



Prioritizing Energy Management Strategies in Steelmaking Furnaces with Emphasis on Environmental Considerations Using SWOT, Fuzzy AHP, and QSPM

Fatemeh Adim^{*1} , Saber Ghasemi² , Hassan Naslayeh¹

1. Department of Environmental Management, BA.C., Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

2. Department of Environment, Marine Environmental Research Center, BA.C., Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

Received: 2026/05/30

Accepted: 2026/08/02

Abstract

Background and Aim: The steel industry, as an energy-intensive sector, faces significant energy losses and increasing environmental requirements. This applied descriptive-analytical study prioritized energy management strategies for steelmaking furnaces using the SWOT matrix, fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), and quantitative strategic planning matrix (QSPM).

Methods: The study population consisted of 20 experts, including 10 specialists in steelmaking processes (thermodynamics and reduction) and 10 environmental specialists (pollution control and sustainable development), each with at least 12 years of professional experience in steel manufacturing companies located in the Persian Gulf Mining and Metal Industries Special Economic Zone. Following the identification of internal and external factors, seven key criteria, namely cost, efficiency, environmental compatibility, service life, implementation time, feasibility, and implementation risk, were selected for weighting.

Results: The results of the Fuzzy AHP analysis revealed that environmental compatibility, with a final weight of 0.387, was the most important decision-making criterion. Based on the interaction of internal and external factors in the SWOT matrix, a set of strategies was developed under the four categories of SO, ST, WO, and WT. The QSPM results indicated that aggressive (SO) strategies achieved the highest attractiveness scores, with SO2 (development of waste heat recovery technologies supported by governmental incentives) ranking first with a total attractiveness score of 6.42.

Conclusion: The findings indicate that this strategy has the highest priority for improving energy management and environmental performance in steelmaking furnaces and can serve as a practical decision-support tool for managers and policymakers in selecting appropriate energy management strategies.

Keywords: *Energy management, Environmental compatibility, Steel industry, Strategic planning*

Please cite this article as:

Adim F, Ghasemi S, Naslayeh H. Prioritizing Energy Management Strategies in Steelmaking Furnaces with Emphasis on Environmental Considerations Using SWOT, Fuzzy AHP, and QSPM. *Irtiqa Imini Pishgiri Masdumiyat*. 2025;13(4):5-20. <https://doi.org/10.22037/iipm.v13i4.52690>

* **Corresponding Author:** fatemeh.adim8068@iau.ir

اولویت‌بندی راهبردهای مدیریت انرژی با تأکید بر ملاحظات زیست‌محیطی در کوره‌های فولادسازی با استفاده از SWOT، AHP فازی و QSPM

فاطمه ادیم*^۱، صابر قاسمی^۲، حسن نسلاهی^۱

۱. گروه مدیریت محیط زیست، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران
۲. گروه محیط زیست، مرکز تحقیقات محیط زیست دریایی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹

چکیده

سابقه و هدف: صنعت فولاد، به‌عنوان صنعتی انرژی‌بر، با چالش‌های ائتلاف انرژی و الزامات زیست‌محیطی مواجه است. این پژوهش با رویکرد کاربردی و توصیفی-تحلیلی، راهبردهای مدیریت مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی را با استفاده از ماتریس SWOT، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و ماتریس برنامه‌ریزی استراتژیک کمی (QSPM) اولویت‌بندی کرد. **روش کار:** جامعه آماری شامل ۲۰ نفر از خبرگان، مشتمل بر ۱۰ متخصص فرآیند فولادسازی (ترمودینامیک و احیا) و ۱۰ متخصص حوزه محیط‌زیست (آلاینده‌ها و توسعه پایدار) با حداقل ۱۲ سال سابقه فعالیت در شرکت‌های فولادسازی منطقه ویژه اقتصادی صنایع معدنی و فلزی خلیج فارس بود. پس از شناسایی عوامل داخلی و خارجی، هفت معیار شامل هزینه، راندمان، سازگاری زیست‌محیطی، عمر مفید، زمان اجرا، قابلیت اجرا و ریسک اجرایی برای وزن‌دهی انتخاب شدند. **یافته‌ها:** نتایج تحلیل سلسله مراتب فازی نشان داد که معیار سازگاری زیست محیطی با وزن نهایی ۰/۳۸۷ بیشترین اهمیت را در میان معیارهای تصمیم‌گیری دارد. همچنین، بر اساس تقاطع عوامل داخلی و خارجی در ماتریس SWOT، مجموعه‌ای از راهبردها در چهار گروه ST، SO، WO و WT استخراج شد. نتایج ارزیابی راهبردها در ماتریس QSPM نشان داد که راهبردهای تهاجمی (SO) بالاترین امتیاز جذابیت را کسب کرده‌اند و راهبرد SO₂ (توسعه فناوری‌های بازیافت حرارت ائتلافی با بهره‌گیری از حمایت‌های دولتی) با امتیاز ۴۲/۶ در رتبه نخست قرار گرفته است.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که راهبرد مذکور از بالاترین اولویت برای بهبود مدیریت مصرف انرژی و ارتقای عملکرد زیست‌محیطی در کوره‌های فولادسازی برخوردار بوده و می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری مدیران و سیاست‌گذاران در انتخاب راهبردهای بهینه باشد. **واژگان کلیدی:** برنامه‌ریزی استراتژیک، سازگاری زیست‌محیطی، صنعت فولاد، مدیریت مصرف انرژی

به این مقاله، به صورت زیر استناد کنید:

ادیم ف، قاسمی ص، نسلاهی ح. اولویت‌بندی راهبردهای مدیریت انرژی با تأکید بر ملاحظات زیست‌محیطی در کوره‌های فولادسازی با استفاده از SWOT، AHP فازی و QSPM. ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها. ۱۴۰۴؛ ۱۳(۴): ۵-۲۰. <https://doi.org/10.22037/iipm.v13i4.52690>

*نویسنده مسئول مکاتبات: fatemeh.adim8068@iau.ir

مقدمه

صنعت فولاد به‌عنوان یکی از محرک‌های بنیادین توسعه صنعتی و اقتصادی به سبب ماهیت ترمودینامیکی فرآیندهای ذوب و احیا در زمره صنایع با مصرف انرژی بالا در سطح جهانی قرار دارد (۱). در دهه‌های اخیر نوسانات چشمگیر قیمت حامل‌های انرژی و تشدید الزامات زیست‌محیطی لزوم بازنگری در الگوهای مصرف انرژی این صنعت را بیش از پیش نمایان کرده است (۲). در این راستا، حرکت از الگوی خطی تولید به سمت رویکردهای مبتنی بر اقتصاد چرخشی به‌عنوان راهکاری برای بهبود پایداری زیست‌محیطی و حفظ رقابت‌پذیری در بازارهای جهانی مطرح شده است (۳).

بخش قابل توجهی از شدت مصرف انرژی در مجتمع‌های فولادسازی، ناشی از تلفات حرارتی گسترده در کوره‌های قوس الکتریکی است (۴). اگرچه این تجهیزات به دلیل قابلیت پذیرش قراضه فلزی نقش محوری در تولید ایفا می‌کنند، اما حجم قابل توجهی از انرژی ورودی آن‌ها از طریق گازهای خروجی تشعشعات دیواره‌ها و سیستم‌های خنک‌کاری از دست می‌رود. اتخاذ رویکردهای فنی نوین نظیر توسعه فناوری‌های بازیافت حرارت اتلافی، ضمن بازیابی انرژی هدررفته، به ارتقای بهره‌وری فرآیند ذوب و تعدیل محسوس اثرات نامطلوب زیست‌محیطی کمک شایانی می‌نماید (۵ و ۶).

با این وجود، تدوین و انتخاب راهکارهای بهینه برای کاهش مصرف انرژی، به دلیل تعدد معیارها، تعارض میان آن‌ها و وجود عدم قطعیت در قضاوت خبرگان، یک مسئله تصمیم‌گیری پیچیده است (۷ و ۸). تصمیم‌گیرندگان صنعتی برای تخصیص بهینه منابع، نیازمند ارزیابی سیستماتیک گزینه‌ها بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌ها هستند؛ از جمله هزینه، راندمان، سازگاری زیست‌محیطی، عمر مفید، زمان اجرا، قابلیت اجرا و ریسک اجرایی. از آنجا که این معیارها غالباً ماهیتی متعارض دارند و ارزیابی آن‌ها توسط خبرگان توأم با ابهامات شناختی و عدم قطعیت است. مدل‌های قطعی و کلاسیک تصمیم‌گیری از کارایی و دقت لازم جهت مدل‌سازی شرایط واقعی محیط‌های صنعتی برخوردار نیستند (۹ و ۱۰).

مرور سیستماتیک و تحلیلی مطالعات نشان می‌دهد که پژوهشگران تاکنون تمرکز خود را یا صرفاً بر ارزیابی فنی فناوری‌های کاهش مصرف انرژی، نظیر پیش‌گرم قراضه و بازیافت حرارت، معطوف کرده‌اند و یا در صورت بهره‌گیری از مدل‌های تصمیم‌گیری، از روش‌های قطعی با

معیارهای ارزیابی بسیار محدود استفاده کرده‌اند (۱۱ و ۱۲). آنچه در ادبیات تحقیق به‌طور مشخص مورد توجه قرار نگرفته، نبود یکپارچگی میان تحلیل‌های استراتژیک محیطی با مدل‌های وزن‌دهی در شرایط عدم قطعیت و ابزارهای کمی تخصیص استراتژی در بستر صنعت فولاد است. همچنین، عدم لحاظ هم‌زمان شاخص‌های حیاتی و چندوجهی نظیر سازگاری زیست‌محیطی، ریسک اجرایی، قابلیت اجرا و زمان اجرا در کنار معیارهای سنتی هزینه‌ای، خلأ قابل توجهی در پژوهش‌های پیشین محسوب می‌شود. از این‌رو، مطالعه حاضر با هدف پر کردن این شکاف ساختاری انجام شده است تا با درهم آمیختن رویکردهای Fuzzy AHP، SWOT و QSPM و با استفاده از یک مجموعه هفت‌گانه از معیارها، مدلی ریاضی، عینی و مقاوم در برابر عدم قطعیت قضاوت‌های انسانی برای اولویت‌بندی استراتژی‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی ارائه کند. به منظور غلبه بر این محدودیت‌های محاسباتی، یکپارچه‌سازی ابزارهای برنامه‌ریزی استراتژیک با تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ضرورت می‌یابد.

ابزار تحلیلی SWOT بستری ساختاریافته برای تبیین تعاملات میان قابلیت‌های درون سازمانی ارزیابی نقاط قوت و ضعف و تحولات محیط پیرامونی رصد فرصت‌ها و تهدیدها فراهم می‌آورد (۱۳ و ۱۴). با تلفیق این ماتریس و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی در بستر منطق فازی (Fuzzy AHP)، می‌توان عدم قطعیت‌های ذاتی در قضاوت‌های کیفی را به شکلی دقیق و ریاضی فرموله نمود. در نهایت، به‌کارگیری ماتریس برنامه‌ریزی استراتژیک کمی (Quantitative Strategic Planning Matrix) امکان ارزیابی عینی جذابیت استراتژی‌های تدوین‌شده را بر اساس میزان پاسخ‌گویی آن‌ها به عوامل کلیدی موفقیت میسر می‌سازد. تلاش‌های علمی جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت استراتژیک منابع در صنایع سنگین، طی سال‌های اخیر در دو جبهه ارتقای فنی و مدل‌سازی تصمیم‌گیری متمرکز شده است.

در حوزه تلفیق برنامه‌ریزی استراتژیک با مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) در بخش انرژی و محیط‌زیست، پژوهش‌های بین‌المللی گام‌های بنیادینی برداشته‌اند. با پیاده‌سازی یک متدولوژی یکپارچه مبتنی بر تحلیل SWOT و رویکردهای سلسله‌مراتبی و شبکه‌ای (Analytic Hierarchy Process/ANP)، به ارزیابی و اولویت‌بندی استراتژی‌های برنامه اقدام انرژی پایدار پرداختند و اثبات نمودند که ترکیب ابزارهای تحلیلی درون سازمانی با مدل‌های

کاربردی برای انتخاب راهبردهای بهینه مدیریت انرژی در صنعت فولاد فراهم می‌کند. بدین ترتیب، این پژوهش بخشی از خلأ موجود در زمینه ارائه یک مدل جامع، عملیاتی و مقاوم برای اولویت‌بندی استراتژی‌های کاهش مصرف انرژی را پوشش می‌دهد.

روش کار

محدوده مطالعاتی

این پژوهش در منطقه ویژه اقتصادی صنایع فلزی معدنی خلیج فارس در حدود ۱۳ کیلومتری شهر بندرعباس انجام شده است (شکل ۱). این مجموعه یکی از قطب‌های مهم تولید کننده فولاد کشور محسوب می‌شود و شامل مجموعه‌ای از واحدهای بزرگ فولادسازی از جمله شرکت فولاد هرمزگان، شرکت صبا فولاد خلیج فارس، شرکت فولاد کاوه جنوب کیش، شرکت فولاد مادکوش است. داده‌های مورد نیاز این تحقیق از طریق پرسشنامه خبرگان و با مشارکت متخصصان حوزه فولادسازی و محیط زیست شاغل در این واحدهای صنعتی جمع‌آوری گردیده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس و جانمایی شرکت‌های فولادی مورد مطالعه.

پژوهش حاضر از نظر هدف و خروجی یک تحقیق کاربردی و از حیث روش اجرا در زمره مطالعات توصیفی-تحلیلی قرار می‌گیرد. فرآیند اجرای این مطالعه بر مبنای ترکیبی یکپارچه از مدل سازی استراتژیک محیطی و رویکردهای تصمیم‌گیری چند معیاره در شرایط عدم قطعیت استوار است. برای گردآوری داده‌های بنیادین و انجام ارزیابی‌های تخصصی، از یک گروه خبرگان متشکل از ۲۰ نفر از متخصصان حوزه فولادسازی استفاده گردید. به منظور حفظ تعادل در ابعاد فنی و زیست‌محیطی ارزیابی‌ها، این گروه به‌صورت هدفمند شامل

وزن‌دهی، پایداری تصمیمات کلان را به‌شدت افزایش می‌دهد (۱۵). در همین راستا با توسعه یک چارچوب ترکیبی SWOT-AHP و MCDM راهبردهای مدیریت هوشمند توان و انرژی را ارزیابی کرده و کارایی بالای این مدل را در شناسایی عوامل کلیدی موفقیت و تخصیص بهینه منابع در محیط‌های پیچیده نشان دادند.

از منظر مدیریت آلاینده‌ها و چالش‌های اکولوژیک جاهدی و همکاران (۱۶) مدل ترکیبی SWOT-AHP را جهت تدوین استراتژی‌های نوین کنترل محیطی در اهواز به کار گرفتند و استدلال نمودند که وزن‌دهی کمی به عوامل استراتژیک، قابلیت اجرایی برنامه‌های کنترلی را در سناریوهای واقعی ارتقا می‌بخشد. ذوالقدر و همکاران (۱۷) نیز با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری نظیر تاپسیس راهکارهای بهبود مصرف انرژی در فولاد آلیاژی را شناسایی نموده و استراتژی کنترل دمای کوره پیش‌گرم را در اولویت برنامه‌های اجرایی قرار دادند.

برآیند مرور پیشینه نشان داد که علی‌رغم انجام مطالعات متعدد در حوزه بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاربردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره هنوز یک چارچوب یکپارچه شامل تحلیل محیطی SWOT وزن‌دهی فازی AHP و اولویت‌بندی کمی QSPM برای انتخاب استراتژی‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی ارائه نشده است. در این پژوهش از SWOT برای شناسایی عوامل محیطی، از Fuzzy AHP برای مدیریت عدم قطعیت در وزن‌دهی و از QSPM برای اولویت‌بندی استراتژی‌ها استفاده شده است. هدف از انجام این تحقیق اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی با استفاده از روش Fuzzy AHP و SWOT است.

وجه تمایز این پژوهش با مطالعات پیشین در ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری یکپارچه مبتنی بر تلفیق SWOT، Fuzzy AHP و QSPM برای اولویت‌بندی راهبردهای کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی است. در حالی که اغلب پژوهش‌های گذشته بر ارزیابی فنی فناوری‌های کاهش مصرف انرژی یا به‌کارگیری مستقل روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تمرکز داشته‌اند، در این مطالعه علاوه بر شناسایی هم‌زمان عوامل داخلی و خارجی، هفت معیار کلیدی شامل هزینه، راندمان، سازگاری زیست‌محیطی، عمر مفید، زمان اجرا، قابلیت اجرا و ریسک اجرایی به‌صورت هم‌زمان در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شده‌اند. همچنین استفاده از منطق فازی موجب کاهش اثر عدم قطعیت در قضاوت خبرگان شده و نتایج حاصل، مبنایی

رویکرد پژوهش

در فاز نخست ارزیابی، عوامل مؤثر بر کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی در قالب چارچوب ساختاریافته SWOT از طریق فهرست‌برداری و نهایی کردن عوامل داخلی (قوت‌ها و ضعف‌ها) و عوامل خارجی (فرصت‌ها و تهدیدات) شناسایی و طبقه‌بندی گردیدند. سپس فهرست توسط خبرگان براساس مقیاس چهار درجه‌ای ۱ (کم اهمیت) تا ۴ (اهمیت کلیدی) امتیازدهی شدند. در مرحله بعد به منظور سنجش و وزن‌دهی به این عوامل و استراتژی‌های مستخرج از آن‌ها مجموعه‌ای از معیارهای ارزیابی تدوین شد. این معیارها شامل ۷ شاخص کلیدی هزینه، راندمان، سازگاری زیست‌محیطی، عمر مفید، زمان اجرا، قابلیت اجرا و ریسک اجرایی می‌باشند.

انتخاب این معیارها بر اساس مرور مطالعات پیشین، ویژگی‌های فنی فرآیند فولادسازی و نظر خبرگان انجام شد. هزینه بیانگر میزان سرمایه‌گذاری و هزینه‌های اجرایی مورد نیاز برای پیاده‌سازی هر راهبرد است. راندمان میزان اثربخشی راهکار در کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری فرآیند را نشان می‌دهد. سازگاری زیست‌محیطی به دلیل الزامات قانونی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و حرکت به سوی توسعه پایدار در صنایع فولاد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عمر مفید نشان‌دهنده پایداری و دوام راهکار در بلندمدت بوده و بر هزینه‌های نگهداری و جایگزینی تأثیر می‌گذارد. زمان اجرا مدت مورد نیاز برای استقرار عملی هر راهبرد را مشخص می‌کند که در تصمیم‌گیری مدیران اهمیت دارد. قابلیت اجرا بیانگر امکان پیاده‌سازی راهکار با توجه به زیرساخت‌های موجود، منابع انسانی و شرایط عملیاتی کارخانه است. همچنین ریسک اجرایی احتمال بروز مشکلات فنی، اقتصادی یا مدیریتی در هنگام اجرای هر استراتژی را منعکس می‌کند. در نظر گرفتن هم زمان این معیارها موجب شد ارزیابی استراتژی‌ها تنها بر مبنای یک شاخص انجام نشود و ابعاد اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی به صورت جامع در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شوند.

فرآیند استخراج اوزان اهمیت هر یک از این معیارها و عوامل، با توزیع پرسشنامه‌های مقایسات زوجی در میان خبرگان و بهره‌گیری از تکنیک Fuzzy AHP انجام پذیرفت تا ابهامات ذاتی در قضاوت‌های کلامی جبران گردد و در نهایت، به منظور تعیین میزان جذابیت نسبی استراتژی‌ها و اولویت‌بندی نهایی آن‌ها از ماتریس ارزیابی کمی استفاده شد. به منظور اطمینان از روایی محتوایی ابزار گردآوری داده‌ها،

۱۰ نفر متخصص فرآیند فولادسازی (با تسلط بر ترمودینامیک کوره‌ها) و ۱۰ نفر متخصص محیط زیست (با تمرکز بر آلاینده‌های صنعتی و توسعه پایدار) انتخاب شدند و داده‌های تحقیق از طریق پرسشنامه جمع‌آوری شد.

لازم به ذکر است انتخاب خبرگان به روش نمونه‌گیری هدفمند و بر اساس معیارهای از پیش تعیین‌شده انجام شد. این معیارها شامل حداقل ۱۰ سال سابقه فعالیت تخصصی در صنایع فولاد، تجربه اجرایی یا مدیریتی در حوزه بهره‌وری انرژی یا مدیریت زیست‌محیطی، مشارکت در پروژه‌های مرتبط با بهینه‌سازی مصرف انرژی، آشنایی با فرآیندهای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی راهبردی در صنایع فولاد و همچنین دارا بودن حداقل مدرک کارشناسی ارشد در رشته‌های مرتبط بود. علاوه بر این، خبرگان باید سابقه مشارکت در تصمیم‌گیری‌های فنی یا مدیریتی مرتبط با بهره‌برداری، نگهداری یا بهبود عملکرد کوره‌های فولادسازی را نیز داشته باشند تا اعتبار علمی و اجرایی قضاوت‌های ارائه‌شده تضمین شود. همچنین با توجه به ماهیت تصمیم‌گیری چندمعیاره این پژوهش، ملاک اصلی در انتخاب خبرگان، برخورداری از دانش تخصصی و تجربه عملی مرتبط با مدیریت انرژی و فرآیندهای فولادسازی بود، نه صرفاً تعداد افراد. از این رو، انتخاب ۲۰ خبره واجد شرایط با رعایت معیارهای ورود، برای دستیابی به قضاوت‌های معتبر و پایدار کافی تشخیص داده شد. همچنین با توجه به تمرکز پژوهش بر مجتمع‌های فولادسازی منطقه ویژه صنایع معدنی و فلزی خلیج فارس، خبرگان از همین حوزه انتخاب شدند تا ارزیابی‌ها متناسب با شرایط واقعی محیط مطالعه انجام شود. جدول ۱ تعداد و نوع پرسشنامه تحقیق توزیع شده برای اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. تعداد و نوع پرسشنامه تحقیق توزیع شده برای اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی

هدف	تعداد پرسشنامه برگشتی	نوع پرسشنامه	مرحله تحقیق
شناسایی عوامل داخلی و خارجی	۲۰	پرسشنامه باز	شناسایی عوامل SWOT
تعیین وزن معیارها	۲۰	پرسشنامه مقایسات زوجی AHP	وزن‌دهی معیارها
تعیین امتیاز جذابیت	۲۰	پرسشنامه امتیازدهی QSPM	ارزیابی استراتژی‌ها

در ادامه، مقادیر فازی با استفاده از روش مرکز سطح غیرفازی‌سازی و اوزان نهایی معیارها استخراج شد. اوزان حاصل به‌عنوان ضرایب اهمیت معیارها در تشکیل ماتریس برنامه‌ریزی استراتژیک کمی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، از آنجا که پرسشنامه‌های مقایسات زوجی مبتنی بر قضاوت تخصصی خبرگان هستند، استفاده از شاخص‌هایی مانند آلفای کرونباخ برای سنجش پایایی آن‌ها موضوعیت ندارد؛ از این رو قابلیت اعتماد نتایج از طریق بررسی نرخ ناسازگاری مقایسات زوجی ($CR=0.051$) و تجمیع نظام‌مند قضاوت‌های خبرگان ارزیابی شد. در این روش قضاوت‌های زبانی خبرگان به اعداد فازی مثلثی به‌صورت رابطه ۲ تبدیل شدند.

$$M = (l, m, u) \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن l حد پایین، m مقدار محتمل، u حد بالای عدد فازی است. پس از تشکیل ماتریس مقایسات زوجی، مراحل تحلیل بر اساس روش توسعه یافته چانگ انجام شد. گام اول: مقدار توسعه‌یافته فازی (Fuzzy Synthetic Extent) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن M_{g_i} نشان‌دهنده اعداد فازی مثلثاتی است. گام دوم: پس از به‌دست آوردن مقادیر S_i باید میزان بزرگی این مقادیر نسبت به یکدیگر سنجیده شود. درجه بزرگی (Degree of possibility) اعداد فازی از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{if } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه ۴}$$

گام سوم: محاسبه وزن غیرنرمال (دی‌فازی‌سازی): برای محاسبه وزن هر معیار، کمترین درجه بزرگی آن نسبت به سایر معیارها در نظر گرفته شد (رابطه ۵):

$$d'(A_i) = \min V(S_i > S_k) \quad \text{رابطه ۵}$$

برای $k \neq i$ و $k = 1, 2, \dots, n$ این مقادیر نشان‌دهنده وزن قطعی اما غیرنرمال) معیارها هستند.

پرسشنامه‌های پژوهش پس از طراحی در اختیار تعدادی از خبرگان حوزه فولادسازی، مدیریت انرژی و محیط زیست قرار گرفت و بر اساس دیدگاه‌های اصلاحی آن‌ها از نظر شفافیت، تناسب و جامعیت سؤالات بازنگری و نهایی شد. از آنجا که پرسشنامه‌های مقایسات زوجی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی مبتنی بر قضاوت تخصصی خبرگان هستند، ارزیابی پایایی آن‌ها بر اساس شاخص‌هایی نظیر آلفای کرونباخ موضوعیت ندارد. در این پژوهش، برای اطمینان از قابلیت اعتماد نتایج، نرخ ناسازگاری مقایسات زوجی ($CR=0.051$) بررسی شد و همچنین به منظور کاهش اختلاف نظر میان خبرگان، از میانگین هندسی برای تجمیع قضاوت‌های آن‌ها استفاده گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

روش SWOT: به منظور شناسایی عوامل مؤثر بر کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی، از چارچوب تحلیلی SWOT استفاده شد. این روش امکان تحلیل هم‌زمان عوامل داخلی شامل نقاط قوت و ضعف و عوامل خارجی شامل فرصت‌ها و تهدیدها را فراهم می‌سازد. در این مرحله، عوامل مؤثر ابتدا از طریق بررسی ادبیات پژوهش و نظرات خبرگان استخراج شدند و سپس در قالب ماتریس‌های ارزیابی عوامل داخلی و خارجی طبقه‌بندی گردیدند. امتیاز نهایی هر عامل بر اساس رابطه ۱ محاسبه شد.

$$TAS = \text{Weight} \times AS \quad \text{رابطه ۱}$$

روش Fuzzy AHP: به منظور وزن‌دهی معیارها و کاهش اثر عدم قطعیت در قضاوت‌های انسانی، از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده شد. در این پژوهش، برای بیان قضاوت‌های خبرگان از اعداد فازی مثلثی استفاده شد؛ زیرا این نوع اعداد به دلیل سادگی محاسبات، توانایی مناسب در مدل‌سازی عدم قطعیت و کاربرد گسترده در مطالعات تصمیم‌گیری چندمعیاره، یکی از متداول‌ترین رویکردها محسوب می‌شود. به منظور تأمین روایی محتوایی، پرسشنامه‌های مقایسات زوجی پیش از توزیع، توسط تعدادی از خبرگان حوزه فولادسازی، مدیریت انرژی و محیط زیست بررسی و پس از اعمال اصلاحات لازم از نظر شفافیت، تناسب و جامعیت نهایی شدند. سپس ماتریس‌های مقایسات زوجی فازی هر یک از ۲۰ خبره تشکیل و برای دستیابی به یک ماتریس واحد، دیدگاه‌های خبرگان با استفاده از میانگین هندسی تجمیع گردید.

با بهره‌گیری از فرصت‌ها در پی کاهش نقاط ضعف هستند. استراتژی‌های WT با هدف کاهش هم زمان ضعف‌ها و تهدیدها تدوین می‌شوند. سپس استراتژی‌های نهایی شامل ST1، SO2، WO1 و WT1 استخراج شدند.

ماتریس برنامه‌ریزی کمی (QSPM)

به منظور اولویت‌بندی نهایی استراتژی‌ها، از ماتریس برنامه‌ریزی استراتژیک کمی استفاده شد. در این روش، جذابیت هر استراتژی بر اساس وزن عوامل و امتیاز جذابیت (AS) ارزیابی گردید. نمره جذابیت کل از رابطه ۸ محاسبه شد و در نهایت، مجموع نمرات جذابیت کل مبنای رتبه‌بندی نهایی استراتژی‌ها قرار گرفت.

$$TAS = Weight \times AS \quad \text{رابطه ۸}$$

تحلیل حساسیت

به منظور ارزیابی پایداری مدل تصمیم‌گیری، تحلیل حساسیت بر روی معیارهای کلیدی انجام شد. در این مرحله، اوزان معیارها در سناریوهای مختلف به میزان $\pm 20\%$ درصد تغییر داده شد و اثر این تغییرات بر رتبه‌بندی نهایی استراتژی‌ها در ماتریس QSPM بررسی گردید. نتایج تحلیل حساسیت نشان دادند که استراتژی SO2 در تمامی سناریوها رتبه نخست خود را حفظ کرده است که بیانگر پایداری و استحکام مدل تصمیم‌گیری پیشنهادی است (جدول ۳).

گام چهارم: نرمال‌سازی اوزان: در نهایت، با نرمال‌سازی مقادیر به‌دست آمده در گام قبل، بردار اوزان نهایی (W) که مجموع آن‌ها برابر با یک است، استخراج شد (رابطه ۶).

$$W = (d(A1), d(A2), \dots, d(An)) \quad \text{رابطه ۶}$$

گام پنجم محاسبه نرخ ناسازگاری: برای اطمینان از منطقی‌بودن قضاوت‌های مقایسات زوجی شاخص سازگاری و نرخ سازگاری محاسبه شد (رابطه ۷).

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad \text{رابطه ۷}$$

استخراج استراتژی‌های SWOT

در این مرحله با پایش دقیق محیط داخلی و خارجی مجتمع‌های فولادی منطقه، مهم‌ترین مؤلفه‌های اثرگذار بر مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی استخراج شدند. این عوامل که پایه‌های تدوین استراتژی را تشکیل می‌دهند، در جدول ۲ ارائه شده‌اند. بر اساس تقاطع عوامل داخلی و خارجی، استراتژی‌های چهارگانه تدوین شدند. فرآیند استخراج راهبردها بر مبنای منطق ماتریس رویارویی انجام گرفت، به‌گونه‌ای که: استراتژی‌های SO بر بهره‌برداری از فرصت‌ها با تکیه بر نقاط قوت تمرکز دارند. استراتژی‌های ST برای مقابله با تهدیدها از ظرفیت‌های داخلی استفاده می‌کنند. استراتژی‌های WO

جدول ۲. عوامل SWOT برای اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی

عوامل داخلی	عوامل خارجی
نقاط قوت (S): S1: قابلیت بالای تجهیزات برای نصب سیستم‌های بازیافت حرارت S2: دسترسی به زیرساخت‌های یکپارچه انرژی در منطقه ویژه S3: استفاده از قراضه فلزی که نیاز به انرژی احیا را می‌کاهد	فرصت‌ها (O): O1: حمایت‌های دولتی از طرح‌های اقتصاد چرخشی و بهینه‌سازی O2: پیشرفت فناوری‌های کم‌کربن در مقیاس جهانی O3: دسترسی به آب‌های آزاد برای صادرات محصولات فولاد سبز
نقاط ضعف (W): W1: مصرف به‌شدت بالای انرژی الکتریکی در کوره‌های قوس W2: اتلاف حرارتی بالا به دلیل فرسودگی تدریجی تجهیزات نسوز W3: فقدان سیستم یکپارچه مانیتورینگ و کنترل هوشمند فرآیند	تهدیدها (T): T1: افزایش تصاعدی تعرفه حامل‌های انرژی (برق و گاز) T2: وضع قوانین و جرایم سخت‌گیرانه زیست‌محیطی T3: محدودیت‌های ارزی و تحریم‌ها برای تامین تجهیزات نوین

جدول ۳. جدول تغییر رتبه‌ها بر اساس تحلیل حساسیت یکپارچه (AHP به QSPM)

سناریو اعمال‌شده (دامنه تغییر $\pm 20\%$)	رتبه اول	رتبه دوم	رتبه سوم	رتبه چهارم	وضعیت پایداری مدل
وضعیت پایه (نمرات فعلی)	SO2	ST1	WO1	WT1	مدل در حالت تعادل پایه قرار دارد.
افزایش ۲۰٪ وزن سازگاری زیست‌محیطی	SO2	ST1	WO1	WT1	پایداری مطلق استراتژی اول در شرایط سخت‌گیرانه محیطی
کاهش ۲۰٪ وزن سازگاری زیست‌محیطی	SO2	WO1	ST1	WT1	حفظ رتبه اول؛ ارتقای جایگاه استراتژی هوشمندسازی (WO1)
افزایش ۲۰٪ وزن راندمان	SO2	ST1	WO1	WT1	پایداری رتبه‌بندی در صورت تمرکز بر ظرفیت تولید
افزایش ۲۰٪ وزن هزینه	SO2	ST1	WT1	WO1	پایداری رتبه اول؛ افت استراتژی‌های پرهزینه هوشمندسازی

یافته‌ها

تحقیق حاضر در راستای ارزیابی و اولویت‌بندی استراتژی‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی با استفاده از یک رویکرد تصمیم‌گیری ترکیبی شامل ماتریس SWOT، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی و ماتریس برنامه‌ریزی استراتژیک کمی است. تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از پرسشنامه‌ها نشان داد که در این عوامل فرصت، تهدید، نقاط قوت و ضعف، که در جدول‌های ۴ و ۵ وزن‌های مربوطه قابل مشاهده است.

بررسی عوامل خارجی و داخلی نشان داد که بالاترین تهدید حاضر، افزایش تصاعدی تعرفه حامل‌های انرژی (برق و گاز) است با وزن (۰/۲۲) می‌باشد و بالاترین نقطه ضعف، فقدان سیستم یکپارچه

مانیتورینگ و کنترل هوشمند فرآیند با وزن (۰/۱۵) جدول‌های مربوطه در ادامه آورده شده است.

جهت تحلیل کمی عوامل داخلی و خارجی، ماتریس‌های ارزیابی ارائه شده است. برای هر عامل وزنی بین ۰ (بی‌اهمیت) تا ۱ (بسیار مهم) و امتیازی بین ۱ (ضعف اساسی/تهدید اساسی) تا ۴ (قوت بسیار عالی/فرصت بسیار عالی) بر اساس خرد جمعی خبرگان تخصیص یافت. تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از پرسشنامه‌ها نشان داد که در میان عوامل داخلی، قابلیت بالای تجهیزات برای نصب سیستم‌های بازیافت حرارت به‌عنوان مهم‌ترین نقطه قوت با نمره نهایی (۰/۶) و فقدان سیستم یکپارچه مانیتورینگ و کنترل هوشمند فرآیند به عنوان مهم‌ترین نقطه ضعف با نمره نهایی (۰/۳) شناسایی شدند (جدول ۴).

جدول ۴. ماتریس ارزیابی عوامل داخلی (IFE) برای اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی

کد	عوامل استراتژیک داخلی	وزن	امتیاز نمره نهایی	توضیحات و توجیه علمی
نقاط قوت (S)				
S1	قابلیت بالای تجهیزات برای نصب سیستم‌های بازیافت حرارت	۰/۱۵	۴	ظرفیت فیزیکی کوره‌ها برای نصب مبدل‌ها بالا است
S2	دسترسی به زیرساخت‌های یکپارچه انرژی در منطقه ویژه	۰/۱۴	۴	قرارگیری در سایت متمرکز صنعتی
S3	استفاده از قراضه فلزی که نیاز به انرژی احیا را می‌کاهد	۰/۱۸	۳	کاهش نیاز به احیای مستقیم سنگ آهن
نقاط ضعف (W)				
W1	مصرف به شدت بالای انرژی الکتریکی در کوره‌های قوس	۰/۲۰	۱	راندمان پایین ذوب در سیستم‌های قدیمی
W2	اتلاف حرارتی بالا به دلیل فرسودگی تدریجی تجهیزات نسوز	۰/۱۸	۱	نیاز به تعویض مداوم نسوزها و هدررفت انرژی
W3	فقدان سیستم یکپارچه مانیتورینگ و کنترل هوشمند فرآیند	۰/۱۵	۲	کنترل‌های دستی و خطای اپراتوری
-	جمع کل ماتریس عوامل داخلی (IFE)	۱/۰۰	-	نشان دهنده غلبه نسبی نقاط ضعف بر قوت‌ها در وضع موجود

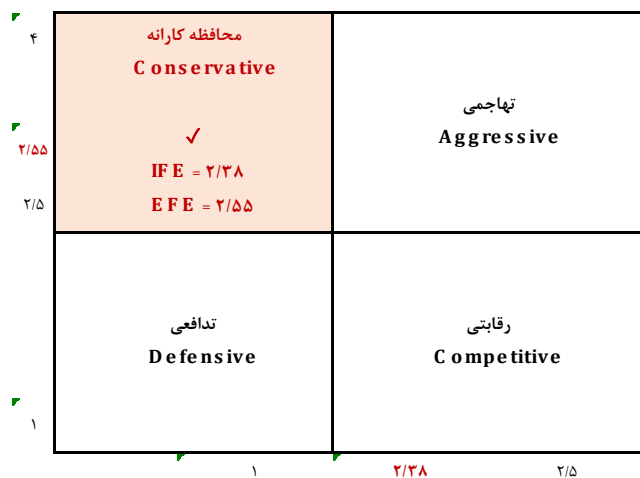
تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از پرسشنامه‌ها نشان داد که در میان عوامل خارجی، مهم‌ترین فرصت حمایت‌های دولتی از طرح‌های اقتصاد چرخشی و بهینه‌سازی با نمره نهایی (۰/۷۲) و افزایش تصاعدی تعرفه حامل‌های انرژی (برق و گاز) با نمره نهایی (۰/۴۴)

به‌عنوان مهم‌ترین تهدید شناسایی شدند. همچنین نتایج تحلیل نشان داد که عامل سازگاری زیست‌محیطی با وزن ۰/۳۸۷ بیشترین اهمیت را در فرایند اولویت‌بندی داشته است. جزئیات کامل عوامل خارجی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. ماتریس ارزیابی عوامل خارجی (EFE) برای اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی

ردیف	عوامل استراتژیک خارجی	وزن	امتیاز نمره نهایی	توضیحات و توجیه علمی
فرصت‌ها (O)				
۱	O1: حمایت‌های دولتی از طرح‌های اقتصاد چرخشی و بهینه‌سازی	۰/۱۸	۴	وجود مشوق‌های مالیاتی برای صنایع سبز
۲	O2: پیشرفت فناوری‌های کم‌کربن در مقیاس جهانی	۰/۱۶	۳	ورود تکنولوژی‌های جدید بازیافت حرارت
۳	O3: دسترسی به آب‌های آزاد برای صادرات محصولات فولاد سبز	۰/۱۴	۳	مزیت ترانزیتی منطقه ویژه خلیج فارس
تهدیدها (T)				
۴	T1: افزایش تصاعدی تعرفه حامل‌های انرژی (برق و گاز)	۰/۲۲	۲	سیاست‌های حذف پارانه‌های انرژی صنعتی
۵	T2: وضع قوانین و جرایم سخت‌گیرانه زیست‌محیطی	۰/۱۹	۲	فشارهای اداره محیط زیست بر واحدهای آلاینده
۶	T3: محدودیت‌های ارزی و تحریم‌ها برای تأمین تجهیزات نوین	۰/۱۱	۱	چالش در واردات سنسورها و نسوزهای پیشرفته
-	جمع کل ماتریس عوامل خارجی (EFE)	۱/۰۰	-	نشان دهنده توانایی نسبی در بهره‌گیری از فرصت‌ها

گردید که ماتریس کلان آن در جدول ۶ قابل مشاهده است. داده‌های این جدول حاصل تجميع نظرات خبرگان با استفاده از میانگین هندسی است. اعداد به صورت (Lower, Medium, Upper) ارائه شده اند که بیانگر کمترین حد، محتمل‌ترین حد و بیشترین حد قضاوت فازی می‌باشند.



شکل ۲. موقعیت کنونی وضعیت مدیریت تعارضات (ماتریس داخلی- خارجی). بر اساس نمره مکتسبه عوامل داخلی (۲/۳۸) و نمره مکتسبه عوامل خارجی (۲/۵۵) موقعیت در ناحیه محافظه‌کارانه قرار می‌گیرد.

شکل ۲ موقعیت کنونی وضعیت مدیریت تعارضات (ماتریس داخلی- خارجی) را برای تدوین استراتژی‌ها جهت اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی نشان می‌دهد.

رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی

جهت وزن‌دهی به ۷ معیار کلیدی تصمیم‌گیری از جمله هزینه، راندمان، سازگاری زیست‌محیطی، عمر مفید، زمان اجرا، قابلیت اجرا، ریسک اجرایی از مقایسات زوجی فازی استفاده شد. به منظور تشکیل ماتریس نهایی مقایسات زوجی، ابتدا پرسشنامه‌های تکمیل‌شده توسط ۲۰ خبره به صورت جداگانه دریافت و ماتریس‌های مقایسات زوجی فازی هر یک استخراج شد.

سپس برای تجميع قضاوت‌های خبرگان، از میانگین هندسی عناصر متناظر هر ماتریس استفاده گردید تا یک ماتریس مقایسات زوجی فازی تجميع‌شده حاصل شود. این روش به دلیل حفظ ویژگی‌های قضاوت‌های فازی و کاهش اثر اختلاف نظر میان خبرگان، یکی از روش‌های متداول در مطالعات مبتنی بر AHP فازی محسوب می‌شود و مبنای محاسبه اوزان نهایی معیارها در این پژوهش قرار گرفت. در نهایت، قضاوت‌های خبرگان با استفاده از اعداد فازی مثلثی تجميع

جدول ۶. ماتریس کامل مقایسات زوجی فازی معیارها (تلفیق نظرات خبرگان) برای اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی

معیارها	سازگاری زیست‌محیطی	راندمان	هزینه	قابلیت اجرا	ریسک اجرایی	عمر مفید	زمان اجرا
سازگاری زیست‌محیطی	(۱, ۱, ۱)	(۳, ۲, ۱)	(۴, ۳, ۲)	(۵, ۴, ۳)	(۶, ۵, ۴)	(۷, ۶, ۵)	(۹, ۸, ۷)
راندمان	(۱, ۰/۵, ۰/۳۳)	(۱, ۱, ۱)	(۳, ۲, ۱)	(۴, ۳, ۲)	(۵, ۴, ۳)	(۶, ۵, ۴)	(۷, ۶, ۵)
هزینه	(۰/۵, ۰/۳۳, ۰/۲۵)	(۱, ۰/۵, ۰/۳۳)	(۱, ۱, ۱)	(۳, ۲, ۱)	(۴, ۳, ۲)	(۵, ۴, ۳)	(۶, ۵, ۴)
قابلیت اجرا	(۰/۳۳, ۰/۲۵, ۰/۲۰)	(۰/۵, ۰/۳۳, ۰/۲۵)	(۱, ۰/۵, ۰/۳۳)	(۱, ۱, ۱)	(۳, ۲, ۱)	(۴, ۳, ۲)	(۵, ۴, ۳)
ریسک اجرایی	(۰/۲۵, ۰/۲۰, ۰/۱۶)	(۰/۳۳, ۰/۲۵, ۰/۲۰)	(۰/۵, ۰/۳۳, ۰/۲۵)	(۱, ۰/۵, ۰/۳۳)	(۱, ۱, ۱)	(۳, ۲, ۱)	(۴, ۳, ۲)
عمر مفید	(۰/۲۰, ۰/۱۶, ۰/۱۴)	(۰/۲۵, ۰/۲۰, ۰/۱۶)	(۰/۳۳, ۰/۲۵, ۰/۲۰)	(۰/۵, ۰/۳۳, ۰/۲۵)	(۱, ۰/۵, ۰/۳۳)	(۱, ۱, ۱)	(۳, ۲, ۱)
زمان اجرا	(۰/۱۴, ۰/۱۲, ۰/۱۱)	(۰/۲۰, ۰/۱۶, ۰/۱۴)	(۰/۲۵, ۰/۲۰, ۰/۱۶)	(۰/۳۳, ۰/۲۵, ۰/۲۰)	(۰/۵, ۰/۳۳, ۰/۲۵)	(۱, ۰/۵, ۰/۳۳)	(۱, ۱, ۱)

جدول ۷. وزن معیارها برای الویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی

رتبه	معیار تصمیم‌گیری	وزن نهایی
۱	سازگاری زیست‌محیطی	۰/۳۸۷
۲	راندمان	۰/۲۱۳
۳	هزینه	۰/۱۴۵
۴	قابلیت اجرا	۰/۱۰۵
۵	ریسک اجرایی	۰/۰۷۵
۶	عمر مفید	۰/۰۴۵
۷	زمان اجرا	۰/۰۳۰
-	مجموع	۱

مراحل محاسبات و دی‌فازی‌سازی

پس از تشکیل ماتریس با استفاده از روش توسعه‌یافته چانگ (Chang's Extent Analysis)، مقادیر فازی به اعداد قطعی (Crisp) تبدیل و سپس نرمال‌سازی شدند. نتایج وزن نهایی معیارها در جدول ۷ ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود معیار سازگاری زیست‌محیطی با کسب وزن ۰/۳۸۷ بیشترین درجه اهمیت را از منظر خبرگان به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده فشارهای قانونی و اهمیت توسعه پایدار در صنعت فولاد است.

محاسبه نرخ ناسازگاری

برای اطمینان از منطقی بودن قضاوت‌های مقایسات زوجی شاخص سازگاری (CI) و نرخ سازگاری (CR) محاسبه گردید. با توجه به ابعاد ماتریس ($n=7$) مقدار شاخص تصادفی (RI) برابر $1/32$ در نظر گرفته شد. مراحل محاسبه بر اساس بزرگترین مقدار ویژه ماتریس (λ_{max}) (7.41) به شرح زیر است (روابط ۹ و ۱۰). جدول ۸ نرخ ناسازگاری برای اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی را نشان می‌دهد.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.068}{1.32} = 0.051 \quad \text{رابطه ۹}$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{\frac{n-1}{7.41-7}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$CI = \frac{7.41 - 7}{7 - 1} = 0.068$$

جدول ۸. نرخ ناسازگاری برای اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی

پارامتر	مقدار محاسبه شده	حد مجاز	وضعیت ارزیابی
بزرگترین مقدار ویژه	۷/۴۱	-	-
شاخص سازگاری	۰/۰۶۸	-	-
نرخ ناسازگاری	۰/۰۵۱	CR<0/1	سازگار و قابل قبول

تحلیل حساسیت در محیط Expert Choice

به منظور سنجش پایداری مدل در برابر تغییرات احتمالی در قضاوت‌های تصمیم‌گیرندگان و ارزیابی تأثیر نوسانات اوزان بر

رتبه‌بندی نهایی بخش تحلیل حساسیت با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice (نسخه ۱۱) اجرا گردید. در این نرم‌افزار از ابزارهای Dynamic Sensitivity و Performance Sensitivity برای مدل‌سازی تغییرات استفاده شد. نحوه اجرای تحلیل حساسیت بدین صورت است که وزن معیار غالب در این پژوهش، سازگاری زیست‌محیطی به صورت دینامیک به میزان ۲۰٪ افزایش و سپس ۲۰٪ کاهش یافت تا تغییرات در جذابیت استراتژی‌های جایگزین رصد شود.

مفهوم این نتایج آن است که اگر دیدگاه مدیریت کلان نسبت به قوانین زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تر یا منعطف‌تر شود آیا استراتژی برتر تغییر خواهد کرد یا خیر. به منظور سنجش پایداری مدل و ارزیابی تأثیر نوسانات قضاوت تصمیم‌گیرندگان بر رتبه‌بندی نهایی، تحلیل حساسیت به صورت یکپارچه و در دو مرحله متوالی انجام پذیرفت تا اثر تغییر اوزان معیارها به طور کامل روی ماتریس نهایی ارزیابی استراتژی‌ها (QSPM) بررسی گردد. ابتدا با استفاده از ابزار Dynamic Sensitivity در نرم‌افزار Expert Choice نسخه ۱۱ اوزان پایه‌ای تمامی معیارهای اصلی (از جمله سازگاری زیست‌محیطی، راندمان و هزینه) با یک دامنه تغییر نوسان مشخص ۲۰٪± مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج تحلیل یکپارچه حساسیت جدول ۹ به وضوح اثبات می‌نماید که استراتژی SO2 (بازیافت حرارت اتلافی) تحت پوشش تمامی نوسانات ارزیابی و تغییرات وزنی معیارهای اصلی، پایداری ساختاری خود را حفظ کرده و همچنان در رتبه نخست جذابیت سرمایه‌گذاری در ماتریس QSPM باقی می‌ماند.

جدول ۹. ماتریس برنامه‌ریزی استراتژیک کمی برای ارزیابی تمامی استراتژی‌ها

عوامل کلیدی موفقیت	وزن عامل	استراتژی SO2	استراتژی ST1	استراتژی WO1	استراتژی WT1
		AS TAS	AS TAS	AS TAS	AS TAS
S1: ظرفیت نصب تجهیزات	۰/۱۵	۴ ۰/۶	۲ ۰/۳	۲ ۰/۳	۱ ۰/۱۵
قوت‌ها S2: دسترسی به زیرساخت‌ها	۰/۱۴	۳ ۰/۴۲	۴ ۰/۵۶	۳ ۰/۴۲	۲ ۰/۲۸
S3: استفاده از قراضه فلزی	۰/۱۸	۲ ۰/۳۶	۲ ۰/۳۶	۲ ۰/۳۶	۲ ۰/۳۶
W1: مصرف بالای انرژی	۰/۲۰	۴ ۰/۸	۳ ۰/۶	۴ ۰/۸	۲ ۰/۴
ضعف‌ها W2: اتلاف حرارتی نسوزها	۰/۱۸	۲ ۰/۳۶	۴ ۰/۷۲	۱ ۰/۱۸	۳ ۰/۵۴
W3: فقدان مانیتورینگ هوشمند	۰/۱۵	۴ ۰/۶	۲ ۰/۳	۴ ۰/۶	۳ ۰/۵۴
O1: حمایت‌های دولتی	۰/۱۸	۴ ۰/۷۲	۳ ۰/۵۴	۲ ۰/۳۶	۲ ۰/۳۶
فرصت‌ها O2: فناوری‌های کم‌کربن جهانی	۰/۱۶	۴ ۰/۶۴	۲ ۰/۳۲	۴ ۰/۶۴	۲ ۰/۳۲
O3: دسترسی به آب‌های آزاد	۰/۱۴	۲ ۰/۲۸	۱ ۰/۱۴	۱ ۰/۱۴	۱ ۰/۱۴
T1: افزایش تعرفه انرژی	۰/۲۲	۳ ۰/۶۶	۴ ۰/۸۸	۳ ۰/۶۶	۲ ۰/۴۴
تهدیدها T2: قوانین زیست‌محیطی	۰/۱۹	۴ ۰/۷۶	۴ ۰/۷۶	۳ ۰/۵۷	۴ ۰/۷۶
T3: تحریم‌ها و محدودیت ارزی	۰/۱۱	۲ ۰/۲۲	۳ ۰/۳۳	۱ ۰/۱۱	۴ ۰/۴۴
مجموع نمره جذابیت کل	۱/۰۰	TAS(T) = ۶/۴۲ -	TAS(T) = ۵/۸۱ -	TAS(T) = ۵/۱۴ -	TAS(T) = ۴/۶۴ -

ماتریس برنامه‌ریزی استراتژیک کمی (QSPM) و رتبه‌بندی

نهایی

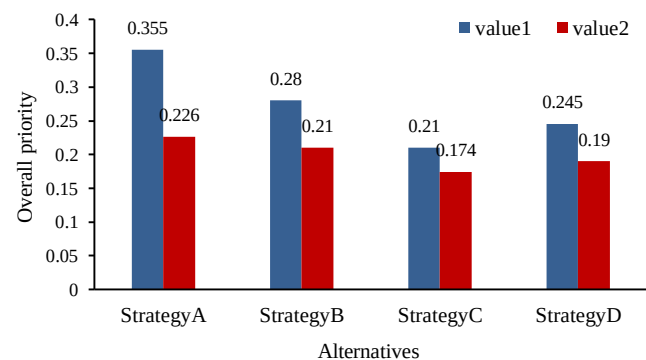
در گام نهایی، با استفاده از ماتریس QSPM، جذابیت استراتژی‌های منتخب در تقاطع با عوامل داخلی و خارجی (S, W, O, T) ارزیابی شد. امتیاز جذابیت از ۱ تا ۴ تعیین گردید و با ضرب در وزن عوامل، نمره جذابیت کل استخراج شد (جدول ۹). با محاسبه نمرات جذابیت برای تمامی استراتژی‌ها، رتبه‌بندی نهایی به‌دست آمد که در جدول ۱۰ منعکس شده است.

جدول ۱۰. رتبه‌بندی نهایی برای اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی

رتبه	کد	عنوان استراتژی	امتیاز نهایی
۱	SO2	توسعه فناوری‌های بازیافت حرارت اتلافی با بهره از حمایت‌های دولتی	۶/۴۲
۲	ST1	ارتقای کیفیت مواد نسوز جهت کاهش اتلاف حرارتی	۵/۸۱
۳	WO1	هوشمندسازی سیستم‌های کنترل کوره با استفاده از فناوری‌های نوین	۵/۱۴
۴	WT1	پیاده‌سازی برنامه‌های تعمیرات پیشگیرانه	۴/۶۵

بحث

ارزیابی خروجی‌های حاصل از مدل تصمیم‌گیری یکپارچه در این مطالعه نمایانگر اهمیت فزاینده ملاحظات زیست‌محیطی در تصمیم‌گیری استراتژیک مجتمع‌های فولادسازی است. تحلیل اوزان استخراج‌شده از الگوریتم AHP فازی دلالت بر آن دارد که شاخص سازگاری زیست‌محیطی با کسب وزن قطعی ۰/۳۸۷ در صدر معیارهای تصمیم‌گیری قرار گرفته است. نتایج استخراج شده از مدل AHP فازی نشان‌دهنده برتری معیار سازگاری زیست‌محیطی است. برای اطمینان از صحت این اوزان، تحلیل حساسیت دینامیک انجام شد (شکل ۳).



شکل ۳. تحلیل حساسیت دینامیک شاخص‌های تصمیم‌گیری.

نمودار تحلیل حساسیت دینامیک نشان می‌دهد که رتبه‌بندی معیارها نسبت به تغییرات حساسیت پایدار بوده و معیار زیست‌محیطی با فاصله معناداری نسبت به سایر گزینه‌ها نقشی تعیین‌کننده در انتخاب استراتژی‌های نهایی ایفا می‌کند.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که رتبه نخست راهبرد SO2 در برابر تغییرات محدود وزن معیارهای تصمیم‌گیری پایدار باقی می‌ماند. این پایداری را می‌توان به ماهیت چند بعدی این راهبرد و هم‌راستایی آن با مهم‌ترین معیارهای مؤثر در مدل نسبت داد. راهبرد SO2 (توسعه فناوری‌های بازیافت حرارت اتلافی با بهره‌گیری از حمایت‌های دولتی) به‌طور هم‌زمان ظرفیت پاسخگویی به الزامات زیست‌محیطی، بهبود بهره‌وری انرژی و استفاده از فرصت‌های سیاستی و حمایتی را داراست؛ ازاین‌رو، تغییر وزن یک یا چند معیار به‌تنهایی نتوانسته است برتری آن را نسبت به سایر گزینه‌ها تغییر دهد. در مقابل، برخی راهبردهای دیگر وابستگی بیشتری به یک یا چند معیار مشخص دارند؛ به‌عنوان مثال، راهبردهای مبتنی بر هوشمندسازی یا اصلاحات فیزیکی تجهیزات، اگرچه از ظرفیت بالایی برای بهبود عملکرد فرآیند برخوردارند، اما موفقیت آن‌ها به وجود زیرساخت‌های فنی، داده‌های عملیاتی و شرایط اجرایی خاص وابسته است. بنابراین، تغییر در اهمیت این عوامل می‌تواند بر جایگاه نسبی آن‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری اثرگذار باشد. بر اساس نتایج ماتریس QSPM، راهبرد SO2 با کسب بالاترین امتیاز جذابیت کل (۴۲/۶) به‌عنوان اولویت نخست انتخاب شد. تحلیل دقیق این نتیجه نشان می‌دهد که برتری این راهبرد صرفاً حاصل محاسبات کمی نیست، بلکه با ویژگی‌های فنی و مدیریتی صنعت فولاد نیز سازگاری دارد. از یک سو، وجود منابع قابل توجه حرارت اتلافی در فرآیندهای ذوب و امکان نصب سامانه‌های بازیافت انرژی، یک ظرفیت داخلی مهم برای اجرای این راهبرد محسوب می‌شود و از سوی دیگر، افزایش حمایت‌های دولتی از طرح‌های مرتبط با کاهش انتشار کربن و توسعه رویکردهای اقتصاد چرخشی، شرایط محیطی مناسبی را برای اجرای آن فراهم می‌کند.

همچنین با توجه به اینکه معیار سازگاری زیست‌محیطی با وزن ۰/۳۸۷ و راندمان انرژی با وزن ۰/۲۱۳ از مهم‌ترین معیارهای مدل AHP فازی بودند، راهبردهایی که به صورت مستقیم موجب کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌شوند، از مزیت بیشتری در فرآیند اولویت‌بندی برخوردار شده‌اند. این اولویت‌بندی را می‌توان در چارچوب

فناوری‌های مبتنی بر داده می‌توانند نقش مؤثری در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کنترل نوسانات فرآیند داشته باشند، اما بهره‌گیری کامل از این قابلیت‌ها مستلزم دسترسی به داده‌های دقیق عملیاتی، تجهیزات اندازه‌گیری مناسب، زیرساخت‌های ارتباطی و آمادگی سازمانی است. بنابراین، در شرایطی که هنوز برخی محدودیت‌های فیزیکی و فرآیندی در کوره‌ها وجود دارد، سرمایه‌گذاری اولیه در راهکارهای هوشمندسازی ممکن است در مقایسه با راهبردهایی که مستقیماً به کاهش اتلاف انرژی منجر می‌شوند، اولویت پایین‌تری داشته باشد. این یافته با نتایج میچوس و همکاران (۲۱)؛ سان و یو (۲۲) همخوانی دارد؛ زیرا این مطالعات نیز تأکید کرده‌اند که موفقیت فناوری‌های هوشمند در صنایع انرژی‌بر وابسته به فراهم‌شدن بسترهای فنی و مدیریتی مناسب است.

همچنین، رتبه پایین‌تر راهبردهای مبتنی بر هوشمندسازی را می‌توان با پیچیدگی فرآیندهای دیجیتالی‌سازی در صنایع تولیدی تبیین کرد. اجرای الگوریتم‌های هوشمند و سامانه‌های پیشرفته کنترل فرآیند، علاوه بر تجهیزات نرم‌افزاری، نیازمند اصلاح فرآیندهای عملیاتی، آموزش نیروی انسانی و یکپارچگی داده‌های تولید است لوترا و منگلا (۲۳) نیز به موانع اجرایی و سازمانی موجود در مسیر استقرار فناوری‌های پیشرفته در صنایع مختلف اشاره کرده‌اند. از این‌رو، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در شرایط فعلی، توسعه فناوری‌های هوشمند باید به‌عنوان یک راهبرد مکمل در کنار اقدامات بنیادی‌تر مانند کاهش تلفات حرارتی و افزایش بهره‌وری انرژی مورد توجه قرار گیرد، نه جایگزینی برای آن‌ها.

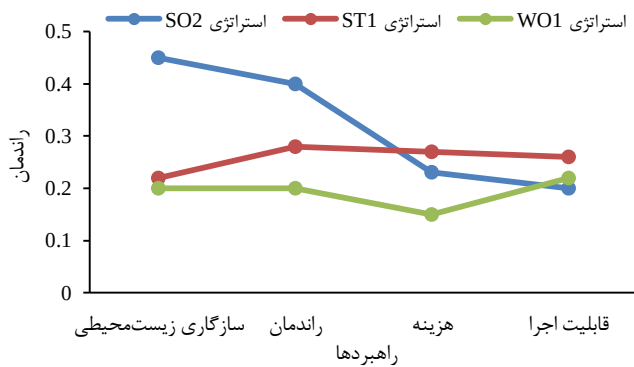
در مجموع، نتایج اولویت‌بندی نشان می‌دهد که موفق‌ترین راهبردها در مدیریت انرژی کوره‌های فولادسازی، راهکارهایی هستند که علاوه بر امکان اجرای عملی، تأثیر مستقیم بر کاهش مصرف انرژی و پیامدهای زیست‌محیطی دارند. این موضوع با یافته‌های تیان و همکاران (۲۴)؛ ژانگ و همکاران (۲۵)، کبیر و همکاران (۲۶) هم‌راستا است؛ زیرا این مطالعات نیز بر نقش برنامه‌های اقدام انرژی پایدار، مدیریت بهینه انرژی و راهکارهای کاهش تلفات در افزایش عملکرد صنایع انرژی‌بر تأکید کرده‌اند.

مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه بسیاری از تحقیقات گذشته بر اهمیت فناوری‌های بهینه‌سازی انرژی، بازیافت حرارت و سیستم‌های مدیریت هوشمند تأکید

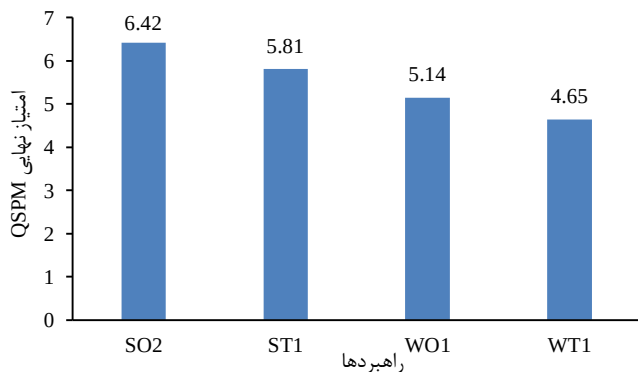
چالش‌های جهانی مرتبط با تغییرات اقلیمی و ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنایع انرژی بر تفسیر کرد. صنایع فولاد به دلیل مصرف بالای انرژی و انتشار قابل توجه CO_2 ، تحت فشار فزاینده‌ای برای بهبود عملکرد زیست‌محیطی و حرکت به سمت فناوری‌های کم‌کربن قرار دارند.

در این راستا، فان و همکاران (۱۸) نیز بر نقش راهبردهای کاهش انتشار کربن و افزایش بهره‌وری انرژی در صنایع سنگین تأکید کرده‌اند. همچنین، برتری معیارهای زیست‌محیطی نسبت به شاخص‌های صرفاً اقتصادی با یافته‌های ژائو و همکاران (۱۹) هم‌خوانی دارد که بر ضرورت تغییر رویکردهای مدیریتی صنایع انرژی‌بر به سمت پایش و بهره‌برداری از فرصت‌های کاهش آلاینده‌ها تأکید کرده‌اند. تخصیص وزن بالاتر به عوامل زیست‌محیطی در این پژوهش همچنین با نتایج جاهدی و همکاران در زمینه کاربرد رویکردهای ترکیبی-SWOT AHP برای ارزیابی کمی عوامل محیطی و نیز با یافته‌های نامی و همکاران (۲۰) درباره کارایی روش‌های وزن‌دهی فازی در شرایط عدم قطعیت هم‌راستا است (۱۶ و ۲۰).

در مقایسه میان گزینه‌های راهبردی، قرارگیری راهبرد ST1 (ارتقای کیفیت مواد نسوز جهت کاهش اتلاف حرارتی) در رتبه دوم با امتیاز ۵/۸۱ نشان می‌دهد که اصلاحات مستقیم در ساختار فیزیکی کوره همچنان یکی از اقدامات مؤثر برای کنترل تلفات انرژی محسوب می‌شود. کاهش انتقال حرارت از دیواره‌ها و بهبود عملکرد مواد نسوز می‌تواند نقش مهمی در افزایش راندمان حرارتی کوره‌های قوس الکتریکی داشته باشد؛ موضوعی که با پیشنهاد‌های هرناندز و همکاران (۵) در زمینه کاهش گلوگاه‌های اصلی اتلاف حرارت در فرآیند ذوب مطابقت دارد. با این حال، فاصله امتیازی این راهبرد با SO_2 بیانگر آن است که اگرچه بهبود عایق‌کاری و کاهش تلفات حرارتی یک اقدام ضروری است، اما در مقایسه با بازیافت حرارت اتلافی، ظرفیت کمتری برای ایجاد هم‌زمان ارزش اقتصادی، کاهش مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی دارد. راهبرد WO1 (هوشمندسازی سیستم‌های کنترل کوره) با امتیاز ۵/۱۴ در رتبه سوم قرار گرفت. این نتیجه به معنای پایین‌بودن اهمیت فناوری‌های دیجیتال در صنعت فولاد نیست، بلکه نشان‌دهنده آن است که اثربخشی این رویکرد در شرایط فعلی واحدهای مورد مطالعه به وجود پیش‌نیازهای فنی و زیرساختی وابسته است. سیستم‌های کنترل هوشمند، الگوریتم‌های پیش‌بینی و



شکل ۴. تحلیل حساسیت عملکردی استراتژی‌های منتخب



شکل ۵. اولویت‌بندی نهایی استراتژی‌های منتخب بر اساس امتیاز جذابیت کل برای کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی.

همان‌طور که داده‌های جدول نشان می‌دهد، استراتژی SO2 با کسب امتیاز ۶/۴۲ به‌عنوان جذاب‌ترین و اثربخش‌ترین رویکرد جهت کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی منطقه ویژه خلیج فارس انتخاب گردید. برتری استراتژی توسعه فناوری‌های بازیافت حرارت اتلافی با بهره‌گیری از حمایت‌های دولتی (SO2) تنها به دلیل کسب امتیاز بالاتر در مدل تصمیم‌گیری نیست، بلکه از منظر مدیریتی و اجرایی نیز مزیت‌های قابل توجهی دارد. اجرای این راهبرد موجب کاهش هم‌زمان مصرف انرژی، هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌شود و با سیاست‌های کلان توسعه پایدار و افزایش بهره‌وری انرژی نیز همسو است. علاوه بر این، بهره‌گیری از حمایت‌های دولتی می‌تواند بخشی از هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری را جبران کرده و ریسک اجرای پروژه را کاهش دهد. از این‌رو، این استراتژی نسبت به سایر گزینه‌ها از قابلیت اجرایی بیشتر، بازده اقتصادی مناسب‌تر و امکان پیاده‌سازی مؤثرتر در مجتمع‌های فولادسازی برخوردار است. تحلیل نمرات جذابیت در ماتریس QSPM نشان می‌دهد که دلیل اصلی فاصله معنادار امتیاز استراتژی SO2 (۶/۴۲) نسبت به سایر گزینه‌ها، همگرایی و هم‌افزایی بالای این استراتژی با نقاط قوت داخلی

داشته‌اند، تفاوت اصلی این مطالعه در ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری یکپارچه برای انتخاب راهبرد مناسب است. در این پژوهش، علاوه بر بررسی ویژگی‌های فنی گزینه‌ها، عوامل داخلی و خارجی مؤثر بر تصمیم‌گیری از طریق تحلیل SWOT شناسایی و سپس با استفاده از AHP فاز و QSPM اولویت‌بندی شده‌اند. این رویکرد موجب شده است انتخاب راهبرد نهایی صرفاً بر مبنای عملکرد فنی یا اقتصادی انجام نشود، بلکه مجموعه‌ای از ملاحظات زیست‌محیطی، مدیریتی، اجرایی و سیاستی نیز در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شود.

در نهایت، تحلیل حساسیت و مقایسه عملکرد گزینه‌ها نشان داد که راهبرد SO2 به دلیل برخورداری از تعادل میان مزایای فنی، زیست‌محیطی و قابلیت اجرایی، از استحکام بیشتری نسبت به سایر گزینه‌ها برخوردار است. این نتیجه بیانگر آن است که در صنایع فولادی، به‌ویژه در شرایط افزایش الزامات کاهش انتشار کربن، انتخاب راهبردهای مدیریت انرژی باید فراتر از تمرکز بر یک فناوری خاص انجام شده و بر راهکارهایی مبتنی باشد که امکان ایجاد هم‌زمان صرفه‌جویی انرژی، کاهش آلاینده‌ها و سازگاری با سیاست‌های توسعه پایدار را فراهم می‌کنند (شکل ۴).

یافته‌های این پژوهش از منظر مدیریتی نشان داد که مدیران مجتمع‌های فولادسازی می‌توانند با اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بازیافت حرارت اتلافی و بهبود زیرساخت‌های حرارتی، اثربخشی بیشتری در کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی به‌دست آورند. همچنین، نتایج بیانگر آن است که اجرای راهکارهای هوشمندسازی زمانی بیشترین کارایی را خواهد داشت که ابتدا زیرساخت‌های فیزیکی و حرارتی فرآیند تولید بهبود یافته باشد. از سوی دیگر، این یافته‌ها می‌تواند برای سیاست‌گذاران حوزه انرژی و محیط‌زیست نیز مفید باشد؛ به‌گونه‌ای که طراحی مشوق‌های مالی، حمایت از توسعه فناوری‌های بازیافت انرژی و تقویت الزامات بهره‌وری انرژی، زمینه اجرای موفق‌تر این راهبردها را در صنعت فولاد فراهم خواهد کرد. جایگزینی فناوری‌های پرمصرف با سیستم‌های کم‌کربن در کارخانجات فولادسازی می‌تواند مستلزم تقدم اجرای استراتژی‌های فیزیکی-حرارتی نظیر ST1 و SO2 بر استراتژی‌های صرفاً داده محور باشد و در نهایت، خروجی کمی ارزیابی استراتژی‌ها در ماتریس QSPM که اولویت‌بندی نهایی گزینه‌ها را بر اساس امتیاز جذابیت کل نشان می‌دهد، در شکل ۵ ارائه شده است.

کاهش مصرف انرژی در کوره‌های فولادسازی فراهم می‌کند. بر اساس نتایج، معیار سازگاری زیست‌محیطی مهم‌ترین عامل تصمیم‌گیری شناخته شد و استراتژی توسعه فناوری‌های بازیافت حرارت اتلاfi با بهره‌گیری از حمایت‌های دولتی (SO2) به‌عنوان مناسب‌ترین راهبرد انتخاب گردید. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان داد که این اولویت بندی در برابر تغییرات اوزان معیارها از پایداری مناسبی برخوردار است که بیانگر استحکام و قابلیت اعتماد مدل پیشنهادی در شرایط مختلف تصمیم‌گیری است. از منظر کاربردی، یافته‌های پژوهش می‌تواند به مدیران صنایع فولاد در اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌های مرتبط با بهینه‌سازی مصرف انرژی و به سیاست‌گذاران در طراحی مشوق‌های حمایتی و تدوین سیاست‌های ارتقای بهره‌وری انرژی کمک کند. با این حال، وابستگی بخشی از فرآیند ارزیابی به قضاوت خبرگان و محدود بودن دامنه مطالعه به مجتمع‌های فولادسازی منطقه ویژه خلیج فارس، از مهم‌ترین محدودیت‌های پژوهش به شمار می‌رود. از آنجا که این پژوهش بر اولویت بندی راهبردها بر پایه قضاوت خبرگان استوار بوده و شامل ارزیابی کمی عملکرد راهبردها پس از اجرا نیست، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، اثربخشی راهبردهای منتخب با استفاده از داده‌های واقعی مصرف انرژی، اجرای آزمایشی در واحدهای صنعتی و یا تحلیل هزینه-فایده مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، در پژوهش‌های آینده، مدل ارائه شده در سایر مجتمع‌های فولادسازی و صنایع انرژی بر مانند سیمان، پتروشیمی و آلومینیوم نیز ارزیابی شود و با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مقایسه گردد. افزون بر این، بررسی کاربرد فناوری‌های نوین مبتنی بر هوش مصنوعی و داده‌کاوی در اولویت بندی راهبردهای مدیریت انرژی می‌تواند مسیر مناسبی برای توسعه مطالعات آینده باشد.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچگونه تضاد یا تعارض منافی ندارند.

منابع مالی

بدین وسیله اعلام می‌شود مقاله تحت حمایت مالی هیچ سازمانی نبوده است.

نقش نویسندگان

ایده و طراحی مطالعه: فاطمه ادیم، صابر قاسمی؛ جمع‌آوری داده‌ها: فاطمه ادیم، حسن نسلاfi؛ تحلیل و تفسیر داده‌ها: فاطمه ادیم، صابر

تجهیزات و فرصت‌های حمایت دولتی است. در واقع، وزن بالای معیار سازگاری زیست‌محیطی (0/387) که در بخش مقایسات فازی به‌دست آمد، مستقیماً نمرات جذابیت این استراتژی ته‌اجمی را در مواجهه با قوانین سخت‌گیرانه زیست‌محیطی (تهدید T2) به حداکثر رسانده است.

از سوی دیگر قرارگیری استراتژی رقابتی ST1 (ارتقای کیفیت نسوزها) در رتبه دوم نمایانگر این حقیقت تحلیلی است که پیش از اجرای هرگونه اتوماسیون و سیستم‌های مبتنی بر نرم‌افزار استراتژی WO1 که در رتبه سوم قرار گرفت. مجتمع‌های فولادی نیازمند اصلاح زیرساخت‌های ترمودینامیکی و فیزیکی کوره‌های خود هستند تا بتوانند اثرات ناشی از افزایش تعرفه حامل‌های انرژی را مهار کنند. این انسجام میان وزن‌دهی فازی معیارها و امتیازدهی در ماتریس QSPM منطق تخصیص منابع را از حالت ذهنی خارج کرده و می‌تواند چارچوبی تحلیلی برای تصمیم‌گیری در صنعت فولاد فراهم کند.

اگرچه این پژوهش در مجتمع‌های فولادسازی منطقه ویژه صنایع معدنی و فلزی خلیج فارس انجام شده است، اما چارچوب تصمیم‌گیری ارائه‌شده به دلیل اتکا بر روش‌های استاندارد SWOT، AHP فازی و QSPM و استفاده از معیارهای عمومی مدیریت انرژی، قابلیت به‌کارگیری در سایر مجتمع‌های فولادسازی با شرایط عملیاتی مشابه را نیز دارد. همچنین، با انجام تعدیل در معیارها و متناسب‌سازی عوامل داخلی و خارجی، می‌توان از این مدل برای اولویت‌بندی راهبردهای مدیریت انرژی در سایر صنایع انرژی‌بر مانند سیمان، پتروشیمی و آلومینیوم نیز استفاده کرد. با این حال، تفاوت در شرایط فنی، فناوری‌های مورد استفاده و سیاست‌های مدیریتی هر صنعت ایجاب می‌کند که پیش از تعمیم نتایج، مدل متناسب با ویژگی‌های هر سازمان بومی‌سازی و اعتبارسنجی شود. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به وابستگی بخشی از فرآیند وزن‌دهی و اولویت‌بندی به قضاوت خبرگان، محدود بودن دامنه بررسی به برخی واحدهای فولادسازی و عدم امکان ارزیابی همه فناوری‌های بالقوه کاهش مصرف انرژی اشاره کرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری مدل تلفیقی SWOT، AHP فازی و QSPM چارچوبی کارآمد برای اولویت‌بندی راهبردهای

استفاده از هوش مصنوعی

بدین وسیله اعلام می‌شود در تدوین مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

قاسمی؛ نگارش پیش‌نویس مقاله: فاطمه ادیم؛ بازبینی انتقادی مقاله از نظر محتوای علمی: صابر قاسمی؛ تجزیه و تحلیل آماری: فاطمه ادیم؛ نظارت بر مطالعه: فاطمه ادیم، حسن نسلايه.

References

- Holappa L. A general vision for reduction of energy consumption and CO₂ emissions from the steel industry. *Metals*. 2020;10(9):1117. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
- Gajdzik B, Wolniak R, Grebski, WW. Electricity and heat demand in steel industry technological processes in Industry 4.0 conditions. *Energies*. 2023;16(2):787. <https://doi.org/10.3390/en16020787>
- Conejo AN, Birat JP, Dutta AA. Review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. *Journal of Environmental Management*. 2020;259:109782. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109782>
- He K, Wang L, Li X. Review of the energy consumption and production structure of China's steel industry: current situation and future development. *Metals*. 2020;10(3):302. <https://doi.org/10.3390/met10030302>
- Hernandez JD, Onofri L, Engell S. Modeling and energy efficiency analysis of the steelmaking process in an electric arc furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022;53(6):3413-3441. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02576-5>
- Kyriakopoulos GL. Should low carbon energy technologies be envisaged in the context of sustainable energy systems? In: *Low Carbon Energy Technologies in Sustainable Energy Systems*. Elsevier; 2021. p.357-389. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822897-5.00015-8>
- Oyedepo SO, Fakeye BA. Waste heat recovery technologies: Pathway to sustainable energy development. *Journal of Thermal Engineering*. 2021;7(1):324-348. <https://doi.org/10.18186/thermal.850796>
- Chen W, Huang Z, Chua KJ. Sustainable energy recovery from thermal processes: A review. *Energy, Sustainability and Society*. 2022;12(1):46. <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00372-2>
- Abujaber AA, Abd-Alrazaq A, Al-Qudimat AR, Nashwan AJ. A strengths, weaknesses, opportunities, and threats (SWOT) analysis of ChatGPT integration in nursing education: A narrative review. *Cureus*. 2023;15(11). <https://doi.org/10.7759/cureus.48643>
- Thuyen TTN. AHP-SWOT analysis of strengths, weaknesses, opportunities, and threats of implementing green innovation. *Thailand and the World Economy*. 2023;41(3):66-87. <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/TER/article/view/267624>
- Carlsson LS, Samuelsson PB, Jonsson PG. Modeling the effect of scrap on the electrical energy consumption of an electric arc furnace. *Processes*. 2020;8(9):1044. <https://doi.org/10.3390/pr8091044>
- Yontar E, Derse O. Evaluation of sustainable energy action plan strategies with a SWOT/TWOS-based AHP-ANP approach: A case study. *Environment, Development and Sustainability*. 2023;25(6):5691-5715. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02804-7>
- Aghajani H, Safaei B, Basooli A. Identification and prioritization of energy consumption improvement strategies in the industry using multi-criteria decision-making techniques (Case study: Iran Alloy Steel). *Operations Research and Its Applications*. 2013;10(2):1-21. (In Persian). <http://jamlu.lahijan.iau.ir/article-1-607-en.html>
- Bohra SS, Anvari-Moghaddam A. A comprehensive review on applications of multicriteria decision-making methods in power and energy systems. *International Journal of Energy Research*. 2022;46(4):4088-4118. <https://doi.org/10.1002/er.7517>
- Wen Y, Wan Z, Zhou M, Hou S, Cao Z, Le C. On realization of intelligent decision-making in the real world: A foundation decision model perspective. 2022; ArXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.12669>
- Jahedi F, Jaafarzadeh Haghighi FN, Lahijanazadeh A, Khaksar E, Kaabi H, Rostami S, Shenavar B, Karimi S. Dynamic evaluation of air pollution in Ahvaz: Source apportionment, SWOT-AHP analysis, and innovative control strategies. *Journal of Environmental Law and Policy*. 2026;6(1):3616. <https://doi.org/10.54517/jelp3616>
- Zolqadr L, Shakhshi-Niaei M, Zare Mehrjerdid Y, Lotfi MM. A hybrid model for data-driven energy consumption forecasting in the steel industry: An approach based on LSTM and hyperparameter optimization with the Optuna algorithm. *Applied and Basic Machine Intelligence Research*. 2025;3(2):89-105. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/ABMIR.2025.23569.1157>
- Fan Z, Friedmann SJ. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. *Joule*. 2021;5(4):829-862. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>
- Gao CK, Na HM, Song K, Tian F, Strawa N, Du T. Technologies-based potential analysis on saving energy and water of China's iron and steel industry. *Science of the Total Environment*. 2020;699:134225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134225>
- Nami I, Zhamati E. Evaluation of energy management strategies in the steel industry using fuzzy multi-criteria decision-making methods. *Applied Research in Engineering*. 2023;31(4):1-11. (In Persian).

21. Mischos S, Dalagdi E, Vrakas D. Intelligent energy management systems: A review. *Artificial Intelligence Review*. 2023;56(10):11635-11674. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10441-3>
22. Sun L, You F. Machine learning and data-driven techniques for the control of smart power generation systems: An uncertainty handling perspective. *Engineering*. 2021;7(9):1239-1247. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.04.020>
23. Luthra S, Mangla SK. Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018;117:168-179. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.018>
24. Tian B, Wei G, Hu H, Zhu R, Bai H, Wang Z. Effects of fuel injection and energy efficiency on the production and environmental parameters of electric arc furnace-heat recovery systems. *Journal of Cleaner Production*. 2023;405:136909. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136909>
25. Zhang H, Wang H, Zhu X, Qiu YJ, Li K, Chen R, Liao Q. A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry. *Applied Energy*. 2013;112:956-966. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.019>
26. Kabir KH, Aurko SY, Rahman MS. Smart power management in OIC countries: A critical overview using SWOT-AHP and hybrid MCDM analysis. *Energies*. 2021;14(20):6480. <https://doi.org/10.3390/en14206480>