dagum gini coefficient decomposition. *Land*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/land11010122>
- Zhao, X., Shang, Y., Ma, X., Xia, P., & Shahzad, U. (2022). Does carbon trading lead to green technology innovation: recent evidence from Chinese companies in resource-based industries. *Ieee Transactions on Engineering Management*. https://www.researchgate.net/publication/362101438_Does_Carbon_Trading_Lead_to_Green_Technology_Innovation_Recent_Evidence_From_Chinese_Companies_in_Resource-Based_Industries
- Zou, K., Hu, Y., & Wu, S. (2025). Can carbon emissions trading policies promote both the quantity and quality of urban green technological innovation? Evidence from China. *Sustainability*, 17(2). <https://doi.org/10.3390/su17020778>