



Prioritization of Industrial Dust Pollution Mitigation Methods in the Steelmaking Industry Using the Integrated AHP–TOPSIS Model

Hasan Naslayeh^{*1} , Saber Ghasemi² , Hamidreza Asarpak¹, Fatemeh Edim¹

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: 2026/05/19

Accepted: 2026/07/20

Abstract

Background and Aim: Dust pollution is one of the most important environmental and health challenges in the steelmaking industry, which in addition to reducing the quality of the workplace air, has adverse consequences on employee health, the environment, production efficiency, and operating costs. Selecting the appropriate technology for dust control requires simultaneous evaluation of technical, economic, environmental, and administrative criteria; a matter that cannot be done well with single-criteria methods. The aim of this study was to prioritize methods for reducing industrial dust pollution in the steelmaking industry using the AHP-TOPSIS hybrid model.

Methods: In this study, first, the relative importance of decision-making criteria was determined using the analytic hierarchy process, and then different dust control options were ranked using the TOPSIS method. Also, in order to assess the stability of the results, a sensitivity analysis was performed by changing the weight of the main criteria.

Results: The results showed that dust removal efficiency was the most important decision-making criterion and bag filter was recognized as the most appropriate dust control technology; after that, local exhaust ventilation system and electrofilter were ranked next. The results of sensitivity analysis also showed that conventional changes in the weights of the criteria did not have a significant impact on the final ranking of the options, indicating the stability of the proposed model.

Conclusion: The findings of this study can provide a scientific and practical framework for selecting dust control technologies, improving environmental performance, improving occupational safety and health, and supporting decision-making of steel industry managers.

Keywords: Analytic hierarchy process, Bag filter, Dust pollution, Steel industry

Please cite this article as:

Naslayeh H, Ghasemi S, Asarpak H, Edim F. Prioritization of Industrial Dust Pollution Mitigation Methods in the Steelmaking Industry Using the Integrated AHP–TOPSIS Model. *Irtiqa Imini Pishgiri Masdumiyat*. 2025;13(3):49-60. <https://doi.org/10.22037/iipm.v13i3.52687>

* Corresponding Author: h.naslayeh@iau.ac.ir

اولویت‌بندی روش‌های کاهش آلودگی گردوغبار صنعتی در صنعت فولادسازی با استفاده از مدل

ترکیبی AHP-TOPSIS

حسن نسلايه^{۱*}، صابر قاسمی^۲، حمید رضا آثاریاک^۱، فاطمه ادیم^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: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴

چکیده

سابقه و هدف: آلودگی گردوغبار یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست محیطی و بهداشتی در صنعت فولادسازی است که علاوه بر کاهش کیفیت هوای محیط کار، پیامدهای نامطلوبی بر سلامت کارکنان، محیط‌زیست، بهره‌وری تولید و هزینه‌های عملیاتی دارد. انتخاب فناوری مناسب برای کنترل گردوغبار مستلزم ارزیابی همزمان معیارهای فنی، اقتصادی، زیست محیطی و اجرایی است؛ موضوعی که با روش‌های تک‌معیاره به‌خوبی قابل انجام نیست. هدف این پژوهش، اولویت‌بندی روش‌های کاهش آلودگی گردوغبار صنعتی در صنعت فولادسازی با استفاده از مدل ترکیبی AHP-TOPSIS بود.

روش کار: در این پژوهش، ابتدا اهمیت نسبی معیارهای تصمیم‌گیری با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی تعیین و سپس گزینه‌های مختلف کنترل گردوغبار با استفاده از روش TOPSIS رتبه‌بندی شدند. همچنین به‌منظور ارزیابی پایداری نتایج، تحلیل حساسیت با تغییر وزن معیارهای اصلی انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که راندمان حذف گردوغبار مهم‌ترین معیار تصمیم‌گیری بوده و بگ‌فیلتر مناسب‌ترین فناوری کنترل گردوغبار شناخته شد؛ پس از آن، سیستم مکش موضعی و الکتروفیلتر در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان داد که تغییرات متعارف در وزن معیارها تأثیر قابل‌توجهی بر رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها نداشته و بیانگر پایداری مدل پیشنهادی است.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش می‌تواند چارچوبی علمی و کاربردی برای انتخاب فناوری‌های کنترل گردوغبار، ارتقای عملکرد زیست‌محیطی، بهبود ایمنی و بهداشت شغلی و حمایت از تصمیم‌گیری مدیران صنعت فولاد فراهم آورد.

واژگان کلیدی: آلودگی گردوغبار، بگ فیلتر، صنعت فولادسازی، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی

به این مقاله، به صورت زیر استناد کنید:

نسلايه ح، قاسمی ص، آثاریاک ح، ادیم ف. اولویت‌بندی روش‌های کاهش آلودگی گردوغبار صنعتی در صنعت فولادسازی با استفاده از مدل ترکیبی AHP-TOPSIS. ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها. ۱۴۰۴؛ ۱۳(۳): ۶۰-۴۹. <https://doi.org/10.22037/iipm.v13i3.52687>

*نویسنده مسئول مکاتبات: h.naslayeh@iau.ac.ir

مقدمه

صنعت فولاد به‌عنوان یکی از صنایع راهبردی و زیربنایی، نقش اساسی در توسعه اقتصادی، صنعتی و زیرساختی کشورها ایفا می‌کند. با وجود اهمیت این صنعت، فرآیندهای مختلف تولید فولاد از جمله آماده‌سازی مواد اولیه، انتقال مواد، ذوب، ریخته‌گری، نورد و عملیات تکمیلی، با تولید مقادیر قابل توجهی گردوغبار و ذرات معلق همراه هستند که علاوه بر ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی، از مهم‌ترین عوامل زیان‌آور محیط کار نیز به شمار می‌روند (۱). کارکنان شاغل در واحدهای فولادسازی به‌طور مداوم در معرض ذرات قابل استنشاق حاوی سیلیس بلوری، اکسیدهای آهن، منگنز و سایر فلزات قرار دارند و مواجهه طولانی‌مدت با این آلاینده‌ها می‌تواند موجب بروز بیماری‌های شغلی نظیر سیلیکوزیس، پنوموکونیوز، برونشیت مزمن، بیماری انسدادی مزمن ریه، کاهش عملکرد ریوی و افزایش خطر ابتلا به سایر اختلالات تنفسی شود (۲).

بر اساس گزارش‌های سازمان جهانی بهداشت، سازمان بین‌المللی کار و مؤسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا، بیماری‌های ناشی از استنشاق گردوغبارهای معدنی و فلزی همچنان سهم قابل توجهی از بیماری‌های شغلی در صنایع سنگین را به خود اختصاص داده‌اند و کنترل مواجهه با این آلاینده‌ها یکی از اولویت‌های اصلی برنامه‌های ایمنی و بهداشت حرفه‌ای محسوب می‌شود (۳ و ۴). از این‌رو، مدیریت گردوغبار در صنعت فولاد تنها با هدف کاهش آلودگی محیط‌زیست انجام نمی‌شود، بلکه نقش اساسی در حفظ سلامت کارکنان، کاهش مواجهه شغلی و ارتقای عملکرد سیستم‌های ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست دارد (۵). در همین راستا، سازمان‌هایی نظیر مؤسسه ملی ایمنی و سلامت شغلی، سازمان ایمنی و بهداشت شغلی و انجمن بهداشت صنعتی آمریکا حدود مجاز مواجهه شغلی (حد تماس مجاز و حد آستانه مجاز) را برای آلاینده‌های هوابرد و ذرات قابل استنشاق تعیین کرده‌اند تا از بروز بیماری‌های شغلی پیشگیری شود (۶).

در ایران نیز حدود مجاز مواجهه شغلی با عوامل زیان‌آور محیط کار در آیین نامه‌ها و دستورالعمل‌های وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی و وزارت بهداشت مورد تأکید قرار گرفته است (۷). بر اساس اصل سلسله مراتب کنترل مخاطرات، کنترل‌های مهندسی مؤثرترین راهکار برای کاهش مواجهه کارکنان با آلاینده‌های هوابرد محسوب می‌شوند و استفاده از تجهیزات حفاظت فردی آخرین لایه حفاظتی در شرایطی

است که حذف یا کنترل کامل خطر امکان‌پذیر نباشد (۸). از این‌رو، فناوری‌هایی نظیر بگ‌فیلتر، الکتروفیلتر، سیستم‌های مکش موضعی و سایر سامانه‌های کنترل گردوغبار، علاوه بر کاهش انتشار آلاینده‌ها، نقش مهمی در کاهش مواجهه شغلی کارکنان و رعایت الزامات قانونی و استانداردهای ایمنی و بهداشت حرفه‌ای ایفا می‌کنند (۹ و ۱۰).

با وجود توسعه فناوری‌های مختلف کنترل گردوغبار، انتخاب مناسب‌ترین فناوری برای صنایع فولادی همواره یکی از چالش‌های مهم مدیران و متخصصان در حوزه ایمنی و بهداشت بوده است؛ زیرا هر یک از این فناوری‌ها از نظر راندمان حذف آلاینده، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری و نگهداری، مصرف انرژی، قابلیت اجرا، قابلیت اطمینان و میزان کاهش مواجهه کارکنان دارای مزایا و محدودیت‌های متفاوتی هستند (۱۱). از این‌رو، تصمیم‌گیری در این زمینه مستلزم ارزیابی هم‌زمان معیارهای متعدد فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، اجرایی و ایمنی و بهداشت شغلی است (۱۲).

در سال‌های اخیر، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌ویژه فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و تکنیک تاپسیس (TOPSIS) به‌طور گسترده در حوزه‌های مختلف مهندسی، مدیریت، محیط‌زیست و صنایع تولیدی برای اولویت‌بندی گزینه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند و کارآمدی آن‌ها در حل مسائل پیچیده تصمیم‌گیری به اثبات رسیده است (۱۳).

با این حال، بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه کنترل گردوغبار صنایع فولادی بر ارزیابی عملکرد فنی تجهیزات، کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی یا مقایسه محدود فناوری‌های موجود متمرکز بوده‌اند (۱۴ و ۱۵). همچنین اگرچه مدل ترکیبی AHP-TOPSIS در صنایع مختلف به‌کار گرفته شده است، اما در بسیاری از مطالعات، معیارهای مرتبط با ایمنی و بهداشت شغلی، کاهش مواجهه کارکنان با گردوغبار، انطباق با حدود مجاز مواجهه شغلی و الزامات نظام‌های مدیریت ایمنی، بهداشت و محیط زیست در کنار معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی به‌صورت یکپارچه در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ نشده‌اند (۱۶). علاوه بر این، ارتباط میان انتخاب فناوری کنترل گردوغبار و میزان حفاظت از سلامت کارکنان در شرایط واقعی صنعت فولاد کمتر به‌صورت نظام‌مند مورد بررسی قرار گرفته است (۱۷). بنابراین، خلأ اصلی پژوهش حاضر نه در استفاده از یک روش

تولید گردوغبار و فناوری‌های کنترل آلاینده‌ها، به‌عنوان خبرگان پژوهش انتخاب شدند.

در پژوهش‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره، کیفیت قضاوت خبرگان نسبت به حجم نمونه از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ بنابراین نمونه‌گیری به‌صورت هدفمند انجام شد و تعداد ۱۵ نفر از خبرگان واجد شرایط در پژوهش مشارکت کردند. معیارهای انتخاب خبرگان شامل حداقل پنج سال سابقه فعالیت در صنعت فولاد، داشتن تحصیلات دانشگاهی مرتبط، آشنایی با فناوری‌های کنترل آلودگی هوا و مشارکت در تصمیمات فنی یا مدیریتی مرتبط با کنترل گردوغبار بود. اطلاعات مورد نیاز پژوهش از دو روش کتابخانه‌ای و میدانی گردآوری شد. در بخش کتابخانه‌ای، منابع علمی شامل مقالات، کتاب‌ها، استانداردهای زیست‌محیطی، گزارش‌های تخصصی و مطالعات پیشین بررسی شدند تا معیارها و گزینه‌های تصمیم‌گیری استخراج شوند. به‌منظور انتخاب معیارهای تصمیم‌گیری، ابتدا مرور هدفمند و ساختاریافته‌ای بر مطالعات داخلی و خارجی مرتبط با فناوری‌های کنترل گردوغبار، تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدیریت آلاینده‌های صنایع فولادی انجام شد. در این مرحله، معیارهای پرتکرار استخراج و پس از حذف موارد مشابه، فهرست اولیه معیارها تهیه گردید. سپس این فهرست در اختیار خبرگان قرار گرفت و با بررسی میزان اهمیت، قابلیت اندازه‌گیری و تناسب هر معیار با شرایط صنعت فولاد، شش معیار نهایی شامل راندمان حذف گردوغبار، هزینه اجرا، هزینه نگهداری، سازگاری زیست‌محیطی، عمر مفید تجهیزات و سهولت اجرا برای ورود به مدل AHP-TOPSIS انتخاب شدند. انتخاب نهایی معیارها بر اساس ترکیب شواهد حاصل از مرور منابع علمی و اجماع خبرگان انجام شد تا از جامعیت و اعتبار معیارهای مورد استفاده اطمینان حاصل شود. در بخش میدانی نیز پرسشنامه مقایسات زوجی AHP بر اساس ساختار سلسله‌مراتبی پژوهش طراحی و در اختیار خبرگان قرار گرفت. خبرگان اهمیت نسبی معیارها را با استفاده از مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی تعیین کردند. همچنین به‌منظور ارزیابی عملکرد گزینه‌ها نسبت به هر یک از معیارها، پرسشنامه ارزیابی گزینه‌ها تکمیل و داده‌های لازم برای تشکیل ماتریس تصمیم TOPSIS جمع‌آوری شد.

به‌منظور بررسی روایی محتوایی ابزار پژوهش، نسخه اولیه پرسشنامه در اختیار ۵ نفر از اعضای هیئت علمی و متخصصان حوزه ایمنی و

تصمیم‌گیری جدید، بلکه در نبود یک چارچوب جامع برای ارزیابی و اولویت‌بندی فناوری‌های کنترل گردوغبار با تأکید هم‌زمان بر شاخص‌های فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، اجرایی و به‌ویژه معیارهای ایمنی و بهداشت شغلی متناسب با شرایط صنعت فولاد است.

بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در ارائه یک الگوریتم جدید تصمیم‌گیری نیست، بلکه در توسعه و به‌کارگیری چارچوبی کاربردی مبتنی بر مدل ترکیبی AHP-TOPSIS برای ارزیابی و اولویت‌بندی فناوری‌های کنترل گردوغبار با رویکردی جامع و مبتنی بر اصول ایمنی نهفته است؛ به‌گونه‌ای که علاوه بر معیارهای متداول فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، معیارهای مرتبط با کاهش مواجهه شغلی کارکنان، ارتقای سلامت نیروی کار، الزامات ایمنی و بهداشت حرفه‌ای و قابلیت انطباق با استانداردهای مرتبط نیز در فرآیند تصمیم‌گیری مورد توجه قرار گرفته‌اند. نتایج این پژوهش می‌تواند چارچوبی علمی و کاربردی برای مدیران، تصمیم‌گیران و متخصصان ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست صنعت فولاد فراهم کند تا ضمن انتخاب مناسب‌ترین فناوری کنترل گردوغبار، زمینه کاهش مخاطرات شغلی، حفاظت از سلامت کارکنان، بهبود عملکرد زیست‌محیطی و ارتقای بهره‌وری صنایع فولادی نیز فراهم شود. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر اولویت‌بندی فناوری‌های کنترل گردوغبار در صنعت فولاد با استفاده از مدل ترکیبی AHP-TOPSIS و ارائه چارچوبی جامع برای حمایت از تصمیم‌گیری در انتخاب فناوری‌های مؤثر، متناسب با الزامات فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و ایمنی و بهداشت شغلی است.

روش کار

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر شیوه اجرا، توصیفی-تحلیلی است و با بهره‌گیری از مدل ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و TOPSIS انجام شده است. در این پژوهش، روش AHP برای تعیین وزن نسبی معیارهای تصمیم‌گیری بر اساس قضاوت خبرگان و روش TOPSIS برای رتبه‌بندی نهایی گزینه‌های کنترل گردوغبار بر مبنای فاصله آن‌ها از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی به‌کار گرفته شد. جامعه آماری پژوهش شامل مدیران، کارشناسان و متخصصان شاغل در بخش‌های بهره‌برداری، محیط زیست، ایمنی و بهداشت حرفه‌ای، تعمیرات و نگهداری و واحدهای فنی شرکت فولاد است. این افراد به دلیل تجربه عملی، شناخت فرآیندهای تولید فولاد و آشنایی با منابع

فضاهای باز و نقاط انتقال مواد کاربرد دارد، اما راندمان آن به شرایط محیطی و اندازه ذرات وابسته است. همچنین محصورسازی تجهیزات با جلوگیری از انتشار گردوغبار در منبع، نقش مؤثری در کاهش انتشار آلاینده‌ها داشته و معمولاً در کنار سایر فناوری‌های کنترل گردوغبار مورد استفاده قرار می‌گیرد. از نظر اقتصادی نیز هزینه اجرای این فناوری‌ها بسته به ظرفیت واحد صنعتی، شرایط بهره‌برداری و تجهیزات مورد استفاده متفاوت است و در این پژوهش، ارزیابی هزینه‌ها بر اساس نظر خبرگان و شرایط متداول صنایع فولادی کشور انجام شده است. سپس ماتریس‌های مقایسات زوجی بر اساس نظرات خبرگان تشکیل و با استفاده از میانگین هندسی تجمیع شدند. پس از آن، وزن نسبی معیارها با استفاده از روش بردار ویژه محاسبه و شاخص سازگاری و نرخ سازگاری برای بررسی اعتبار قضاوت‌های خبرگان تعیین شد. در صورتی که مقدار نرخ سازگاری کمتر از ۰/۰۱ باشد، قضاوت‌های انجام‌شده از سازگاری قابل قبولی برخوردار بوده و نتایج حاصل از تحلیل معتبر تلقی می‌شوند. در مرحله بعد، وزن‌های استخراج‌شده از AHP به‌عنوان وزن معیارها در روش TOPSIS مورد استفاده قرار گرفت.

در روش TOPSIS، معیارهای تصمیم‌گیری بر اساس ماهیت خود به دو دسته معیارهای سودمحور و هزینه‌محور تقسیم شدند. در این پژوهش، معیارهای راندمان حذف گردوغبار، سازگاری زیست‌محیطی، سهولت اجرا و عمر مفید تجهیزات به‌عنوان معیارهای سودمحور در نظر گرفته شدند؛ به‌طوری‌که افزایش مقدار آن‌ها مطلوب‌تر است. در مقابل، هزینه اجرا و هزینه نگهداری به‌عنوان معیارهای هزینه‌محور تعریف شدند که در آن‌ها مقادیر کمتر مطلوب‌تر است. بر این اساس، پس از نرمال‌سازی ماتریس تصمیم و اعمال وزن‌های به‌دست‌آمده از روش AHP، راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی متناسب با ماهیت هر معیار تعیین و محاسبات TOPSIS بر اساس این تقسیم‌بندی انجام شد.

بدین منظور، ابتدا ماتریس تصمیم تشکیل و نرمال‌سازی شد، سپس ماتریس نرمال موزون با استفاده از وزن‌های معیارها محاسبه گردید. در ادامه، راه‌حل ایده‌آل مثبت و راه‌حل ایده‌آل منفی تعیین شد و فاصله هر گزینه از این دو راه‌حل با استفاده از فاصله اقلیدسی محاسبه گردید. فاصله هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل مثبت (S^+) و راه‌حل ایده‌آل منفی (S^-) با استفاده از فاصله اقلیدسی محاسبه شد. روابط مورد استفاده به صورت زیر است (روابط ۱ و ۲):

بهداشت شغلی، محیط‌زیست و صنعت فولاد قرار گرفت. انتخاب این افراد بر اساس سابقه علمی و اجرایی مرتبط با موضوع پژوهش انجام شد. روایی محتوایی پرسشنامه با استفاده از شاخص نسبت روایی محتوا و شاخص روایی محتوا ارزیابی شد و نتایج نشان داد تمامی گویه‌ها دارای مقادیر قابل قبول بوده و برای استفاده در پژوهش تأیید شدند. پس از تأیید روایی ابزار، پرسشنامه نهایی در اختیار ۱۵ نفر از خبرگان شامل ۴ نفر متخصص ایمنی و بهداشت شغلی، ۳ نفر متخصص محیط‌زیست، ۳ نفر مدیر یا کارشناس بهره‌برداری، ۲ نفر متخصص تعمیرات و نگهداری، ۲ نفر کارشناس فرآیند و تولید و ۱ نفر متخصص تصمیم‌گیری چندمعیاره قرار گرفت تا مقایسات زوجی و ارزیابی معیارها و گزینه‌ها انجام شود.

از آنجا که پرسشنامه AHP مبتنی بر مقایسات زوجی است، پایایی آن از طریق نرخ سازگاری بررسی شد و به دلیل ماهیت ابزار، از آزمون‌هایی نظیر آلفای کرونباخ استفاده نشد. ابتدا ساختار سلسله‌مراتبی پژوهش طراحی شد؛ به‌گونه‌ای که در سطح نخست هدف پژوهش، یعنی انتخاب بهترین روش کاهش آلودگی گردوغبار صنعتی، در سطح دوم معیارهای تصمیم‌گیری شامل هزینه اجرا، راندمان حذف گردوغبار، هزینه نگهداری، سهولت اجرا، سازگاری زیست‌محیطی و عمر مفید تجهیزات و در سطح سوم گزینه‌های مورد ارزیابی شامل بگ‌فیلتر، الکتروفیلتر، سیستم مه‌پاش، محصورسازی تجهیزات و سیستم مکش موضعی قرار گرفتند.

گزینه‌های مورد بررسی در این پژوهش از میان رایج‌ترین فناوری‌های کنترل گردوغبار مورد استفاده در صنایع فولادی انتخاب شدند. بگ‌فیلتر به دلیل راندمان بسیار بالا در حذف ذرات ریز (معمولاً بیش از ۹۹ درصد)، یکی از متداول‌ترین سامانه‌های کنترل گردوغبار در واحدهای فولادسازی محسوب می‌شود، هرچند هزینه اولیه و هزینه تعویض کیسه‌ها نسبتاً بالا است. الکتروفیلتر با استفاده از میدان الکتریکی، ذرات معلق را جذب کرده و برای جریان‌های گازی با حجم زیاد مناسب است، اما هزینه سرمایه‌گذاری اولیه آن نسبتاً زیاد بوده و عملکرد آن به ویژگی‌های ذرات وابسته است. سیستم مکش موضعی با جمع‌آوری آلاینده در محل تولید، میزان مواجهه شغلی کارکنان را به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد و یکی از مهم‌ترین کنترل‌های مهندسی در بهداشت حرفه‌ای محسوب می‌شود. سیستم مه‌پاش از طریق ایجاد قطرات ریز آب، موجب کاهش انتشار گردوغبار می‌شود و بیشتر در

مستلزم اطلاعات دقیق‌تر، حجم بیشتری از داده‌ها و پیچیدگی محاسباتی بالاتری هستند.

با توجه به هدف کاربردی پژوهش و محدودیت‌های موجود در دسترسی به داده‌های کمی تفصیلی، استفاده از مدل کلاسیک AHP-TOPSIS به‌عنوان روشی معتبر، شفاف و متناسب با شرایط مطالعه انتخاب شد. با این حال، به‌کارگیری مدل‌های فازی و تلفیق آن‌ها با روش‌هایی نظیر ارزیابی چرخه عمر یا تحلیل هزینه-فایده می‌تواند به‌عنوان مسیر پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده، دقت و جامعیت فرآیند تصمیم‌گیری را افزایش دهد.

یافته‌ها

بررسی مشخصات خبرگان (جدول ۱) نشان می‌دهد که از مجموع ۱۵ نفر مشارکت‌کننده در پژوهش، ۱۳ نفر (۸۶/۷ درصد) مرد و ۲ نفر (۱۳/۳ درصد) زن بوده‌اند که این ترکیب با ساختار نیروی انسانی شاغل در صنعت فولاد همخوانی دارد. از نظر سنی، بیشترین فراوانی مربوط به گروه سنی ۴۰ تا ۴۹ سال با ۷ نفر (۴۶/۷ درصد) بوده و پس از آن گروه سنی ۵۰ سال و بیشتر با ۵ نفر (۳۳/۳ درصد) قرار گرفته است؛ بنابراین، حدود ۸۰ درصد از خبرگان بیش از ۴۰ سال سن داشته‌اند که نشان‌دهنده برخورداری آنان از تجربه مدیریتی و تخصصی کافی است. از نظر سطح تحصیلات نیز، ۸ نفر (۵۳/۳ درصد) دارای مدرک کارشناسی ارشد، ۳ نفر (۲۰ درصد) دارای مدرک دکتری و ۴ نفر (۲۶/۷ درصد) دارای مدرک کارشناسی بوده‌اند؛ در نتیجه، ۷۳/۳ درصد از خبرگان دارای تحصیلات تکمیلی بوده‌اند که این موضوع اعتبار علمی قضاوت‌های آنان را افزایش می‌دهد. همچنین بررسی سابقه کاری نشان می‌دهد که ۱۲ نفر (۸۰ درصد) بیش از ۱۰ سال سابقه فعالیت در صنعت فولاد داشته‌اند و از این میان، ۳ نفر (۲۰ درصد) دارای بیش از ۲۰ سال تجربه کاری بوده‌اند که بیانگر تسلط مناسب آنان بر فرآیندهای تولید، منابع انتشار گردوغبار و فناوری‌های کنترل آلودگی است. از نظر حوزه تخصصی نیز، خبرگان در بخش‌های مختلف شامل بهره‌برداری (۴ نفر؛ ۲۶/۷ درصد)، محیط‌زیست (۳ نفر؛ ۲۰ درصد)، ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست (۳ نفر؛ ۲۰ درصد)، واحد فنی و مهندسی (۳ نفر؛ ۲۰ درصد) و تعمیرات و نگهداری (۲ نفر؛ ۱۳/۳ درصد) توزیع شده‌اند.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن V_{ij} : مقدار نرمال موزون گزینه i در معیار j ، V_j^+ : مقدار ایده‌آل مثبت معیار j و V_j^- : مقدار ایده‌آل منفی معیار j است. سپس ضریب نزدیکی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$CC_i = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-) \quad \text{رابطه ۳}$$

گزینه‌ای که بیشترین مقدار ضریب نزدیکی (CC) را داشته باشد، به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شد. در نهایت، ضریب نزدیکی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل محاسبه و گزینه‌های کنترل گردوغبار بر اساس مقدار این ضریب رتبه‌بندی شدند؛ به‌گونه‌ای که گزینه دارای بیشترین ضریب نزدیکی، به‌عنوان مناسب‌ترین روش کنترل گردوغبار معرفی گردید. کلیه محاسبات مربوط به AHP با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice 11 و محاسبات TOPSIS با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel انجام شد.

به‌منظور بررسی سازگاری قضاوت خبرگان، نرخ سازگاری برای تمامی ماتریس‌های مقایسات زوجی محاسبه شد. بر اساس معیار ارائه‌شده توسط ساعتی، چنانچه مقدار نرخ سازگاری کمتر از ۰/۱۰ باشد، سازگاری قضاوت‌ها قابل قبول تلقی می‌شود. در این پژوهش، مقدار نرخ سازگاری تمامی ماتریس‌های مقایسات زوجی کمتر از ۰/۱۰ به دست آمد؛ بنابراین، نتایج حاصل از مقایسات زوجی از اعتبار و سازگاری لازم برخوردار بودند.

انتخاب مدل ترکیبی AHP-TOPSIS در این پژوهش با توجه به ماهیت مسئله تصمیم‌گیری، نوع داده‌های گردآوری‌شده و هدف کاربردی پژوهش انجام شد. از آنجا که ارزیابی گزینه‌های کنترل گردوغبار مبتنی بر قضاوت خبرگان و مقایسه همزمان معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجرایی بود، استفاده از مدل AHP برای تعیین اهمیت نسبی معیارها و روش TOPSIS برای رتبه‌بندی گزینه‌ها، چارچوبی مناسب و قابل تفسیر فراهم کرد. هرچند در سال‌های اخیر روش‌های پیشرفته‌تری مانند AHP فازی، TOPSIS فازی، روش‌های مبتنی بر اعداد بازه‌ای (Interval) و مدل‌های تلفیقی با ارزیابی چرخه عمر (LCA) نیز توسعه یافته‌اند، اما این روش‌ها

جدول ۱. ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و تخصصی خبرگان مشارکت‌کننده در پژوهش

معیار	طبقه‌بندی	درصد	فراوانی
جنسیت	مرد	۱۳	۸۶/۷
	زن	۲	۱۳/۳
سن (سال)	۳۹-۳۰	۳	۲۰
	۴۹-۴۰	۷	۴۶/۷
مدرک تحصیلی	۵۰ سال و بیشتر	۵	۳۳/۳
	کارشناسی	۴	۲۶/۷
	کارشناسی ارشد	۸	۵۳/۳
	دکتری	۳	۲۰
سابقه کاری (سال)	۱۰-۵	۳	۲۰
	۱۵-۱۱	۵	۳۳/۳
	۲۰-۱۶	۴	۲۶/۷
	بیش از ۲۰	۳	۲۰
حوزه تخصصی	بهره‌برداری	۴	۲۶/۷
	محیط‌زیست	۳	۲۰
	ایمنی، بهداشت، محیط زیست	۳	۲۰
	تعمیرات و نگهداری	۲	۱۳/۳
	واحد فنی و مهندسی	۳	۲۰

بر اساس نتایج جدول ۲ پرسشنامه از روایی محتوایی مطلوب برخوردار بوده و تمامی شاخص‌های نرخ سازگاری و شاخص سازگاری در محدوده قابل قبول قرار گرفته‌اند. همچنین مقدار نرخ سازگاری کمتر از ۰/۱۰ بوده که بیانگر سازگاری مناسب قضاوت خبرگان و قابلیت اعتماد نتایج حاصل از روش AHP است.

جدول ۲. نتایج ارزیابی روایی و سازگاری ابزار پژوهش

شاخص	مقدار	وضعیت
CVR	قابل قبول	تایید
CVI	قابل قبول	تایید
ماتریس معیارها CR	کمتر از ۰/۱۰	سازگار

نتایج حاصل از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی که در جدول ۳ ارائه شده است، نشان می‌دهد راندمان حذف گردوغبار با وزن ۰/۳۴۸ مهم‌ترین معیار تصمیم‌گیری در انتخاب روش مناسب کنترل گردوغبار در صنعت فولادسازی است و با اختلاف قابل‌توجهی نسبت به سایر معیارها در رتبه نخست قرار دارد. پس از آن، هزینه اجرا با وزن ۰/۲۲۱ در رتبه دوم قرار گرفته است که نشان‌دهنده اهمیت قابل‌توجه ملاحظات اقتصادی و محدودیت‌های سرمایه‌گذاری در صنایع فولاد است. سازگاری زیست‌محیطی نیز با وزن ۰/۱۸۱ رتبه سوم را به خود

اختصاص داده است. در ادامه، هزینه نگهداری با وزن ۰/۱۰۲ در رتبه چهارم قرار دارد. همچنین عمر مفید تجهیزات با وزن ۰/۰۸۱ و سهولت اجرا با وزن ۰/۰۶۷ به ترتیب در رتبه‌های پنجم و ششم قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی، نتایج این جدول نشان می‌دهد که معیارهای فنی و عملکردی بیشترین تأثیر را در فرآیند تصمیم‌گیری دارند و معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی در اولویت‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

جدول ۳. وزن نهایی معیارهای مؤثر در انتخاب فناوری‌های کنترل گردوغبار در صنعت فولاد بر اساس روش AHP

معیار	وزن نهایی	رتبه
راندمان حذف گردوغبار	۰/۳۴۸	۱
هزینه اجرا	۰/۲۲۱	۲
سازگاری زیست‌محیطی	۰/۱۸۱	۳
هزینه نگهداری	۰/۱۰۲	۴
عمر مفید تجهیزات	۰/۰۸۱	۵
سهولت اجرا	۰/۰۶۷	۶

جدول ۴ نتایج ماتریس نرمال موزون را پس از اعمال وزن‌های به‌دست‌آمده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی بر داده‌های نرمال‌شده نشان می‌دهد. در این مرحله، اهمیت نسبی هر یک از معیارها در امتیاز نهایی گزینه‌ها لحاظ شده و مقادیر حاصل، مبنای محاسبه فاصله گزینه‌ها از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی در روش TOPSIS قرار می‌گیرد. نتایج بیانگر آن است که بگ‌فیلتر با کسب بیشترین مقدار در معیارهای راندمان حذف گردوغبار (۰/۱۸۳)، سازگاری زیست‌محیطی (۰/۰۹۹) و عمر مفید تجهیزات (۰/۰۴۶)، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سایر گزینه‌ها داشته است. سیستم مکش موضعی نیز با مقادیر نسبتاً مناسب در اغلب معیارها، به‌ویژه راندمان حذف گردوغبار (۰/۱۶۳)، سازگاری زیست‌محیطی (۰/۰۸۸) و سهولت اجرا (۰/۰۲۴)، عملکرد متعادلی از خود نشان داده و به‌عنوان یکی از گزینه‌های رقابتی مطرح است. الکتروفیلتر اگرچه در معیار هزینه نگهداری (۰/۰۴۷) بالاترین مقدار را به خود اختصاص داده و در راندمان حذف گردوغبار و سازگاری زیست‌محیطی نیز عملکرد مطلوبی دارد، اما مقادیر پایین‌تر آن در هزینه اجرا و سهولت اجرا موجب کاهش امتیاز کلی این گزینه شده است. همچنین محصورسازی تجهیزات با وجود کسب بیشترین مقدار در هزینه اجرا (۰/۱۰۲) و سهولت اجرا (۰/۰۲۷)، در معیارهای با وزن بالاتر، به‌ویژه راندمان حذف گردوغبار، عملکرد ضعیف‌تری داشته است. سیستم مه‌پاش نیز اگرچه بیشترین

عملکرد مناسب این گزینه در معیارهای سودمحور است. سیستم مکش موضعی نیز با ثبت مقادیر مناسب در اغلب معیارها، به‌ویژه راندمان حذف گردوغبار (۰/۱۶۳)، سازگاری زیست‌محیطی (۰/۰۸۸) و سهولت اجرا (۰/۰۲۴)، از تعادل مطلوبی میان شاخص‌های فنی و اجرایی برخوردار است. از سوی دیگر، الکتروفیلتر (ESP) در معیارهای راندمان حذف گردوغبار، سازگاری زیست‌محیطی و هزینه نگهداری عملکرد قابل قبولی داشته است.

جدول ۵. نتایج محاسبه فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت (S^+)، راه‌حل ایده‌آل منفی (S^-)، ضریب نزدیکی (CC) و رتبه نهایی گزینه‌های کنترل گردوغبار

گزینه	(S^+)	(S^-)	ضریب نزدیکی (CC)	رتبه
بگ‌فیلتر	۰/۰۲۸	۰/۱۷۶	۰/۸۶۲	۱
سیستم مکش موضعی	۰/۰۶۱	۰/۱۵۵	۰/۷۱۸	۲
الکتروفیلتر	۰/۰۸۴	۰/۱۳۸	۰/۶۲۲	۳
محصول‌سازی تجهیزات	۰/۱۲۷	۰/۱۰۶	۰/۴۵۵	۴
سیستم مه‌پاش	۰/۱۶۱	۰/۰۷۲	۰/۳۰۹	۵

نتایج رتبه‌بندی نهایی گزینه‌های کنترل گردوغبار که بر اساس ضریب نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل در روش TOPSIS محاسبه شده است، نشان می‌دهد بگ‌فیلتر با ضریب نزدیکی ۰/۸۶۲ در رتبه نخست قرار گرفته و به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه برای کنترل آلودگی گردوغبار در صنعت فولادسازی شناخته شده است. پس از آن، سیستم مکش موضعی با ضریب نزدیکی ۰/۷۱۸ در رتبه دوم قرار گرفته است. الکتروفیلتر نیز با ضریب نزدیکی ۰/۶۲۲ در جایگاه سوم قرار گرفته است. همچنین محصول‌سازی تجهیزات با ضریب نزدیکی ۰/۴۵۵ در رتبه چهارم قرار گرفته است.

در نهایت، سیستم مه‌پاش با ضریب نزدیکی ۰/۳۰۹ کمترین امتیاز را کسب کرده و در رتبه پنجم قرار گرفته است. اگرچه این روش از نظر هزینه اجرا و سهولت استقرار مزایایی دارد، اما راندمان پایین‌تر در کنترل گردوغبار و عملکرد ضعیف‌تر در برخی معیارهای کلیدی موجب شده است که به‌عنوان کم‌اولویت‌ترین گزینه معرفی شود. به‌طور کلی، نتایج این جدول نشان می‌دهد که فناوری‌هایی که از راندمان حذف آلاینده بالاتر، سازگاری زیست‌محیطی مطلوب‌تر و عملکرد متوازن‌تری در معیارهای اصلی برخوردار هستند، رتبه‌های بالاتری را کسب کرده‌اند.

مقدار را در معیار هزینه اجرا (۰/۱۱۴) به دست آورده است، اما پایین بودن مقادیر آن در معیارهای کلیدی مانند راندمان حذف گردوغبار، سازگاری زیست‌محیطی و عمر مفید تجهیزات، موجب شده است که از منظر ارزیابی کلی جایگاه پایین‌تری نسبت به سایر گزینه‌ها داشته باشد. به‌منظور تشکیل ماتریس تصمیم در روش TOPSIS، عملکرد هر یک از گزینه‌های کنترل گردوغبار نسبت به معیارهای پژوهش توسط ۱۵ نفر از خبرگان با استفاده از پرسشنامه ارزیابی گزینه‌ها تعیین شد. امتیازهای ارائه‌شده توسط خبرگان پس از جمع‌بندی با استفاده از میانگین حسابی، به‌عنوان داده‌های اولیه ماتریس تصمیم در نظر گرفته شد. سپس ماتریس تصمیم بر اساس روابط استاندارد روش TOPSIS نرمال‌سازی و با اعمال وزن‌های به‌دست‌آمده از روش AHP، ماتریس نرمال موزون تشکیل شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. ماتریس تصمیم نرمال موزون گزینه‌های کنترل گردوغبار پس از اعمال وزن معیارهای AHP

گزینه	راندمان هزینه حذف اجرا	هزینه سرمایه‌گذاری	عمر مفید	سهولت اجرا
بگ‌فیلتر	۰/۱۸۳	۰/۰۷۶	۰/۰۹۹	۰/۰۴۱
سیستم مکش موضعی	۰/۱۶۳	۰/۰۸۹	۰/۰۸۸	۰/۰۳۵
الکتروفیلتر	۰/۱۶۳	۰/۰۶۴	۰/۰۸۸	۰/۰۴۷
محصول‌سازی تجهیزات	۰/۱۲۲	۰/۱۰۲	۰/۰۷۷	۰/۰۴۱
سیستم مه‌پاش	۰/۱۲۲	۰/۱۱۴	۰/۰۶۶	۰/۰۳۵

جدول ۵ نتایج محاسبه فاصله هر یک از گزینه‌های کنترل گردوغبار از راه‌حل ایده‌آل مثبت (S^+) و راه‌حل ایده‌آل منفی (S^-) و همچنین ضریب نزدیکی (CC) را نشان می‌دهد. در این مرحله، اهمیت نسبی هر یک از معیارهای تصمیم‌گیری در مقادیر نهایی گزینه‌ها لحاظ شده و نتایج حاصل، مبنای تعیین راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی و محاسبه فاصله هر گزینه از این دو راه‌حل در روش TOPSIS قرار می‌گیرد. با توجه به وزن بالاتر معیار راندمان حذف گردوغبار، مقادیر این معیار تأثیر بیشتری بر نتایج نهایی رتبه‌بندی دارند. در این میان، بگ‌فیلتر در معیارهای راندمان حذف گردوغبار (۰/۱۸۳)، سازگاری زیست‌محیطی (۰/۰۹۹) و عمر مفید تجهیزات (۰/۰۴۶) مقادیر بالاتری را نسبت به سایر گزینه‌ها کسب کرده است که نشان‌دهنده

تحلیل حساسیت نتایج مدل AHP-TOPSIS

به‌منظور بررسی میزان پایداری نتایج حاصل از مدل ترکیبی AHP-TOPSIS و ارزیابی تأثیر تغییر وزن معیارها بر رتبه‌بندی گزینه‌ها، تحلیل حساسیت بر روی مدل AHP-TOPSIS انجام شد. در این تحلیل، با توجه به اینکه معیار «راندمان حذف گردوغبار» بیشترین وزن را در میان معیارهای تصمیم‌گیری به خود اختصاص داده بود،

وزن این معیار به میزان ۱۰ درصد افزایش و کاهش یافت. به‌منظور حفظ مجموع وزن‌ها برابر با یک، وزن سایر معیارها به‌صورت متناسب تعدیل شد. سپس فرآیند رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش TOPSIS مجدداً اجرا و نتایج با حالت پایه مقایسه گردید. جدول ۶ نتایج تحلیل حساسیت رتبه‌بندی گزینه‌ها در اثر تغییر وزن معیار راندمان حذف گردوغبار را نشان می‌دهد.

جدول ۶. نتایج تحلیل حساسیت رتبه‌بندی گزینه‌ها در اثر تغییر وزن معیار راندمان حذف گردوغبار

حالت تعدیل	رتبه اول	رتبه دوم	رتبه سوم	رتبه چهارم	رتبه پنجم
حالت پایه	بگ فیلتر	سیستم مکش موضعی	الکتروفیلتر	محصولسازی تجهیزات	سیستم مه پاش
افزایش ۱۰٪ وزن راندمان حذف گرد و غبار	بگ فیلتر	سیستم مکش موضعی	الکتروفیلتر	محصولسازی تجهیزات	سیستم مه پاش
کاهش ۱۰٪ وزن راندمان حذف گرد و غبار	بگ فیلتر	سیستم مکش موضعی	الکتروفیلتر	محصولسازی تجهیزات	سیستم مه پاش
افزایش ۲۰٪ وزن راندمان حذف گرد و غبار	بگ فیلتر	سیستم مکش موضعی	الکتروفیلتر	محصولسازی تجهیزات	سیستم مه پاش
کاهش ۲۰٪ وزن راندمان حذف گرد و غبار	بگ فیلتر	سیستم مکش موضعی	الکتروفیلتر	محصولسازی تجهیزات	سیستم مه پاش

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که با اعمال تغییرات ± 10 و ± 20 درصدی در وزن معیار «راندمان حذف گردوغبار» و تعدیل متناسب سایر وزن‌ها، ترتیب نهایی گزینه‌ها تغییر نکرد و بگ‌فیلتر همچنان در رتبه نخست باقی ماند. همچنین جایگاه سیستم مکش موضعی، الکتروفیلتر، محصولسازی تجهیزات و سیستم مه‌پاش نیز ثابت ماند و تنها تغییرات جزئی در مقادیر ضریب نزدیکی (CC) مشاهده شد که بر رتبه‌بندی نهایی تأثیر معناداری نداشت. این نتایج نشان‌دهنده پایداری، استحکام و قابلیت اعتماد مدل ترکیبی AHP-TOPSIS در برابر تغییرات منطقی وزن معیارها است.

بحث

یافته‌های این پژوهش نشان داد که در فرآیند انتخاب فناوری مناسب برای کنترل گردوغبار در صنعت فولادسازی، معیارهای مرتبط با کارایی فنی نسبت به سایر معیارها از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. این نتیجه را می‌توان با ماهیت فرآیندهای فولادسازی تبیین کرد؛ زیرا این صنعت به دلیل استفاده از مواد اولیه معدنی، کوره‌های ذوب، جابه‌جایی مداوم مواد و انجام عملیات مکانیکی، از جمله صنایع با بیشترین میزان تولید ذرات معلق به شمار می‌رود. ازاین‌رو، مدیران و متخصصان بیش از هر چیز به دنبال فناوری‌هایی هستند که بتوانند به‌صورت مؤثر انتشار گردوغبار را کنترل کرده و کیفیت هوای محیط کار و محیط پیرامون را بهبود بخشند. در چنین شرایطی، ویژگی‌هایی مانند سهولت نصب یا حتی برخی هزینه‌های جانبی، در مقایسه با

میزان اثربخشی فناوری، در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند. در رتبه بعدی، معیارهای اقتصادی جایگاه قابل توجهی را به خود اختصاص دادند. اجرای سامانه‌های کنترل آلودگی در صنایع فولادی معمولاً نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجه و تخصیص منابع مالی است؛ بنابراین تصمیم‌گیرندگان علاوه بر اثربخشی فنی، به امکان تأمین منابع مالی و توجیه اقتصادی پروژه نیز توجه ویژه‌ای دارند. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که خبرگان حاضر در پژوهش، هزینه را عاملی محدودکننده تلقی کرده‌اند، نه عاملی تعیین‌کننده؛ به این معنا که در صورت اثبات کارایی بالای یک فناوری، هزینه‌های بیشتر نیز می‌تواند از منظر مدیریتی قابل پذیرش باشد. همچنین جایگاه نسبتاً بالای معیارهای زیست‌محیطی نشان‌دهنده تغییر نگرش صنایع فولادی نسبت به مسائل محیط‌زیست است. امروزه رعایت الزامات قانونی، کاهش پیامدهای زیست‌محیطی، افزایش مسئولیت‌پذیری اجتماعی و حرکت به سمت تولید پایدار، به بخشی از سیاست‌های راهبردی صنایع بزرگ تبدیل شده است. ازاین‌رو، فناوری‌هایی که بتوانند علاوه بر کنترل مؤثر گردوغبار، آثار زیست‌محیطی کمتری داشته باشند، از شانس بیشتری برای انتخاب برخوردار خواهند بود. در مقابل، معیارهایی مانند هزینه‌های نگهداری، عمر مفید تجهیزات و سهولت اجرا در اولویت‌های پایین‌تر قرار گرفتند. این موضوع را می‌توان با شرایط عملیاتی صنعت فولاد تبیین کرد؛ زیرا در چنین صنایعی توقف تولید، کاهش بهره‌وری یا عدم رعایت استانداردهای زیست‌محیطی، هزینه‌های بسیار سنگین‌تری نسبت به هزینه‌های تعمیرات یا پیچیدگی اجرای یک

این حال، در بسیاری از صنایع فولادی ایران این محدودیت‌ها از طریق استفاده از سامانه‌های پیش‌خنک‌کننده، انتخاب کیسه‌های مقاوم در برابر حرارت و اجرای برنامه‌های منظم تعمیر و نگهداری تا حد زیادی کنترل می‌شوند. از سوی دیگر، راندمان بالای حذف ذرات معلق، کاهش مواجهه شغلی کارکنان با گردوغبار و امکان انطباق بهتر با الزامات ایمنی، بهداشت حرفه‌ای و محیط‌زیست سبب شده است که مزایای این فناوری بر محدودیت‌های آن غلبه کرده و همچنان به‌عنوان گزینه برتر در فرآیند تصمیم‌گیری انتخاب شود.

نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نیز همسو است. بادیه و همکاران (۲۲) گزارش کردند که استفاده هم‌زمان از سامانه‌های مکش و فیلترهای کیسه‌ای، اثربخشی بالایی در کنترل انتشار ذرات معلق و کاهش مواجهه شغلی کارکنان دارد که این یافته با برتری فناوری‌های حذف مستقیم گردوغبار در پژوهش حاضر همخوانی دارد. همچنین وو و همکاران (۲۳) نشان دادند که بهینه‌سازی طراحی هودها و سیستم‌های مکش موضعی، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش راندمان جمع‌آوری گردوغبار و کاهش انتشار آلاینده‌ها دارد؛ نتیجه‌ای که اهمیت فناوری‌های مبتنی بر جمع‌آوری مستقیم آلاینده را تأیید می‌کند.

از سوی دیگر، ژو و همکاران (۲۴) تأکید کردند که مدیریت موفق گردوغبار در صنایع فولاد باید بر پایه ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی انجام شود؛ موضوعی که با معیارهای مورد استفاده در پژوهش حاضر کاملاً همسو است. همچنین خایداروف و همکاران (۲۵) بیان کردند که فناوری‌های کنترل گردوغبار علاوه بر کاهش انتشار آلاینده‌ها، باید به بهبود عملکرد زیست‌محیطی و بهره‌وری منابع نیز کمک کنند که این نتیجه، اهمیت معیارهای زیست‌محیطی در پژوهش حاضر را تأیید می‌کند. بنابراین، همسویی نتایج پژوهش حاضر با مطالعات انجام‌شده در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که استفاده از مدل ترکیبی AHP-TOPSIS می‌تواند چارچوبی علمی، قابل اعتماد و کاربردی برای اولویت‌بندی فناوری‌های کنترل گردوغبار در صنعت فولادسازی فراهم کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل ترکیبی AHP-TOPSIS ابزار مناسبی برای اولویت‌بندی روش‌های کنترل گردوغبار در صنعت فولاد

فناوری به همراه دارد. به همین دلیل، خبرگان ترجیح می‌دهند فناوری‌هایی انتخاب شوند که عملکرد مطمئن‌تری در کنترل آلاینده‌ها داشته باشند، حتی اگر بهره‌برداری یا نگهداری آن‌ها دشوارتر باشد. در بخش ارزیابی گزینه‌ها نیز نتایج نشان داد که فناوری‌هایی که بر جمع‌آوری و حذف مستقیم گردوغبار متکی هستند، نسبت به روش‌هایی که صرفاً انتشار آلاینده را محدود یا کنترل می‌کنند، عملکرد مطلوب‌تری دارند. این موضوع با ماهیت انتشار گردوغبار در واحدهای فولادسازی همخوانی دارد؛ زیرا بخش عمده ذرات معلق در محل تولید ایجاد می‌شوند و هرچه فرآیند جمع‌آوری این ذرات به منبع انتشار نزدیک‌تر باشد، کارایی سیستم افزایش خواهد یافت. در مقابل، روش‌هایی که بیشتر نقش کمکی یا تکمیلی در کنترل گردوغبار دارند، به‌تنهایی نمی‌توانند پاسخگوی حجم بالای آلاینده‌های تولیدشده در فرآیندهای فولادسازی باشند.

در نهایت باید بیان کرد که بگ‌فیلتر در میان گزینه‌های مورد بررسی رتبه نخست را کسب کرد. برتری بگ‌فیلتر را می‌توان با توجه به ویژگی‌های فنی و شرایط بهره‌برداری صنایع فولادی ایران تبیین کرد (۱۸). این فناوری به دلیل راندمان بسیار بالای حذف ذرات معلق، به‌ویژه ذرات ریز، توانایی عملکرد پایدار در شرایط بار آلودگی بالا و قابلیت بهره‌برداری مستمر، در بسیاری از واحدهای فولادسازی به‌عنوان یکی از مؤثرترین سامانه‌های کنترل گردوغبار شناخته می‌شود (۱۹). اگرچه هزینه اولیه نصب و تعویض دوره‌ای کیسه‌های فیلتر نسبت به برخی فناوری‌های دیگر بیشتر است، اما کاهش انتشار آلاینده‌ها، کاهش مواجهه شغلی کارکنان با گردوغبار، افزایش انطباق با الزامات ایمنی و زیست‌محیطی و کاهش هزینه‌های ناشی از بیماری‌های شغلی و توقف‌های تولید، این هزینه‌ها را در بلندمدت توجیه می‌کند (۲۰).

همچنین با انتخاب مناسب جنس کیسه‌های فیلتر و استفاده از سامانه‌های پیش‌خنک‌کننده، محدودیت‌های ناشی از دمای بالای گازهای خروجی نیز تا حد زیادی قابل کنترل است؛ بنابراین، برتری بگ‌فیلتر در این پژوهش با شرایط فنی و عملیاتی صنایع فولادی کشور همخوانی دارد. از سویی دیگر؛ با وجود مزایای قابل توجه بگ‌فیلتر، این فناوری بدون محدودیت نیست (۲۱). افزایش رطوبت، دمای بالای گازهای خروجی کوره‌ها و انتخاب نامناسب جنس کیسه‌های فیلتر می‌تواند موجب کاهش راندمان یا افزایش هزینه‌های نگهداری شود. با

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

استفاده از هوش مصنوعی

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

بوده و بگ‌فیلتر با در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و ایمنی و بهداشت شغلی، به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه انتخاب شد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که با اعمال تغییرات $\pm 10\%$ و $\pm 20\%$ درصدی در وزن معیارها، رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها تغییر معناداری نداشت که بیانگر پایداری و قابلیت اعتماد مدل تصمیم‌گیری است.

یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای مدیران صنایع فولادی در انتخاب فناوری‌های کنترل گردوغبار و کاهش مواجهه شغلی کارکنان با آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، اتکا به قضاوت خبرگان و استفاده از مدل کلاسیک AHP-TOPSIS از محدودیت‌های پژوهش حاضر به شمار می‌رود؛ از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از مدل‌های فازی، تحلیل هزینه-فایده، ارزیابی چرخه عمر (LCA) و تحلیل حساسیت پیشرفته برای افزایش دقت و جامعیت فرآیند تصمیم‌گیری استفاده شود.

References

- Al Hosni S, Domini M, Vahidzadeh R, Bertanza G. Potential and environmental benefits of biochar utilization for coal/coke substitution in the steel industry. *Energies*. 2024;17(11):2759. <https://doi.org/10.3390/en17112759>
- Caiafa C, Kratena K, Arto I. Macroeconomic and environmental impacts of two decarbonization options for the Dutch steel industry: green relocation versus green hydrogen imports. *Energy Policy*. 2025;206:114726. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114726>
- Nguyen TL, Nguyen PH, Pham HA, Nguyen TG, Nguyen DT, Tran TH, Phung HT. A novel integrating data envelopment analysis and spherical fuzzy MCDM approach for sustainable supplier selection in steel industry. *Mathematics*. 2022;10(11):1897. <https://doi.org/10.3390/math10111897>
- Chandel SS, Singh PK, Katiyar PK, Randhawa NS. A review on environmental concerns and technological innovations for the valorization of steel industry slag. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2023;40(6):2059-2086. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00886-z>
- Mahmood S, Misra P, Sun H, Luqman A, Papa A. Sustainable infrastructure, energy projects, and economic growth: mediating role of sustainable supply chain management. *Annals of Operations Research*. 2025;355(1):1099-1130. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05777-6>
- Cunha CAS, Lima IMD, Caldas GB, Vieira J, Rangel LAD, Lima GBA. Assessment of sustainable performance of the top five Brazilian steel industries using the TOPSIS technique with Gaussian AHP. *Gestão & Produção*. 2024;31:e9823. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2024v31e9823>
- Suer J, Traverso M, Jäger N. Review of life cycle assessments for steel and environmental analysis of future steel production scenarios. *Sustainability*. 2022;14(21):14131. <https://doi.org/10.3390/su142114131>
- Fărcean I, Proștean G, Socalici A. Sustainable development indicators in the steel industry. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023;2540(1):012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2540/1/012045>
- Wang X, Chen Y, Dong Y, Zhang T, Shi B. How does environmental regulation impact low-carbon transition? Evidence from China's iron and steel industry. *Annals of Operations Research*. 2025;345(2):637-663. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05480-6>
- Johnson S, Deng L, Gencer E. Environmental and economic evaluation of decarbonization strategies for the Indian steel industry. *Energy Conversion and Management*. 2023;293:117511. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117511>
- Kosek W, Woźniak W, Chamier-Gliszczyński N, Staniuk W. Offshore wind farm supply chains and regional development: the role of ports in economic and logistical growth in the central Baltic region. *Energies*. 2025;18(10):2599. <https://doi.org/10.3390/en18102599>
- Wu H, Cheng J, Zhong H, Jin F. Recent progress in iron and steel industry decarbonization strategies: industrial advancements and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025;32(8):4445-4471. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36038-7>

13. Saaty TL. Decision making the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*. 2004;13(1):1-35. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>
14. Saaty TL. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*. 2008;1(1):83-98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
15. Wang CN, Nguyen TL, Dang TT. Two-stage fuzzy MCDM for green supplier selection in steel industry. *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2022;33(2):1245-1260. <https://doi.org/10.32604/iasc.2022.024548>
16. Jalili Ghasem Agha O. Evaluation of public management policies for enhancing occupational safety and reducing workplace accidents in public organizations (case study: National Iranian South Oilfields Company). *Journal of Safety Promotion and Injury Prevention (Irtiqa Imini Pishgiri Masdumiyat)*. 2025;13(2):44-58. (In Persian). <https://doi.org/10.22037/iipm.v13i2.52260>
17. Homayounnia A. Design and validation of a school-based safety education and accident prevention model based on the active learning approach. *Journal of Safety Promotion and Injury Prevention (Irtiqa Imini Pishgiri Masdumiyat)*. 2025;13(2):74-90. (In Persian). <https://doi.org/10.22037/iipm.v13i2.52313>
18. Taghizadeh AA, Gholami A, Khosravi R. Investigating the amount of suspended particles (PM10, PM2.5) and assessing the risk of silica dust around the tile and ceramic factory. *Ardabil Health and Hygiene Magazine*. 2024;14(1):22-32. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23829710.1402.14.1.2.7>
19. Mohammadian M, Ahmadiasour A, Pouransari M, Akrami R, Davoud S, Razavi SM. Investigating workers' exposure to silica in respirable particles in a cement factory in Khorasan Razavi Province. *Journal of Sabzevar University of Medical Sciences*. 2019;27(1):65-72. (In Persian). <https://iranjournals.nlai.ir/handle/123456789/718708>
20. Azimi M, Mansouri Y, Rezai Hachasu V, Aminaie F, MihanPour H, Zare Sakhvidi MJ. Assessment of respiratory exposure of workers with airborne particles in a ceramic tile industry: a case study. *Occupational Medicine Quarterly Journal*. 2018;10(1):45-53. (In Persian). <http://tkj.ssu.ac.ir/article-1-861-fa.html>
21. Naghdi S, Mirmohammadi M, Karimzadegan H, Ghodusi J. Atmospheric dispersion modeling and health effects of PM2.5 released from automotive industries (case study of Saipa). *Journal of Environmental Health Engineering*. 2022;9(2):189-206. (In Persian).
22. Badea DO, Trifu A, Darabont DC. A comparative study on the effectiveness of pollutants control measures adopted in the steel industry to reduce workplace and environmental exposure: a case study. *Scientific Reports*. 2024;14(1):9916. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60817-w>
23. Wu Y, Luan S, Li X. Fugitive emission characteristics of fume and dust from short-process electric furnace tap hole and optimization of dust hood. *Atmosphere*. 2023;14(12):1829. <https://doi.org/10.3390/atmos14121829>
24. Zhu S, Gao C, Hu J, Yu W, You H. Evaluation of steel metallurgical dust management: combining treatment methods and resource attributes. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024;191:1648-1658. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.09.052>
25. Khaidarov TB, Khanna R, Khaidarov BB, Li K, Suvorov DS, Metlenkin DA, Kuznetsov DV. An innovative approach toward enhancing the environmental and economic sustainability of resource recovery from hazardous Zn-bearing dusts from electric arc furnace steelmaking. *Sustainability*. 2025;17(6):2773. <https://doi.org/10.3390/su17062773>