FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 10, Number 3, Autumn, (2025)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

Management and Applications of Artificial Intelligence for Environmental Pollution Control at Steel Industry

Mohammad Hossein Sayadi*[1], Zahra Simaei[2], Sara Emami[3]

*1. Full Professor, Department of Environment, Shahid Bahonar University of Kerman
2. Undergraduate student, Department of Environment, Shahid Bahonar University of Kerman
3. Visiting Professor, Department of Environment, Shahid Bahonar University of Kerman
*Email Address: Mh_sayadi@uk.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:
2025/07/02
Revised Date:
2025/07/11
Accepted Date:
2025/07/15
Published Date:
2025/09/30

Keywords:
Reducing Environmental Pollution,
Air pollution,
Novel Technologies,
Process Optimization,
Sustainable Development,
Machine Learning.

ABSTRACT

The steel industry, as one of the fundamental pillars of the global economy, faces numerous challenges, including environmental pollution, especially air pollution. This industry contributes significantly to greenhouse gas emissions and air and water pollution. Recent research shows that the use of new technologies, especially artificial intelligence, can help improve environmental conditions and reduce pollution. The study aims to investigate the application of artificial intelligence in reducing air pollution and improving sustainability in the steel industry. This research seeks to identify opportunities in this field and provide suggestions for investment and improving environmental conditions. This study is a descriptive analytical and library type that used the scientific databases Science Direct to collect articles related to artificial intelligence, the steel industry, and environmental pollution. In total, 550 articles were selected and reviewed as primary sources. The results show that artificial intelligence can help optimize production processes, predict maintenance, and quality control in the steel industry. This technology helps reduce the negative impacts of the steel industry on the environment, especially air pollution, by identifying sources of pollution and predicting trends. Steel companies also use artificial intelligence to optimize processes and reduce environmental pollution, especially air pollution and waste. The use of modern technologies and artificial intelligence also improves product quality, reduces environmental pollution, and reduces costs; therefore, investing in this area can help improve environmental conditions and increase efficiency in the steel industry, leading to a reduction in air pollution.

Cite this article: Mohammad Hossein Sayadi, Zahra Simaei, Sara Emami (2025). Management and Applications of Artificial Intelligence in Air Pollution Control in Steel Industry , Journal of Environmental Sciences Studies, 10 (3), Pages 10583-10594.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Given the challenges and opportunities in the steel industry, this study seeks to identify effective solutions to reduce the negative impacts of steel production on the environment. It also examines how to invest in new technologies and improve data infrastructure to contribute to sustainable development and reduce air pollution. The use of artificial intelligence as a key tool in strategic management and process optimization can lead to improved environmental conditions and increased quality of life in communities related to the steel industry. The purpose of this study is to investigate the application of artificial intelligence in reducing air pollution and improving sustainability in the steel industry.

Materials and methods

This study is a systematic library and descriptive analytical study. In this study, with the aim of analyzing the conceptual structure of research related to artificial intelligence in the steel industry and sustainable development, VOS viewer software (version 1.6.20) was used to visualize and analyze bibliometric data. Articles were searched in the Science Direct database. The following combination of keywords was used for the search: Steel industry, artificial intelligence, sustainable development, environmental pollution, air pollution, water pollution, soil pollution. The search period was set between 2022 and 2026 (including published articles and articles in the pre-publication stage). A total of 550 articles, including research and review articles, were extracted and fed to the software. Using the keyword co-occurrence analysis technique, VOSviewer software automatically identified and clustered 71 frequently occurring keywords from these articles. The analysis was conducted based on 8 outputs from the aforementioned site. The result of the analysis was drawn as a network of keywords and semantic connections between them.

Results and discussion

The steel industry has significant environmental impacts, including air, water, and soil pollution. Steelmaking furnaces, especially blast furnaces and electric arc furnaces, are major sources of greenhouse gas emissions and other pollutants. These furnaces produce carbon dioxide, carbon monoxide, and nitrogen oxides, which contribute to climate change and health problems. In addition, industrial wastewater containing toxic chemicals and heavy metals can contaminate groundwater and soil resources, posing a threat to public health. Artificial intelligence, as a new tool, can play a significant role in reducing these negative impacts. Using advanced algorithms and big data analytics, artificial intelligence can help optimize production processes, predict maintenance, and control quality. This technology identifies sources of pollution, predicts trends, and optimizes processes, which in turn leads to reduced waste and improved environmental performance. Companies like ArcelorMittal and Tata Steel are using AI to optimize processes, predict equipment replacement times, and control emissions. These measures help reduce energy consumption and improve product quality. For example, ArcelorMittal uses machine learning algorithms to analyze dust data and determine the optimal time to collect it. In addition, the use of modern wastewater treatment technologies and environmental management systems can help reduce pollution and improve environmental conditions. AI can also help raise awareness among workers and managers about complying with environmental standards. Overall, AI, as a powerful tool in the steel industry, can help reduce pollution and waste and help companies improve their environmental performance. This approach not only helps protect the environment, but can also lead to increased productivity and reduced costs.

Conclusion

This article examines the application of artificial intelligence in the steel industry and its impact on reducing environmental pollution. Artificial intelligence helps optimize production processes by identifying and managing sources of pollution. Using machine learning algorithms and sensors, industries can analyze and monitor data related to pollutant emissions. These measures not only help reduce air pollution and improve public health, but also increase the competitiveness and efficiency of the steel industry in the global market. Investment in artificial intelligence technologies can be a successful model for other industries.

مجله مطالعات علوم محیط زیست
جلد ۱۰، شماره ۳
Journal Homepage:www.jess.ir
شاپای چاپی: 2588-6851 شاپای الکترونیکی: 2645-520X

FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

مدیریت و کاربرد های هوش مصنوعی جهت کنترل آلودگی های محیط زیست در صنعت فولاد

محمد حسین صیادی *[۱]، زهرا سیمایی [۲]، سارا امامی [۳]

*۱- استاد تمام گروه محیطزیست، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲-دانشجوی کارشناسی گروه محیطزیست، ، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۳-استاد مدعو گروه محیطزیست، دانشگاه شهید باهنر کرمان
*ایمیل نویسنده مسئول: Mh_sayadi@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۴/۱۱
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۴/۰۴/۲۰
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۴/۲۴
تاریخ انتشار:
۱۴۰۴/۰۷/۰۸

کلید واژه ها:
کاهش آلودگی محیط زیست،
آلودگی هوا،
فناوری های نوین،
بهینه سازی فرآیند،
توسعه پایدار،
یادگیری ماشین .

چکیده

صنعت فولاد به‌عنوان یکی از ارکان اساسی اقتصاد جهانی، با چالش‌های متعددی از جمله آلودگی محیطزیست و به‌ویژه آلودگی هوا روبرو ا ست. این صنعت سهم قابل‌توجهی در انت شار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های هوا و آب دارد. تحقیقات اخیر ن شان می‌دهد که با به‌کارگیری فناوری‌های نوین، به‌ویژه هوش مصـنوعی، می‌توان به بهبود شـرایط محیطی و کاهش آلودگی کمک کرد. هدف این مطالعه بررسی کاربرد هوش مصنوعی در کاهش آلودگی هوا و بهبود پایداری در صنعت فولاد است. این تحقیق به دنبال شناسایی فرصت‌های موجود در این زمینه و ارائه پیشنهاداتی برای سرمایه‌گذاری و بهبود شرایط محیط زیستی است. این مطالعه از نوع تحلیلی تو صیفی و کتابخانه‌ای ا ست که از پایگاه داده علمی ساینس دایرکت برای جمع‌آوری مقالات مرتبط باهوش مصنوعی، صنعت فولاد و آلودگی محیط زیستی استفاده شده است. در مجموع، ۵۵۰ مقاله به‌عنوان منابع اصلی انتخاب و برر سی شدند. نتایج ن شان می‌دهد که هوش م صنوعی می‌تواند به بهینه سازی فرایندهای تولید، پیش‌بینی نگهداری و کنترل کیفیت در صنعت فولاد کمک کند. این فناوری با شنا سایی منابع آلودگی و پیش‌بینی روندها، به کاهش تأثیرات منفی صنعت فولاد بر محیطزیسـت، به‌ویژه آلودگی هوا، کمک می‌کند. همچنین، شـرکت‌های فولادی از هوش مصـنوعی برای بهینه‌سـازی فرایندها و کاهش آلودگی‌های محیط زی ستی خ صو صاً آلودگی هوا و پ سماند ا ستفاده می‌کنند. ا ستفاده از فناوری‌های نوین و هوش مصـــنوعی بهبود کیفیت محصـــولات، کاهش آلودگی محیط زیســـتی و کاهش هزینه‌ها را نیز به همراه دارد؛ بنابراین، سـرمایه‌گذاری در این حوزه می‌تواند به بهبود شـرایط محیط زیسـتی و افزایش کارایی در صـنعت فولاد کمک کند و به کاهش آلودگی هوا منجر شود.

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI: 10.22034/jess.2025.532225.2386

۱-مقدمه

صنعت فولاد یکی از پایه‌های اصلی اقتصاد و صنعت کشورها است. این صنعت همواره با مشکلات متعددی مانند افزایش هزینه‌ها، افزایش کیفیت، مصرف بالای انرژی، وابستگی به منابع فسیلی، رقابت جهانی، چالش‌های اقتصادی و همچنین نیاز روزافزون به نوآوری روبرو بوده است که بااین‌حال یکی از مشکلات بزرگ آن، آلودگی محیط‌زیست است که سبب تخریب منابع طبیعی و آلودگی هوا، آب‌وخاک است. همچنین، مصرف بالای انرژی، هزینه‌ها را افزایش داده و نیازمند مدیریت و کنترل جدی است (Al Mubarak et al., 2024). ایران در حال حاضر با تولید ۳۱ میلیون تُن فولاد خام جزء ۱۰ کشور برتر دنیا است و طبق سند چشم انداز ۱۴۰۵میزان تولید فولاد ایران در این سال باید به ۶۰ میلیون تن برسد. در ایران نیز معادن و صنایع فولادی یکی از ارکان اصلی تولید و توسعه صنعتی شده است. با توجه به رشد سریع این صنعت، چالش‌های محیط زیستی متعددی نیز به وجود آمده است. Tan و همکاران در تحقیقی به بررسی چالش‌های محیط زیستی در صنعت آهن و فولاد پرداخته و نشان دادند که این صنعت سهم قابل‌توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های هوا و آب در چین دارد. پژوهشگران در این مطالعه به دنبال راه‌هایی برای کاهش هم‌زمان انتشار کربن و آلودگی‌ها در این صنعت بوده‌اند. آن‌ها به بررسی اقداماتی پرداخته‌اند که می‌توانند ترکیب مواد اولیه ساختار فناوری و اندازه صنعت را تنظیم کنند. نتایج نشان داده که تحت سناریوی استفاده بیشتر از پسماند فولادی می‌توان تا سال ۲۰۲۵ شاهد کاهش ۸,۷٪ تا ۱۱,۷٪ در انتشار کربن و ۲۰٪ تا ۳۱٪ در انتشار آلودگی‌ها (به جز ذرات معلق) بود. در این میان، نسبت استفاده از پسماند فولادی و نسبت کوره‌های قوس الکتریکی نقش مهمی در افزایش هم‌افزایی کاهش انتشار کربن و آلودگی ایفا می‌کنند. این مطالعه نشان می‌دهد که با اتخاذ رویکردهای هوشمندانه در مدیریت مواد اولیه و فناوری‌ها، می‌توان به طور هم زمان به کاهش انتشار کربن و آلودگی‌ها در صنعت آهن و فولاد دست‌یافت. این موضوع می‌تواند به پایداری محیط زیستی این صنعت کمک کند (Tan et al., 2024). Badea و همکاران در سال ۲۰۲۴ به بررسی تأثیرات بهداشتی و محیط زیستی ناشی از آلاینده‌های تولید شده در فرایند تولید فولاد با استفاده از کوره قوس الکتریکی می‌پردازد. این تحقیق به تحلیل پیامدهای منفی آلاینده‌ها بر سلامت کارگران و محیط‌زیست می‌پردازد و درعین‌حال مزایای فناوری کوره قوس الکتریکی را در کاهش گازهای گلخانه‌ای و استفاده از پسماند آهن معرفی می‌کند. محققان در این مقاله به چالش‌های مربوط به جمع‌آوری مؤثر آلاینده‌ها از فرایند تولید فولاد اشاره کرده و پیشنهاداتی برای بهبود دستگاه‌های مدیریت آلاینده‌ها ارائه می‌دهند. این دستگاه‌ها نه‌تنها به کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری کمک می‌کنند، بلکه کارایی تولید را نیز بهبود می‌بخشند. کشورهای مختلف و سازمان‌های بین‌المللی در تلاش‌اند تا راه‌حل‌هایی برای کاهش اثرات منفی این صنعت ارائه دهند (Do Oyejobi et al., 2024). هوش مصنوعی در صنعت فولاد نقش کلیدی در بهبود عملکرد محیط زیستی ایفا می‌کند. این فناوری با پیش‌بینی آلودگی و بهینه‌سازی فرایندها به کاهش مصرف انرژی، تولید فاضلاب‌های آلوده و پسماند کمک می‌کند (Cairone et al., 2024). علاوه بر این، دستگاه‌های پایش و کنترل هوشمند با استفاده از فناوری‌های سنجش، امکان پایش مستمر کیفیت هوا و آب در اطراف کارخانه‌های فولاد را فراهم کرده و به شناسایی سریع مشکلات و اتخاذ تدابیر لازم کمک می‌کنند (Wani et al., 2024).در پژوهش Shang و همکارانش در سال ۲۰۲۴ پی بردند که هوش مصنوعی می‌تواند نقش بسیار مهمی در کاهش آلودگی محیط زیستی در صنایع چین ایفا کند. این پژوهشگران با جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مربوط به آلودگی در صنایع مختلف، مدل‌های اقتصادی و محیط زیستی را برای شبیه‌سازی تأثیرات هوش مصنوعی ایجاد کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند در بهینه‌سازی فرایندهای تولید، کاهش مصرف انرژی، پیش‌بینی نیازهای انرژی و مدیریت منابع نقش داشته باشد. همچنین، جایگزینی کارهای دستی و تکراری با دستگاه‌های هوش مصنوعی نه‌تنها باعث افزایش کارایی می‌شود، بلکه به کاهش آلودگی نیز کمک می‌کند. محققان اگرچه به چالش‌های پیاده‌سازی هوش مصنوعی در صنایع چین اشاره کرده‌اند؛ اما پتانسیل بالای این فناوری برای کاهش آلودگی و بهبود شرایط محیط زیستی را مطرح کرده‌اند. آن‌ها پیشنهاداتی برای سرمایه‌گذاری و آموزش نیروی کار در این زمینه ارائه داده‌اند. به‌طورکلی این مطالعه نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند نقش مهمی در کاهش آلودگی محیط زیستی در صنایع چین ایفا کند و استفاده از این فناوری می‌تواند به پایداری محیط‌زیست کمک کند.استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند به بهبود نظارت محیط زیستی و ارائه راهکارهای مؤثر برای چالش‌های محیط زیستی کمک کند (خلیلی و همکاران، ۱۴۰۲ ؛ فیض اله زاده اردبیلی و همکاران ۱۴۰۱). نتایج این تحقیق حاکی از آن است که هوش مصنوعی باعث افزایش دقت و سرعت در نظارت بر محیط‌زیست شده و می‌تواند راهکارهای مفیدی برای مدیریت چالش‌های محیط زیستی ارائه دهد. بااین‌حال محققان تأکید می‌کنند که برای استفاده کامل از پتانسیل‌های هوش مصنوعی در این زمینه نیاز به همکاری‌های بین‌المللی بهبود زیرساخت‌های داده و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین وجود دارد (Wani et al., 2024)؛ بنابراین با فناوری هوش مصنوعی می‌توان با ایجاد یک محیط کار ایمن و کاهش اثرات منفی تولید فولاد بر سلامت کارگران و محیط‌زیست و مدیریت راهبردی مؤثر می‌توان به بهبود شرایط کاری و کاهش تأثیرات منفی تولید فولاد دست‌یافت(Badea et al., 2024) . هدف از

انجام این مطالعه بررسی کاربرد هوش مصنوعی در کاهش آلودگی هوا و بهبود پایداری در صنعت فولاد است که باتوجه‌به چالش‌ها و فرصت‌های موجود، سرمایه‌گذاری در این حوزه‌ها بتواند به بهبود شرایط محیط زیستی "کاهش آلودگی هوا" و توسعه پایدار کمک کند.

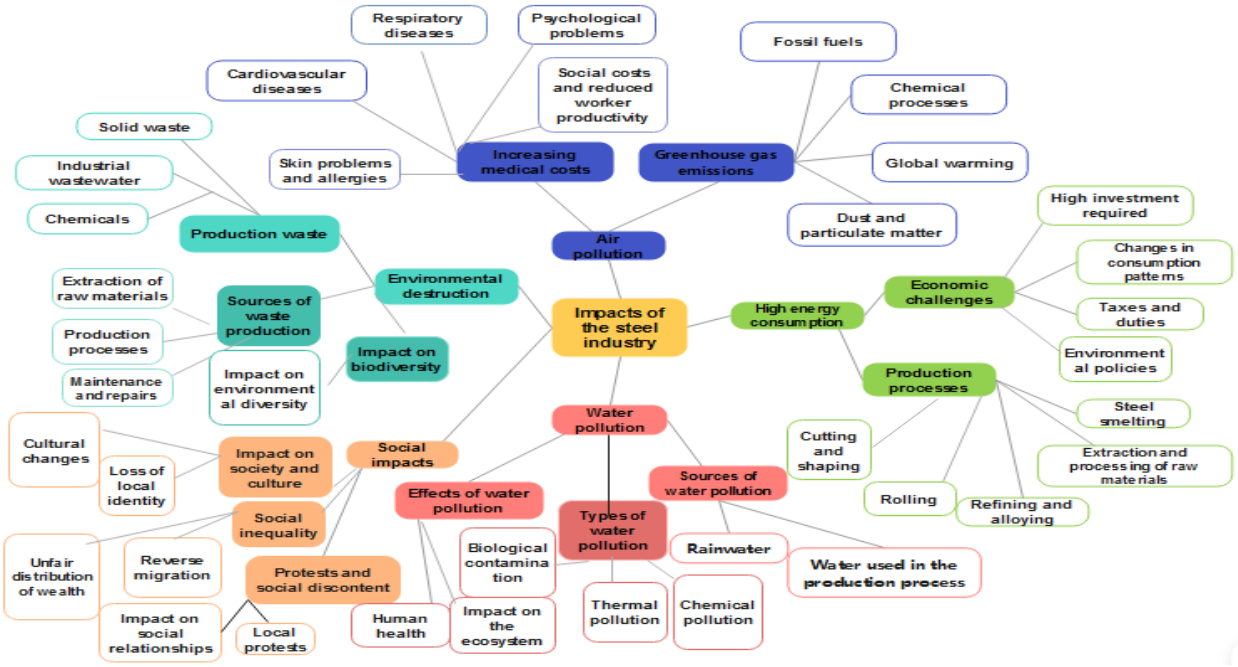
۲-روش انجام تحقیق

این مطالعه از نوع مطالعات سیستماتیک کتابخانه‌ای و تحلیلی توصیفی است. در این مطالعه، با هدف تحلیل ساختار مفهومی پژوهش‌های مرتبط با هوش مصنوعی در صنعت فولاد و توسعه پایدار، از نرم‌افزار VOS viewer (نسخه ۱٫۶٫۲۰) برای مصورسازی و تحلیل داده‌های کتاب‌سنجی استفاده شد. جستجوی مقالات در پایگاه داده‌ی Science Direct انجام شد. برای جستجو، از ترکیب کلمات کلیدی زیر استفاده شد: Steel industry, artificial intelligence, sustainable development, environmental pollution, air pollution, water pollution, soil pollution. دوره زمانی جستجو بین سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۶ تنظیم شد (شامل مقالات منتشرشده و مقالات در مرحله پیش‌انتشار). در مجموع ۵۵۰ مقاله شامل مقالات پژوهشی و مروری استخراج و به نرم‌افزار داده شد. نرم‌افزار VOSviewer با استفاده از تکنیک تحلیل هم‌رخدادی کلمات کلیدی، به‌صورت خودکار ۷۱ کلمه کلیدی پرتکرار را از میان این مقالات شناسایی و خوشه‌بندی کرد. تحلیل انجام‌شده بر مبنای خروجی‌های ۸تایی از سایت مذکور انجام شده است. نتیجه تحلیل به‌صورت شبکه‌ای از کلمات کلیدی و ارتباطات معنایی میان آن‌ها ترسیم شد.

۳- نتایج و بحث

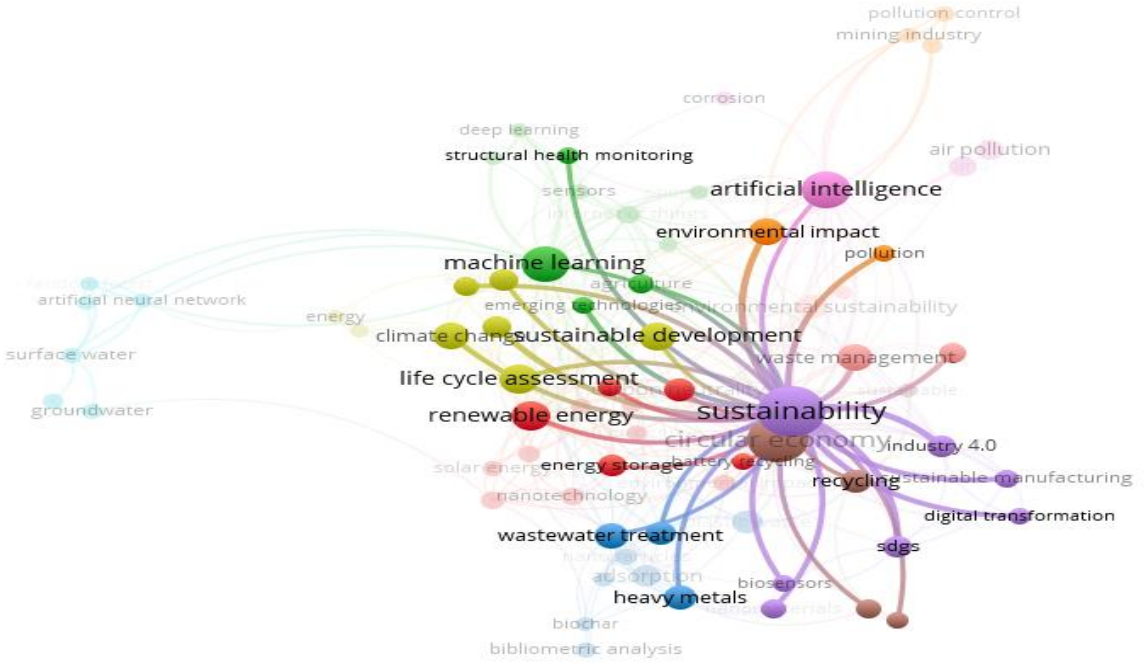
- **تاثیرات صنعت فولاد بر محیط زیست**

کوره‌های تولید فولاد نقش مهمی در فرآیند تولید دارند و بسته به نوع محصول انتخاب می‌شوند کوره‌های بلند برای تولید چدن و کوره‌های قوس الکتریکی و ذوب برای فولاد با کیفیت بالا استفاده می‌شوند. این کوره‌ها باعث چالش‌های محیط زیستی مانند آلودگی هوا و تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شوند که می‌توانند تأثیرات منفی بر سلامت و محیط زیست داشته باشند. (Zitscher et al., 2025). بیشترین منابع انتشار مربوط به کوره بلند، کوره قوس الکتریکی و فرایندهای پیش‌پردازش و آلاینده غالب ذرات معلق و دی‌اکسید کربن، سپس آلاینده‌های مونوکسید کربن و اکسیدهای گوگرد و نیتروژن محسوب می‌گردند(Wang et al., 2023).شکل ۱ تأثیرات صنعت فولاد بر محیط زیست و جامعه را نشان می‌دهد. موضوعات مختلفی مانند آلودگی هوا و آب، تغییرات اقلیمی، مشکلات اقتصادی و اجتماعی به شکل مرتبط با یکدیگر ترسیم شده‌است این تصویر پیچیدگی و ابعاد گوناگون تأثیرات صنعت را به خوبی منعکس می‌کند. آلودگی آب و خاک نیز از معضلات ناشی از کوره‌های تولید فولاد است؛ آب مورد استفاده در فرآیند تولید ممکن است حاوی مواد شیمیایی و فلزات سنگین باشد که در صورت نشت، به آلودگی منابع آب زیر زمینی منجر می‌شود. فاضلاب‌های صنعتی در صنعت فولاد به عنوان یک چالش جدی محیط زیستی، شامل مواد شیمیایی سمی و فلزات سنگین هستند که عدم مدیریت صحیح آن‌ها می‌تواند به آلودگی منابع آب و تخریب زیستگاه‌ها منجر شود. این آلودگی‌ها همچنین تهدیدی برای سلامت عمومی به شمار می‌آیند (Jagaba et al., 2024). ترکیبات سمی موجود در فاضلاب‌های صنعتی می‌توانند به راحتی وارد زنجیره غذایی شوند و اثرات مخربی بر روی موجودات زنده و انسان‌ها داشته باشند. پروسه‌های تصفیه ناکافی و عدم رعایت استانداردهای محیط زیستی نیز به تشدید این مشکلات کمک می‌کند(Wu et al., 2024). استفاده از فناوری‌های نوین تصفیه فاضلاب و پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت محیط زیست، همراه با آگاهی‌رسانی به صنایع و جامعه، می‌تواند به کاهش آلودگی و بهبود شرایط محیط زیستی و سلامت عمومی کمک کند. (Sahoo et al., 2024). همچنین، مواد زائد و سرباره‌ها می‌توانند به خاک نشت کرده و سلامت اکوسیستم و زنجیره غذایی را تهدید کنند (Tasev et al., 2025). چالش‌های دیگر صنعت فولاد شامل فشار زیادی بر منابع طبیعی و همچنین خطرات ایمنی مانند حوادث کاری و آسیب‌های جسمی به کارگران است. (Onifade et al., 2024). همچنین، تأثیرات اجتماعی ناشی از فعالیت‌های صنعتی، از جمله جابجایی جوامع محلی و تغییرات در ساختار اجتماعی، نیز می‌تواند به عنوان یک چالش جدی مطرح شود(Adnan et al., 2024).



شکل ۱: مخاطرات و تاثیرات محیط زیستی صنعت فولاد(Bhambri et al., 2024)

تحلیل خوشه‌بندی کلمات کلیدی نیز نشان داد که در سال‌های اخیر، پژوهش‌های مربوط به کاربرد هوش مصنوعی در صنعت فولاد و توسعه پایدار به‌طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفته‌اند (شکل ۲). در نمودار ترسیمی، واژه‌ی sustainability به‌عنوان برجسته‌ترین کلمه کلیدی شناسایی شد که بیانگر تمرکز غالب پژوهش‌ها بر رویکردهای پایداری در صنعت است. در ادامه، کلمات environmental impact ، machine learning و artificial intelligence در مرکز خوشه اصلی قرار دارند که نشان می‌دهد توجه قابل‌توجهی به مدل‌های یادگیری ماشین و فناوری‌های نوین دیجیتال در راستای تحقق اقتصاد چرخشی در صنعت فولاد معطوف شده است. مفاهیم مهم متصل به این خوشه نمایانگر گستردگی ابعاد پژوهش‌ها در زمینه آلودگی‌های زیست‌محیطی، فناوری‌های دیجیتال و نقش کشورهای پیشرو در این حوزه هستند. به‌طور کلی، این تحلیل کتاب‌سنجی نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء و یادگیری ماشین در مسیر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و ارتقاء کارایی زیست‌محیطی صنعت فولاد، به‌ویژه در چارچوب توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی به‌عنوان یک روند رو به رشد در پژوهش‌های جهانی تثبیت شده است. این روند می‌تواند به سیاست‌گذاران، صنعت‌گران و پژوهشگران کمک کند تا با بهره‌گیری از این فناوری‌ها، استراتژی‌هایی کارآمدتر و هم‌راستا با اهداف توسعه پایدار طراحی کنند.



شکل۲. تحلیل همزمان هوش مصنوعی و آلودگی های محیط زیست با استفاده از تصویرسازی VOS Viewer

- **ضرورت استفاده از هوش مصنوعی**

هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و تحلیل داده‌های کلان، به بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، پیش‌بینی نگهداری و کنترل کیفیت در صنعت فولاد کمک می‌کند. این فناوری نوین می‌تواند به افزایش بهره‌وری و کاهش پسماند در این صنعت منجر شود (Bhambri., 2024). هوش مصنوعی با بهینه‌سازی فرآیندها، پیش‌بینی نگهداری و کنترل کیفیت در صنعت فولاد، موجب بهبود کیفیت محصولات، کاهش هزینه‌ها و جلوگیری از خرابی‌های ناگهانی می‌شود. این فناوری همچنین به بهینه‌سازی موجودی، پیش‌بینی تقاضا، ارتقای ایمنی و تصمیم‌گیری‌های بهتر در بخش تحقیق و توسعه کمک می‌کند. (Ugbebor et al., 2024). علاوه بر مزایای قبلی هوش مصنوعی با شناسایی منابع آلودگی، پیش‌بینی روندها و بهینه‌سازی فرآیندها، به کاهش تأثیرات منفی صنعت فولاد بر محیط زیست نیز کمک می‌کند (Naji et al., 2024). در مجموع هوش مصنوعی به عنوان ابزاری قدرتمند در صنعت فولاد نقش بسیار مهمی در کاهش آلودگی‌ها و پسماندها ایفا می‌کند. این فناوری به شرکت‌ها کمک می‌کند تا عملکرد محیط زیستی خود را بهبود ببخشند و به استانداردهای محیط زیستی پایبند باشند. برای مثال الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند به پیش‌بینی میزان آلودگی هوا و آب در فرآیند تولید فولاد کمک کنند. این امر به نوبه خود به کاهش تأثیرات منفی صنعت فولاد بر محیط زیست منجر می‌شود. و همچنین استفاده از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرآیند تولید فولاد نتایج مثبتی داشته است(Krzywanski et al., 2024).

- **هوش مصنوعی در کنترل آلاینده ها**

مدیریت داده‌های کلان و تجزیه و تحلیل آنها با استفاده از یادگیری عمیق نیز می‌تواند به شناسایی الگوهای آلودگی و ارزیابی تأثیرات محیط زیستی صنعت فولاد کمک کند. (Benzidia et al., 2024). هوش مصنوعی با توسعه ابزارهای آموزشی می‌تواند به افزایش آگاهی کارگران و مدیران در صنعت فولاد درخصوص کاهش آلودگی و رعایت استانداردهای محیط زیستی کمک کند. (Syed,. 2024). استفاده از هوش مصنوعی در پایش، کنترل و مدیریت آلودگی‌های محیط زیستی در صنعت فولاد نه تنها به بهبود عملکرد محیط زیستی ، بلکه به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری نیز منجر شده و انتظار می‌رود که این کاربردها در آینده بیشتر توسعه یابند. (Ramakrishna & Ramasubramanian., 2024). این روند نه تنها به نفع محیط زیست است، بلکه می‌تواند به افزایش سودآوری و رقابت‌پذیری شرکت ها نیز کمک نماید(Dehkordi et al., 2024).

- **کاربرد هوش مصنوعی در کنترل آلاینده های محیط زیستی صنعت فولاد**

شرکت ArcelorMittal با استفاده از هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تحلیل داده‌های تولید، قادر به بهینه‌سازی فرآیندها، پیش‌بینی زمان‌های تعویض تجهیزات و تنظیمات بهینه هستند که منجر به کاهش پسماند و مصرف انرژی می‌شود. (Gajdzik & Wolniak., 2021). شرکت‌های فولاد ArcelorMittal و Tata Steel از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی فرآیندها، پیش‌بینی تعویض تجهیزات و پایش و کنترل خودکار آلودگی استفاده می‌کنند که منجر به کاهش پسماند، مصرف انرژی و بهبود عملکرد محیط زیستی می‌شود. (Gajdzik& Wolniak., 2021). POSCO نیز از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه گاز استفاده می‌کند. این سیستم‌ها می‌توانند تنظیمات را به صورت خودکار بر اساس کیفیت گاز ورودی تغییر دهند و در نتیجه از تولید آلودگی جلوگیری کنند(Qian et al., 2024). شرکت Nippon Steel نیز با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی، شرایط عملیاتی جذب گازهای آلاینده را بهینه‌سازی کرده است. این روش به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی کمک می‌کند و به تبع آن، آلودگی را کاهش می‌دهد(Sultana& Rao., 2025). شرکت Steel Dynamicsاز تحلیل داده‌های بزرگ و الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای شناسایی الگوهای آلودگی و پیش‌بینی تغییرات کیفیت هوا استفاده می‌کند. این اطلاعات به شرکت کمک می‌کند تا اقدامات پیشگیرانه‌ای برای کاهش آلاینده های محیط زیستی انجام دهد(Chertov.,2003). این مثال‌ها نشان می‌دهند که چگونه شرکت‌های فولاد با به کارگیری هوش مصنوعی می‌توانند به بهبود عملکرد محیط زیستی خود پرداخته و پسماندها را کاهش دهند. این رویکرد نه تنها به حفظ محیط زیست کمک می‌کند، بلکه به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها نیز منجر می‌شود.

شکل ۳: تحلیل کاربرد های هوش مصنوعی در بهبود فرآیند های صنعت فولاد(Ghobakhloo et al., 2024)

شکل ۳ به صورت گرافیکی میزان تاثیر کاربرد فناوری نوین هوش مصنوعی در کاهش مصرف انرژی، کاهش آلودگی، بهبود مدیریت پسماند، افزایش بهره وری و کیفیت محصول تا مدیریت ریسک ها و مدیریت زنجیره تامین را مورد بررسی قرار می دهد. این موارد بیانگر این است که صنعت فولاد چگونه با بهره گیری از این فناوری به دنبال بهبود مشکلات زیست محیطی است. شکل ۳ نشان می دهد چگونه هوش مصنوعی میتواند بر جنبه های مختلف این صنعت تاثیر گذار باشد. از بهینه سازی فرآیند ها و مدیریت زنجیره تامین گرفته تا بهبود و افزایش کیفیت محصولات،کنترل آلاینده های محیط زیستی و کاهش هزینه ها نقش دارد.

- **کنترل آلودگی هوا در صنایع فولاد با استفاده از هوش مصنوعی**

هوش مصنوعی می‌تواند به بهبود کنترل آلودگی هوا در صنعت فولاد کمک کند به‌ویژه از طریق پیش‌بینی زمان تعویض فیلترهای هپا شرکت Tata Steel از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تعیین زمان مناسب تعویض این فیلترها بر اساس داده‌های کیفیت هوا و میزان آلودگی استفاده می‌کند. فیلترهای هپا به دلیل کارایی بالا در حذف ۹۹,۹۷ درصد از ذرات معلق در محیط‌های صنعتی اهمیت زیادی دارند. (Mahajan,. 2025). فیلترهای هپا از الیاف ریز و متراکم تشکیل شده‌اند که به‌صورت تصادفی کنار هم قرار گرفته‌اند و فضایی برای به دام انداختن ذرات معلق در هوا ایجاد می‌کنند (Seesaard& Kamjornkittikoon., 2024). فیلترهای هپا نیاز به نگهداری و تعویض منظم دارند تا کارایی و جریان هوا حفظ شود. این فیلترها به‌عنوان راهکار مؤثری برای بهبود کیفیت هوا و کاهش آلودگی شناخته می‌شوند. استفاده از هوش مصنوعی در بهینه‌سازی عملکرد این فیلترها می‌تواند به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های نگهداری کمک کرده و به ایجاد محیط زیستی سالم‌تر و پایدارتر منجر شود. (Zhang et al., 2025). شرکت ArcelorMittal، یکی از تولیدکنندگان فولاد جهان، در سال ۲۰۰۶ از ادغام Arcelor و Mittal Steel تأسیس شد. این شرکت در بیش از ۶۰ کشور فعالیت می‌کند و به تولید انواع فولاد، از جمله فولاد ساختمانی و ضد زنگ، می‌پردازد. ArcelorMittal بر نوآوری و تحقیق و توسعه تمرکز دارد و از هوش مصنوعی برای تحلیل داده‌های گرد و غبار و تعیین زمان بهینه جمع‌آوری آن استفاده می‌کند. این شرکت همچنین به دنبال کاهش تأثیرات محیط زیستی تولید فولاد و بهینه‌سازی مصرف انرژی است و با مشارکت در پروژه‌های زیرساختی و گسترش فعالیت‌های خود، به یکی از رقابتی‌ترین شرکت‌ها در صنعت فولاد تبدیل شده است (Montequin & Oliveira., 2024). شرکتNippon Steel ، یکی دیگر از تولیدکنندگان فولاد جهان، از مدل‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی جذب گازهای آلاینده استفاده می‌کند. این فناوری به کاهش تأثیرات محیط زیستی و بهبود کیفیت هوا کمک می‌کند. مدل‌های هوش مصنوعی در این شرکت به پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرآیند جذب گازهایی مانند دی‌اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن کمک می‌کنند و با تحلیل داده‌های تاریخی و جاری، الگوهای پیچیده‌ای را شناسایی می‌کنند. این فناوری به اپراتورها اجازه می‌دهد تا شرایط عملیاتی را بهینه‌سازی کنند و زمان‌های اوج تولید و شرایط جوی را پیش‌بینی کنند. Nippon Steel همچنین به دنبال توسعه راهکارهای پایدار و کاهش تأثیرات محیط زیستی تولید فولاد است و با سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه،

فناوری‌های جدیدی را شناسایی و پیاده‌سازی می‌کند. به‌طور کلی، استفاده از هوش مصنوعی در این شرکت به بهبود کیفیت محصولات و افزایش کارایی تولید کمک می‌کند (Zaind et al., 2024). شرکتPOSCO یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان فولاد جهان از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه گاز و کاهش تأثیرات محیط زیستی استفاده می‌کند. این سیستم‌ها به‌طور خودکار تنظیمات تصفیه را بر اساس کیفیت گاز ورودی تغییر می‌دهند و با تجزیه و تحلیل داده‌های سنسورها قادر به پیش‌بینی تغییرات کیفیت گاز هستند. این رویکرد به کاهش زمان‌های توقف و افزایش کارایی کمک می‌کند. علاوه بر این POSCO با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین الگوهای پیچیده در داده‌های کیفیت گاز را شناسایی کرده و مصرف انرژی را بهینه‌سازی می‌کند. این استراتژی به شرکت کمک می‌کند تا به تولید پایدار دست یابد هزینه‌ها را کاهش دهد و به الزامات قانونی و نیازهای مشتریان پاسخ دهد. به‌طور کلی POSCO با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین به بهبود کیفیت محصولات و حفاظت از محیط زیست توجه دارد (Sambodo et al., 2024 & Lee & Ahn., 2025). شرکتThyssenkrupp تولیدکنندگان فولاد و فناوری‌های صنعتی، از مدل‌های یادگیری ماشین برای شناسایی و مدیریت منابع بوی نامطبوع استفاده می‌کند. این مدل‌ها با تجزیه و تحلیل داده‌های سنسورهای مختلف، مانند ترکیب شیمیایی و شدت بوها، قادر به شناسایی دقیق منابع بوی نامطبوع هستند. مدل‌های یادگیری ماشین به‌طور خودکار روش‌های کنترل بو را بهینه‌سازی کرده و به اپراتورها اجازه می‌دهند تا به‌طور پیشگیرانه با تحلیل داده‌های تاریخی، زمان‌های احتمالی بروز بوی نامطبوع را پیش‌بینی کنند. این اقدامات به بهبود کیفیت هوای محیط کار و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند. علاوه بر این، Thyssenkrupp به دنبال بهینه‌سازی مصرف انرژی در تجهیزات کنترل بو است. به‌طور کلی، این رویکرد به بهبود کیفیت محیط کار و کاهش تأثیرات محیط زیستی کمک کرده و به شرکت این امکان را می‌دهد که به نیازهای مشتریان و الزامات قانونی پاسخ دهد. (Ogundipe., 2023). شرکت United States Steelدر ایالات متحده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی سیستم‌های تهویه مطبوع در کارخانه‌های خود استفاده می‌کند. این سیستم‌ها با جمع‌آوری داده‌های حسگرها درباره دما، رطوبت و آلاینده‌ها، به‌طور خودکار کیفیت هوای داخلی را مدیریت می‌کنند .ویژگی کلیدی این سیستم‌ها، توانایی پیش‌بینی نیازهای تهویه است. به‌عنوان مثال در صورت افزایش سطح دی‌اکسید کربن سیستم به‌طور خودکار تنظیمات تهویه را تغییر می‌دهد تا هوای تازه‌تری وارد شود. این اقدام به بهبود کیفیت هوا و کاهش خطرات بهداشتی کمک می‌کند .علاوه بر این الگوریتم‌های هوش مصنوعی به کاهش مصرف انرژی سیستم‌های تهویه کمک می‌کنند. با تحلیل داده‌ها این سیستم‌ها می‌توانند تنظیمات بهینه را پیدا کنند و در نتیجه هزینه‌های عملیاتی و اثرات کربنی را کاهش دهند. به‌طور کلی استفاده از این فناوری‌ها این امکان را می‌دهد که کیفیت هوای داخلی را بهبود بخشد رفاه کارکنان را افزایش دهد و به اهداف محیط زیستی خود دست یابد (Bazazzadeh et al., 2025). شرکتSteel Dynamics در ایالات متحده از تحلیل داده‌های بزرگ و الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای شناسایی الگوهای آلودگی و پیش‌بینی تغییرات کیفیت هوا استفاده می‌کند. این رویکرد به مدیریت مؤثر تأثیرات زیست محیطی تولید و بهبود کیفیت هوا در مناطق اطراف کارخانه‌ها کمک می‌کند. تحلیل داده‌های بزرگ به این شرکت امکان جمع‌آوری و تحلیل اطلاعات مربوط به آلاینده‌ها، دما و شرایط جوی را می‌دهد. الگوریتم‌های یادگیری عمیق با شناسایی الگوهای پیچیده قادر به پیش‌بینی زمان‌های افزایش آلودگی هستند و به شرکت اجازه می‌دهند اقدامات پیشگیرانه‌ای را برای کاهش تأثیرات منفی انجام دهد. با شناسایی منابع آلودگی، می‌توان بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و بهبود تجهیزات کنترل آلودگی را انجام دهد. این شرکت همچنین با ارائه داده‌های دقیق و پیش‌بینی‌های معتبر ارتباط بهتری با مقامات محلی و سازمان‌های محیط زیستی برقرار می‌کند. این رویکرد کمک می‌کند تا کیفیت محصولات را بهبود بخشد و به الزامات قانونی و نیازهای مشتریان پاسخ دهد، در حالی که به حفاظت از محیط زیست نیز توجه دارد. (Ganguly et al., 2025 & Azman et al., 2025). شرکتArcelorMittal یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان فولاد در جهان از مدل‌های پیش‌بینی برای بهینه‌سازی فرآیند بازیافت گاز استفاده می‌کند. این سیستم‌ها به‌طور خودکار تنظیمات را تغییر می‌دهند تا بازدهی بازیافت گاز افزایش یابد و تأثیرات محیط زیستی کاهش یابد. مدل‌های پیش‌بینی با تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به ترکیب شیمیایی گازها، دما، فشار و شرایط عملیاتی، الگوهای خاصی را شناسایی می‌کنند. این سیستم‌ها می‌توانند نیازهای بازیافت گاز را در زمان‌های مختلف پیش‌بینی کرده و تنظیمات تجهیزات را به‌طور خودکار تغییر دهند تا از حداکثر ظرفیت بازیافت استفاده شود. علاوه بر این این مدل‌ها به کاهش مصرف انرژی در فرآیند بازیافت کمک می‌کنند. با تحلیل داده‌ها سیستم‌ها می‌توانند بهینه‌ترین تنظیمات را پیدا کنند و در نتیجه هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهند و به اهداف محیط زیستی شرکت برسند. استفاده از فناوری‌های نوین کمک می‌کند تا کیفیت محصولات را بهبود بخشد و به الزامات قانونی و نیازهای مشتریان پاسخ دهد در حالی که به حفاظت از محیط زیست نیز توجه دارد. (Van Caneghem et al., 2010). این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت هوش مصنوعی در صنعت فولاد و پتانسیل‌های آن برای بهبود فرآیندها و افزایش بهره‌وری است.

۴. چشم انداز تحقیقات آینده

چشم‌انداز آینده برای کنترل آلودگی های محیط زیست از جمله آلودگی هوا با استفاده از هوش مصنوعی امیدوارکننده است، با کاربرد هوش مصنوعی انقلابی در نظارت، تنظیم مقررات و مشارکت عمومی ایجاد خواهد شد. با افزایش قابلیت‌های نظارت در زمان واقعی، هوش مصنوعی می‌تواند داده‌های حسگرهای مختلف را برای ردیابی کیفیت هوا و پیش‌بینی سطح آلودگی بر اساس روندهای تاریخی و عوامل محیطی تجزیه و تحلیل کند. علاوه بر این، هوش مصنوعی می‌تواند با ارائه مداخلات هدفمند برای صنایع و بهبود سیستم‌های مدیریت ترافیک برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای وسایل نقلیه، استراتژی‌های کنترل انتشار را بهینه کند. ادغام هوش مصنوعی با دستگاه‌های اینترنت اشیاء، برنامه‌ریزی شهری هوشمندتر و پاسخ‌های خودکار به رویدادهای آلودگی را تسهیل می‌کند. لازم به ذکر است، برای تحقق کامل مزایای هوش مصنوعی در مبارزه با آلودگی هوا، باید به چالش‌هایی مانند کیفیت داده‌ها، نگرانی‌های اخلاقی و هزینه‌های اجرا رسیدگی شود. در مجموع، تلاش‌های مشترک بین دولت‌ها، صنایع و جوامع برای استفاده مؤثر از هوش مصنوعی در این حوزه حیاتی ضروری خواهد بود. پروژه‌های پیشنهادی برای مدیریت و کنترل آلودگی هوا با استفاده از هوش مصنوعی در معادن و صنایع فولاد شامل توسعه سیستم‌های هوشمند نظارت بر کیفیت هوا، مدیریت انتشار گازهای آلاینده، و تحلیل داده‌های محیط زیستی است. این سیستم‌ها با استفاده از حسگرهای پیشرفته و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، قادر به جمع‌آوری و تحلیل لحظه‌ای داده‌ها هستند تا وضعیت آلودگی را به‌طور دقیق رصد کنند. همچنین، طراحی پلتفرم‌های دیجیتال برای افزایش آگاهی جامعه محلی در مورد آلودگی هوا و اثرات آن، و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید به‌منظور کاهش آلودگی، و اثرات آن و افزایش بهره‌وری از دیگر جنبه‌های این پروژه‌ها به شمار می‌رود. این اقدامات می‌توانند به بهبود کیفیت هوا و کاهش اثرات منفی آلودگی در معادن و صنایع فولاد کمک شایانی نمایند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کاربرد هوش مصنوعی در صنعت فولاد و تأثیر آن بر کاهش آلودگی محیط‌زیست بررسی شده است. باتوجه‌به معضلات جدی که این صنعت در زمینه آلودگی محیط‌زیست خصوصاً آلودگی هوا دارد، کاربرد هوش مصنوعی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در بهینه‌سازی فرایندها و کاهش آلودگی‌های محیط زیستی مطرح شود. هوش مصنوعی به صنایع فولاد کمک می‌کند تا منابع آلودگی‌های محیط زیستی را شناسایی و مدیریت کنند. با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، می‌توان به تحلیل داده‌های مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای و دیگر آلاینده‌ها پرداخت. این تحلیل‌ها به صنایع اجازه می‌دهد تا نقاط ضعف در فرایندهای تولید را شناسایی کرده و اقداماتی برای کاهش انتشار آلاینده‌ها اتخاذ کنند. استفاده از حسگرها و سیستم‌های هوش مصنوعی برای نظارت بر کیفیت هوا و شناسایی آلاینده‌ها در زمان واقعی می‌تواند به کاهش اثرات منفی بر محیط‌زیست کمک کند. این سیستم‌ها می‌توانند به‌صورت خودکار واکنش نشان دهند و راهکارهایی برای کاهش آلاینده‌ها ارائه دهند. کاهش آلودگی هوا نه‌تنها به حفظ محیط‌زیست کمک می‌کند، بلکه تأثیرات مثبتی بر سلامت عمومی نیز دارد. با کاهش انتشار گازهای سمی و ذرات معلق، می‌توان از بروز بیماری‌های تنفسی و دیگر مشکلات بهداشتی جلوگیری کرد. این امر به بهبود کیفیت زندگی ساکنین مناطق صنعتی و اطراف آنها منجر خواهد شد؛ بنابراین، سرمایه‌گذاری در تحقیق‌وتوسعه فناوری‌های هوش مصنوعی در صنعت فولاد، نه‌تنها به حفظ محیط‌زیست کمک خواهد کرد، بلکه می‌تواند به افزایش رقابت‌پذیری و کارایی این صنعت در بازار جهانی منجر شود. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان یک الگوی موفق برای سایر صنایع نیز مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- Adnan, M., Xiao, B., Ali, M. U., Bibi, S., Yu, H., Xiao, P., & An, X. 2024. Human inventions and its environmental challenges, especially artificial intelligence: New challenges require new thinking. Environmental Challenges, 100976.
- Al Mubarak, F., Rezaee, R., & Wood, D. A. 2024. Economic, societal, and environmental impacts of available energy sources: a review. Eng, 5(3), 1232-1265.
- Azman, M. S. M., Mansor, A. A., Ahmad, A. N., Ismail, M., Jarkoni, M. N. K., & Abdullah, S. 2025. Physio-chemical indoor air quality analysis and CO_2 ventilation forecasting using artificial neural networks in boat manufacturing. Natural and Life Sciences Communications, 24(1), e2025014.
- Badea, D. O., Trifu, A., & Darabont, D. C. 2024. 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, 14(1), 9916.
- Bazazzadeh, H., Hoseinzadeh, S., Mohammadi, M. M., & Garcia, D. A. 2025. AI-aided surrogate model for prediction of HVAC optimization strategies in future conditions in the face of climate change. Energy Reports, 13, 1834-1845.

- Benzidia, S., Bentahar, O., Husson, J., & Makaoui, N. 2024. Big data analytics capability in healthcare operations and supply chain management: the role of green process innovation. Annals of Operations Research, 333(2), 1077-1101.
- Bhambri, P., Rani, S., Khang, A., & Soni, R. 2024. AI-Driven Digital Twin and Resource Optimization in Industry 4.0 Ecosystem. In AI-Driven Digital Twin and Industry CRC Press.4.0 (pp. 182-201).
- Cairone, S., Hasan, S. W., Choo, K. H., Lekkas, D. F., Fortunato, L., Zorpas, A. A., ... & Naddeo, V. 2024. Revolutionizing wastewater treatment toward circular economy and carbon neutrality goals: Pioneering sustainable and efficient solutions for automation and advanced process control with smart and cutting-edge technologies. Journal of Water Process Engineering, 63, 105486.
- Chertov, A. D. 2003. Use of Artificial Intelligence Systems in the Metallurgical Industry (Survey). Metallurgist, 47.
- Dehkordi, M. M., Nodeh, Z. P., Dehkordi, K. S., Khorjestan, R. R., & Ghaffarzadeh, M. 2024. Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: Sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods. Results in Engineering, 102729.
- Gajdzik, B., & Wolniak, R. 2021. Transitioning of steel producers to the steelworks 4.0—Literature review with case studies. Energies, 14(14), 4109.
- Ganguly, S., Mukherjee, H., Dhar, A., Marciano, M., & Roy, K. 2025. SPolDB: an audio dataset for artificial intelligence-based identification of noise pollutants. International Journal of Environmental Science and Technology, 1-18.
- Jagaba, A. H., Lawal, I. M., Birniwa, A. H., Affam, A. C., Usman, A. K., Soja, U. B., ... & Yaro, N. S. A. 2024. Sources of water contamination by heavy metals. In Membrane Technologies for Heavy Metal Removal from Water (pp. 3-27). CRC Press.
- Krzywanski, J., Sosnowski, M., Grabowska, K., Zylka, A., Lasek, L., & Kijo-Kleczkowska, A. 2024. Advanced computational methods for modeling, prediction and optimization—a review. Materials, 17(14), 3521.
- Lee, D., & Ahn, J. Y. 2025. Unlocking the potential of green human resource management in Korea: a comprehensive review. Asia Pacific Business Review, 31(1), 133-156.
- Mahajan, G., Price, B., & Davidow, M. 2025. Zero Complaints: The Path to Continuous Value Creation. CRC Press.
- Montequin, M. T. R., & Oliveira, L. C. P. 2024. Production and Management of Steel Coproducts. In Treatise on Process Metallurgy (pp. 297-339). Elsevier.
- Naji, K. K., Gunduz, M., & Al-Hababi, H. 2024. Mapping the Digital Transformation Maturity of the Building Construction Industry Using Structural Equation Modeling. Buildings, 14(9), 2786.
- Ogundipe, C. 2023. Clean maritime transport in the Nordic region: A focus on Finland, Sweden, Norway, and Denmark (Master's thesis).
- Onifade, M., Zvarivadza, T., Adebisi, J. A., Said, K. O., Dayo-Olupona, O., Lawal, A. I., & Khandelwal, M. 2024. Advancing toward sustainability: The emergence of green mining technologies and practices. Green and Smart Mining Engineering, 1(2), 157-174.
- Oyejobi, D. O., Firoozi, A. A., Fernandez, D. B., & Avudaiappan, S. 2024. Integrating circular economy principles into concrete technology: Enhancing sustainability through industrial waste utilization. Results in Engineering, 102846.
- Qian, Y., Li, Y., Hao, Y., Yu, T., & Hu, H. 2024. Greenhouse gas control in steel manufacturing: inventory, assurance, and strategic reduction review. Carbon Research, 3(1), 27.
- Ramakrishna, S., & Ramasubramanian, B. 2024. Sustainable Strategies for Oil and Gas and Steel Industries. In Handbook of Materials Circular Economy (pp. 65-95). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Sahoo, S., & Goswami, S. 2024. Theoretical framework for assessing the economic and environmental impact of water pollution: A detailed study on sustainable development of India. Journal of Future Sustainability, 4(1), 23-34.
- Sambodo, M. T., Silalahi, M., & Firdaus, N. 2024. Investigating technology development in the energy sector and its implications for Indonesia. Heliyon, 10(6).
- Seesaard, T., Kamjornkittikoon, K., & Wongchoosuk, C. 2024. A comprehensive review on advancements in sensors for air pollution applications. Science of The Total Environment, 175696.
- Shang, Y., Zhou, S., Zhuang, D., Żywiołek, J., & Dincer, H. 2024. The impact of artificial intelligence application on enterprise environmental performance: Evidence from microenterprises. Gondwana Research, 131, 181-195.
- Sultana, S. T., & Rao, T. V. N. 2025. Application of Artificial Intelligence in Business Management for Prudent Decision Making. Artificial Intelligence-Enabled Businesses: How to Develop Strategies for Innovation, 351-370.

- Syed, S. 2024. Sustainable Manufacturing Practices for Zero-Emission Vehicles: Analyzing the Role of Predictive Analytics in Achieving Carbon Neutrality. Utilitas Mathematica, 121, 333-351.
- Tan, Q., Liu, F., & Li, J. 2024. An Integrated Analysis on the Synergistic Reduction of Carbon and Pollution Emissions from China's Iron and Steel Industry. Engineering, 40, 111-121.
- Tasev, G., Makreski, P., Jovanovski, G., Životić, D., Boev, I., & Jelenkovic, R. 2025. The environmental and health damage caused by the use of coal. ChemTexts, 11(1), 1-20.
- Ugbebor, F., Aina, O. O., & Ugbebor, J. O. 2024. Computer vision applications for SMEs in retail and manufacturing to automate quality control and inventory management processes: Artificial Intelligence/Machine Learning Enhancements. Journal of Artificial Intelligence General science (JAIGS) ISSN: 3006-4023, 5(1), 460-500.
- Van Caneghem, J., Block, C., Cramm, P., Mortier, R., & Vandecasteele, C. 2010. Improving eco-efficiency in the steel industry: the ArcelorMittal Gent case. Journal of Cleaner Production, 18(8), 807-814.
- Wang, Y., Mathiesen, A., Dai, Y., Larsen, H. H., & Hanaoka, T. 2023. Greenhouse gas emissions of the iron and steel industry in China: a critical review. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 37, 100604.
- Wani, A. K., Rahayu, F., Ben Amor, I., Quadir, M., Murianingrum, M., Parnidi, P., & Latifah, E. 2024. Environmental resilience through artificial intelligence: innovations in monitoring and management. Environmental Science and Pollution Research, 31(12), 18379-18395.
- Wu, X., Nawaz, S., Li, Y., & Zhang, H. 2024. Environmental health hazards of untreated livestock wastewater: potential risks and future perspectives. Environmental Science and Pollution Research, 31(17), 24745-24767.
- Zaind, N., Mazlan, S. A., Aziz, S. A. A., Johari, M. A. F., Ubaidillah, U., Nordin, N. A., & Hanafiah, M. A. K. M. 2024. Deterioration behavior of aged magnetorheological elastomer under harsh marine environment. Express Polymer Letters, 18(7), 728-741.
- Zhang, X., Liu, P., Liu, G., Lim, S. H., Wan, M. P., Lisak, G., & Ng, B. F. 2025. An efficient strategy to enhance air filtration through the synergistic effects of ultrasonics and seed particles. Separation and Purification Technology, 353, 128600.
- Zitscher, T., Bullerdiek, N., & Kaltschmitt, M. 2025. Carbon—Classification, Sources, and Potentials. In Powerfuels (pp. 355-397). Springer, Cham.

-خلیلی, رضا , رستمی, محمد , منتصری, حسین , پروین نیا, محمد و بیات ورکشی, مریم ،۱۴۰۲، کاربرد مدل‌های هوشمند عصبی در پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب مخازن سدها (مطالعه موردی: سد اکباتان همدان) .مطالعات علوم محیط زیست، دوره ۸، شماره ۲، ص ۶۳۰۹-۶۳۰۰.

-فیض اله زاده اردبیلی, سینا , مرتضی, مغدید و نجفی, بهمن، ۱۴۰۱، کاربرد شبکه عصبی مصنوعی و روش سطح پاسخ در پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی و آلایندگی موتور دیزل دوگانه سوز در حضور افزودنی آب .مطالعات علوم محیط زیست، دوره ۷ شماره ۲، ص ۴۹۳۷- ۴۹۴۸.