پژوهش و فناوری محیط‌زیست، ۱۴۰۴،(۱۷)۱۰، ۱۳۵-۱۵۲

پژوهش و فناوری محیط‌زیست

وبگاه نشریه: www.journal.eri.acecr.ir

پژوهشکده محیط زیست

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۳۰۶۰

روش‌های ارزیابی اثرات صنایع فولاد بر محیط‌زیست در چارچوب (DPSIR)

منصوره عباسی[1]✉، سعید کریمی[2]

۱- دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی محیط‌زیست، گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست و HSE، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست و HSE، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۷/۱۳

دسترسی آنلاین:
۱۴۰۴/۰۸/۰۵

کلید واژه‌ها:
ارزیابی اثرات،
محیط‌زیست،
صنعت فولاد،
مدل DPSIR

چکیده

فولاد به دلیل خواص منحصر به فردی که دارد، یک ماده حیاتی در صنایع مدرن است. در دنیایی که به طور گسترده، نگرانی‌های فزاینده افزایش مصرف منابع وجود دارد، لازم است از شیوه‌های مناسبی استفاده شود تا به پایداری محیط‌زیستی، رفاه اجتماعی و منافع اقتصادی بینجامد. یکی از این راهکارها، ارزیابی اثرات محیط‌زیست به روش چرخه حیات است که محاسبه تأثیرگذاری آن با استفاده از پایگاه عمومی داده‌ها، می‌تواند چالش برانگیز باشد. پژوهش حاضر، با روش مرور اسنادی و مطالعه کتابخانه‌ای به تجزیه و تحلیل جامع ارزیابی اثرات صنعت فولاد در قالب کاربرد تلفیقی ارزیابی چرخه عمر-امرژی و جاپای‌کربن (LCA-Emergy-Carbon Footprint) پرداخت و به منظور تحلیل عوامل مؤثر بر وضعیت محیط‌زیستی صنعت مزبور با تکیه بر زنجیره علّی و معلولی، در چارچوب مدل (DPSIR) به ارائه پاسخ‌های مرتبط از جمله تدوین دستورالعمل ارزیابی اثرات صنایع بر محیط‌زیست تأکید نمود. سپس آسیب‌ها و چالش‌های این صنعت را در ابعاد اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی مورد آنالیز قرار داد و برای بهبود مستمر بهره‌وری منابع، ارتقای کیفیت محیط‌زیست و کارایی عملیاتی، به بیان رویکردهای نوین پایداری در این صنعت پرداخت. این رویکردها شامل اقدامات اساسی بر محور انرژی‌های پاک، فناوری صرفه‌جویی انرژی، سیستم عملیات هوشمند، مدیریت محیط‌زیست، استراتژی طراحی و اجرای پروژه‌های کم‌کربن است.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mns.abbasi@ut.ac.ir

Journal of Environmental Research and Technology

journal homepage: www.journal.eri.acecr.ir

Environmental Research institute

Online ISSN: 3060-2676

Methods for Assessing the Environmental Impacts of the Steel Industry within the DPSIR Framework

Mansoureh Abbasi[1]✉, Saeed Karimi[2]

1- PhD Student in Environmental Planning, Department of Environmental Planning and Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Assistant Professor, Department of Environmental Planning and Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received:
2025/07/02
Accepted:
2025/10/05
Available online:
2025/10/27

Keywords:
Environmental Impact Assessment,
Environment,
Steel Industry,
DPSIR Model

Abstract

Steel, due to its unique properties, is a vital material in modern industries. In a world, where there are growing concerns about increasing resource consumption, it is essential to adopt appropriate strategies that contribute to environmental sustainability, social welfare, and economic benefits. One of these strategies is the Life Cycle Assessment (LCA) approach; however, calculating environmental impacts using public databases can be challenging. This study, conducted through documentary review and library research, provides a comprehensive analysis of the environmental impacts of the steel industry using an integrated application of Life Cycle Assessment, Emergy, and Carbon Footprint (LCA–Emergy–Carbon Footprint). To identify and analyze the factors affecting the environmental performance of the steel industry, the study employs the Driver–Pressure–State–Impact–Response (DPSIR) framework and emphasizes the development of guidelines for assessing industrial impacts on the environment. The research further analyzes the main damages and challenges of the steel industry across social, economic, and environmental dimensions. To promote continuous improvement in resource efficiency, environmental quality, and operational performance, it presents new sustainability approaches for this sector. These approaches include measures based on clean energy development, energy-saving technologies, intelligent operation systems, environmental management, and strategies for designing and implementing low-carbon projects.

Corresponding author E-mail address: mns.abbasi@ut.ac.ir

مقدمه

فولاد پایه و اساس صنعتی شدن بشر است و نقش مهمی در حمایت و پشتیبانی از ساختارهای توسعه اقتصادی و اجتماعی دارد. با این حال، فرآیند تولید فولاد، باعث ایجاد اثرات منفی متعددی مانند کاهش منابع آب و آلودگی هوا می‌شود (Tolettini & Di Maria, 2023) که درنهایت مانع توسعه پایدار جامعه بشری می‌شود(Xu etal., 2022; Andreotti et al, 2023). بنابراین ظرفیت توسعه پایدار صنعت فولاد [1](SCSI) اهمیت می‌یابد که تحت تأثیر عوامل مختلفی ازجمله سطوح اقتصادی، فشار محیط‌زیستی، وضعیت صنایع، زیرساخت‌ها و سیاست‌ها قرار دارد و در کشورهای مختلف متفاوت است (Lin et al, 2021). میزان تولید فولاد خام جهان در سال ۲۰۲۴ به ۱۸۸۴ میلیون تن رسید و ایران با داشتن ۳۱ میلیون تن سالیانه، دهمین رتبه تولیدکنندگی فولاد جهان را در این سال به خود اختصاص داد (World Steel Association, 2024). صنعت فولاد یک بخش استراتژیک در دنیای مدرن و یک جزء حیاتی در بسیاری از اقتصادهای ملی است (Fan and Friedmann, 2021). انرژی قابل استفاده در تولید فولاد، اثرات محیط‌زیستی شکننده و قابل‌توجهی از جمله افزایش میزان انتشار کربن (Kappenthuler and Seeger, 2021; Mitra sinovic and Tomic, 2022) و عناصر آلیاژی فولاد تجدیدناپذیر صنعت را به دنبال دارد (Graedel et al., 2015). به طوری که، این صنعت همچنان مسئول انتشار بیش از یک چهارم CO_2 در سراسر جهان است و به همین دلیل سهم عمده‌ای نیز در تغییرات اقلیمی دارد (Poponi et al., 2016). بسیار مهم است که صنعت موصوف کم‌مصرف شود و به سمت فرآیندهای تولید پایدارتر با دیدگاه پایداری کل‌نگر حرکت کند (Broring et al., 2020; Falcone et al., 2019). تحقیقات در زمینه پایداری این صنعت بر بهبود بهره‌وری انرژی (He and Wang, 2017;)، کاهش انتشار CO_2 (Kildahl et al., 2023) و بازیافت ضایعات متمرکز شده است (Wang et al., 2018). بطوری که استفاده از مواد تجدیدپذیر و محصولات زیست نوآورانه، می‌توانند برای کمک به این هدف، امیدوارکننده باشند و درنتیجه توسعه پایدار را تقویت نمایند (Falcone et al., 2019; Toppinen et al., 2020).

محققان در سال‌های اخیر با انتشار مفاهیم گسترده در زمینه توسعه پایدار، توسعه پایدار صنعتی را با اهداف توسعه پایدار همسو و مرتبط دانسته‌اند. آنها بر لزوم توسعه هماهنگ پایدار صنعت با اقتصاد، جامعه و محیط‌زیست تأکید و بررسی می‌کنند که چگونه تحول صنعتی و نوآوری می‌تواند توسعه پایدار را نتیجه دهد. در این راستا مقالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. مثلاً زیمک و همکاران (۲۰۲۲)[2] در مقاله‌ای با عنوان مبادلات پایداری در صنعت فولاد به بررسی اثرات اجتماعی بالقوه تغییرات تولید (گذار اقتصاد زیستی) در یک کارخانه فولاد در بلژیک با استفاده از روش تجزیه و تحلیل ورودی-ستانده چند منطقه‌ای (MRIO) به تحقیق و مطالعه پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد مبادلات پایداری، تأثیرات مثبت و منفی توأمان دارند؛ به گونه‌ای که بهبود در یک جنبه (به عنوان مثال، محیط‌زیست) می‌تواند منجر به وجود اثرات منفی در جنبه دیگر (به عنوان مثال، اجتماعی) شود و درنهایت با استمرار این مبادلات، پایداری اتفاق می‌افتد.

در پژوهش دیگری که توسط گیتیرز و همکاران (۲۰۲۴)[3] انجام شد، به بررسی ترکیب سیستماتیک ارزیابی چرخه عمر گریدهای فولادی برای تحلیل ارزیابی آثار محیط‌زیستی مواد فولادی در طول چرخه عمر آن‌ها اقدام و امکان محاسبات منسجم اثرات محیط‌زیستی هر گرید فولاد، با توجه به ترکیب آن فراهم شد. نتایج نشان داد محاسبات خاصی بر اساس ترکیبات فولادی برای تصمیم‌گیری آگاهانه درخصوص انتخاب مواد، لازم است. بنابراین علاوه بر اثرات اجتماعی این صنعت، توجه به موقعیت مکانی و شرایط محلی هر واحد صنعتی بر پایه روش به کار گرفته شده، اهمیت دارد. فنته و سِگو (۲۰۲۴)[4] در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی اثرات محیط‌زیستی فرآیند تولید میله‌های تقویت‌کننده فولاد با مواد قراضه، به استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر در صنایع فلزی اتیوپی بر مبنای روش ارزیابی چرخه عمر (LCA) پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد، استفاده از انرژی‌های

[1] Sustainable Development Capacity of the Steel Industry
[2] Zimek et al., 2022
[3] Gutierrez et al., 2024
[4] Fente & tsegaw et al.,2024

تجدیدپذیر و سیستم‌های حمل و نقل فله، مزایای قابل توجهی در کاهش اثرات محیط‌زیستی دارد. کنیلماز و همکاران (۲۰۲۳)[1] در مقاله‌ای با عنوان استفاده مجدد از فولاد در صنعت ساختمان‌سازی با تأکید بر چالش‌ها و فرصت‌ها به بررسی اقدامات کاهش انتشار کربن مرتبط با تولید فولاد و فرآیندهای ساخت‌وساز در قالب استفاده مجدد از عناصر سازه‌ای آن پرداختند. همچنین با استفاده از فناوری‌های دیجیتالی و هوش مصنوعی، به بررسی موانع موجود اقدام و راه‌حل‌هایی برای رفع آن‌ها، پیشنهاد کردند. نتایج این تحقیق نشان داد ترویج شیوه‌های استفاده مجدد، به منظور کاهش اثرات محیط‌زیستی ناشی از ساخت و ساز فولاد اهمیت دارد.

بدیا و همکاران (۲۰۲۴)[2] در مقاله‌ای با عنوان مطالعه تطبیقی اثربخشی اقدامات کنترل آلاینده‌های صنعت فولاد با هدف کاهش مواجه آلاینده‌ها در محیط کار و محیط‌زیست به مطالعه پرداختند. در این پژوهش، به اقدامات بسیاری از کارخانجات فولادسازی درخصوص استفاده از فناوری کوره قوس الکتریک (EAF)[3] اشاره و بر اهمیت بازیافت فولاد و نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تأکید شد. نتایج تحقیق به معرفی یک راه‌حل پیشرفته اقتصادی برای مدیریت آلاینده‌ها اشاره داشت که این سیستم شامل اتصالات استوانه‌ای، مبدل حرارتی برای خنک کردن گازها و یک هود برای جمع‌آوری آلاینده‌ها بود. نیو و همکاران(۲۰۲۳)[4] نیز در مقاله‌ای با عنوان تأثیرات صنعت فولاد بر آلودگی رسوبات فلزات سنگین در سیستم آب شهری یک منطقه تولید سنگ آهن چینی پرداختند. نتایج نشان داد غلظت فلزات سنگین رسوبات از مکانی به مکان دیگر متفاوت است. ژانگ و آسیتش(۲۰۲۵)[5] در مقاله‌ای به تجزیه و تحلیل امرژی با روش ارزیابی چرخه عمر و جاپای کربن پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد بهبود مستمر با تعهدات محیط‌زیستی، بهره‌وری منابع و کارایی عملیاتی ارتباط دارد. مهم‌ترین ویژگی این تحقیق، ارزیابی رابطه پویا بین تولید فولاد چین و محیط‌زیست است که با ارزش امرژی بوم‌شناختی و تحقیقات انتشار کربن در کل چرخه عمر صنعت فولاد نشان داده شد. شوی و همکاران (۲۰۲۳)[6] در مقاله دیگری با بررسی شاخص‌های ظرفیت پایدار در چارچوب DPSIR به ارزیابی پایداری صنعت فولاد، پرداختند و دریافتند که برای افزایش توسعه پایدار این صنعت لازم است هر کشور برنامه‌های توسعه مناسبی را بر اساس شرایط محلی تدوین کند.

به‌طور خلاصه، تحقیقات جهانی در مورد توسعه پایدار صنعتی از سوی دیدگاه‌های اقتصاد منابع و اقتصاد محیط‌زیست به سمت دیدگاه‌های توسعه پایدار تکامل یافته است. بنابراین، مطالعه توسعه پایدار صنعتی از شاخص‌های تک‌بعدی و تحقیقات تک‌رشته‌ای (بهره‌برداری از منابع و ظرفیت‌های زیستی) به سمت تحقیقات جامع تکاملی (اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی) توأم با انجام تحقیقات تکمیل روش‌های ارزیابی (سیستم‌های شاخص جامع) و کاربردها (ادغام مطالعات ارزیابی با برنامه‌ریزی منطقه‌ای، تدوین سیاست و مدیریت توسعه پایدار برای ارائه راهنمایی‌های مهم به دولت‌ها و تصمیم‌گیرندگان) گسترش یافته. در ایران، مطالعات ارزیابی اثرات محیط‌زیستی غالباً با یک روش خاص در مرحله احداث (میربلوکی و همکاران، ۱۳۹۷) یا تولید (رمضانی و همکاران، ۱۴۰۲) کارخانجات فولاد انجام شده که ارزیابی تک‌بعدی و تحقیقات تک‌رشته‌ای به شمار می‌رود. درخصوص کاربرد مدل DPSIR نیز به بررسی و تحلیل وضعیت کلی محیط‌زیست شهر تهران(محمدی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲) یا وضعیت محیط‌زیست شهر مشهد (اسدی، ۱۴۰۰) پرداخته شده است ولیکن در ارتباط با روش‌های جامع ارزیابی اثرات محیط‌زیست (ارزیابی چرخه عمر- امرژی و جاپای کربن) بر پایه مدل DPSIR در صنعت فولاد، زمینه مطالعاتی وجود ندارد. از این رو پژوهش حاضر با تمرکز بر دیدگاه سیستمی و بررسی روش‌های ارزیابی اثرات محیط‌زیست بر صنعت فولاد در چارچوب DPSIR به تحقیق و پژوهش پرداخت تا در بستر این چارچوب، ضمن بررسی جامع روش‌های ارزیابی اثرات محیط‌زیستی، به ارائه راهکارهای نوین جهانی پس از تحلیل اثرات و آسیب‌شناسی این صنعت بپردازد.

[1] Kanyilmaz et al., 2023
[2] Badea et al., 2024
[3] Electric Arc Furnace
[4] Niu et al., 2023
[5] Zhang & Asutosh, 2025
[6] Xu et al., 2023

مواد و روش‌ها

مدل[1] DPSIR یکی از ابزارهای کلیدی حمایت از تصمیم‌گیری است که در دهه‌های اخیر ایجاد شده و برای ارزیابی، مدیریت و برقراری ارتباط با تأثیر تغییرات سیاست محیط‌زیستی و مشکلات توأم با آن استفاده می‌شود(Gregory et al, 2005). صنعت فولاد، به عنوان یک سیستم پیچیده که شامل عوامل متعددی مانند محیط‌زیست، اقتصاد و جامعه است، نیاز به ساخت یک سیستم شاخص جامع، مرتبط و علمی برای تجزیه و تحلیل کمّی دارد. در سال ۱۹۹۷، آژانس محیط زیست اروپا (EEA) مدل DPSIR را پیشنهاد کرد که هدف آن تجزیه و تحلیل جامع مسائل محیط‌زیستی و ارتباط آنها با توسعه اجتماعی است. بنابراین مدل فوق، چارچوبی برای ارزیابی توسعه پایدار صنعت فولاد ارائه می‌دهد. این مدل یک چارچوب مفهومی است که تکامل و مکانیسم‌های بازخورد بین توسعه صنعتی و عوامل مؤثر در یک سیستم پیچیده را توصیف می‌کند. براساس مدل DPSIR، سیستم شاخص ارزیابی برای صنعت فولاد، روابط علی زیر را تشریح می‌کند: نیروهای محرکه (تقاضای نهفته) ⟶ فشارها بر سیستم (محیط طبیعی) ⟶ وضعیت (صنعت فولاد) ⟶ تأثیرات (آثار ناشی از توسعه صنعت فولاد) ⟶ پاسخ‌ها (اقدامات انجام شده توسط انسان برای مقابله با فشارها و تأثیرات است) (Xu etal., 2023).

این را می‌توان به صورت زیر بیان کرد: نیروهای محرکه بلندمدت (D) مانند شهرنشینی، تقاضای مصرف جمعیت و رشد اقتصادی، توسعه صنعت فولاد محلی را ارتقا می‌دهند، در حالی که عوارض جانبی ناشی از فرآیندهای تولید صنعت فولاد، فشارهایی (P) بر محیط طبیعی ایجاد می‌کنند که منجر به تغییراتی در وضعیت صنعت فولاد (S) می‌شود. تغییرات پایدار در وضعیت صنعت فولاد (S)، به نوبه خود، تأثیراتی (I) بر جامعه بشری دارد و واکنش‌های انسانی (R) را به تغییراتی در وضعیت (S) برمی‌انگیزاند. این پاسخ‌ها (R) با نیروهای محرکه (D)، فشارها (P) و وضعیت‌ها (S) تعامل دارند(Xu etal., 2023).

به عبارتی نیروی محرکه (D) شامل توسعه اجتماعی، ساخت اقتصادی و تقاضای انسانی است. فشارها (P) شامل انتشار آلودگی و مصرف منابع می‌شود. وضعیت (S) شامل جنبه‌هایی مانند تولید فولاد و واردات فولاد است. تأثیرات (I) شامل توسعه صنعتی و ساخت زیرساخت‌های مرتبط با صنعت فولاد است. پاسخ‌ها (R) به واکنش‌های سیاستی یا تکنولوژیکی انجام شده توسط تصمیم‌گیرندگان برای مقابله با اثرات نامطلوب اشاره دارد. ارزیابی ظرفیت توسعه پایدار صنعت فولاد بر اساس مدل DPSIR، مزایای جامع و ساختاریافته‌ای را ارائه می‌دهد و یک چارچوب ارزیابی یکپارچه و پشتیبان تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند. با این حال، این مدل دو محدودیت اساسی دارد. اول، در سطح داده‌ها، این مدل برای پشتیبانی از ساخت خود به مقدار قابل توجهی از داده‌هایی نیاز دارد که مستلزم در نظر گرفتن دسترسی داده‌ها و تداوم ارائه آنها در طول فرآیند ساخت مدل است. دوم، ذهنی بودن ارزیابی که از قضاوت‌های ذهنی دخیل در تعیین معیارهای ارزیابی مدل DPSIR ناشی می‌شود و به طور بالقوه منجر به نتایج ارزیابی ذهنی می‌شود. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، مطالعاتی انجام شده که سیستم شاخص ارزیابی علمی ایجاد می‌کند و از روش‌های کمّی‌سازی و اعمال ضرایب تغییرات برای به دست آوردن وزن‌های عینی با هدف افزایش عینیت و دقت در نتایج استفاده می‌کند (Xu etal., 2023).

روش‌های ارزیابی اثرات صنایع فولاد

در پژوهش حاضر، پایداری صنعت فولاد در قالب ارزیابی چرخه حیات، امرژی و جاپای کربن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه ارزیابی جامع اثرات محیط‌زیستی در استفاده از منابع و اثرات اجتماعی تولید فولاد می‌تواند مؤثر باشد و مبنای علمی دستیابی به مسیر پایدارتری تولید فولاد را فراهم نماید؛ ادغام روش‌ها نیز می‌تواند عوامل محیطی را در سراسر فرآیند تولید فولاد بررسی نموده و به کشف جریان‌ها و هزینه‌های انرژی کمک کند. همچنین به ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کمک می‌کند. ویژگی هر یک از روش‌های ارزیابی اثرات محیط‌زیستی صنعت فولاد در (جدول۱) آمده است.

[1] Drivers-Pressures-State-Impact-Response (DPSIR)

جدول (۱) روش‌های ارزیابی اثرات محیط‌زیستی صنایع فولاد (Zhang & Asutosh, 2025)

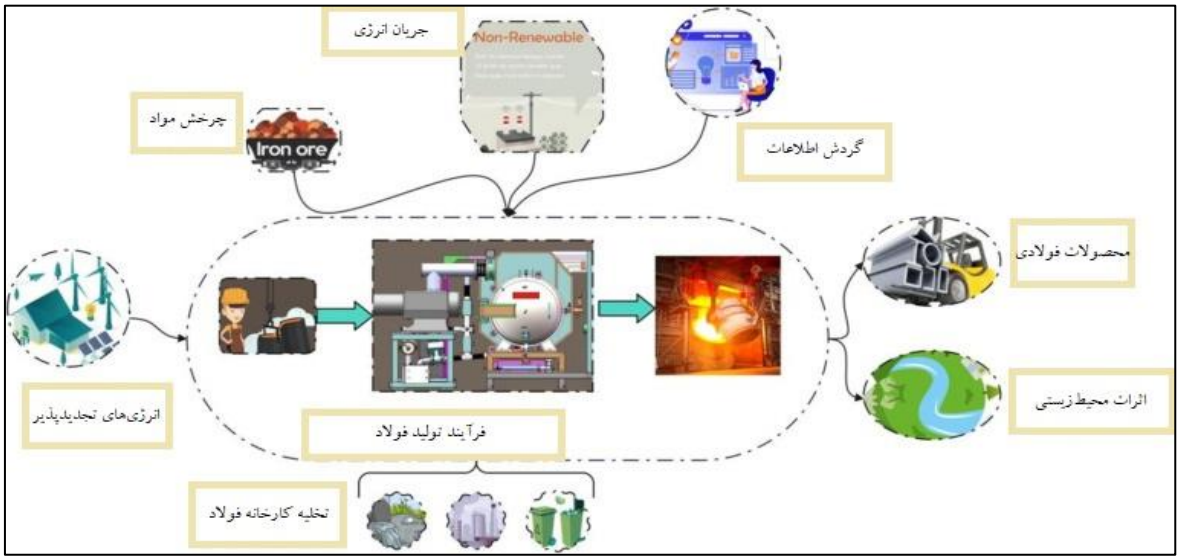
عنوان روش	ویژگی‌های روش
روش امرژی	روش امرژی عوامل اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی را طی ۵ مرحله به شرح ذیل در نظر گرفته و امکان ارزیابی جامع سیستم‌های تولید صنعتی را فراهم نموده و روابط متقابل منابع مختلف سیستم را آشکار می‌سازد. مراحل به شرح ذیل: مرحله (۱) ارزیابی و بهینه‌سازی منابع: ارزش و ورودی منابع مختلف (از جمله انرژی، مواد و غیره) در سیستم تعیین و به شناسایی منابع برای پایداری سیستم کمک می‌کند و در نتیجه استفاده مؤثر و بهینه‌سازی منابع هدایت می‌گردد. مرحله (۲) ارزیابی اثرات محیط‌زیستی: ارزیابی اثرات محیط‌زیستی سیستم‌های تولید صنعتی، از جمله مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای انجام و مبنای علمی کاهش بارهای محیطی را فراهم می‌نماید. مرحله (۳) پشتیبانی تصمیم: این روش می‌تواند به تصمیم گیرندگان در تدوین سیاست‌ها، برنامه‌ریزی و اقدامات مدیریتی کمک کند و توسعه سیستم‌های تولید صنعتی را به سمت جهت‌گیری پایدارتر ارتقا دهد. مرحله (۴) مقایسه و تبادل: یک رویکرد ارزیابی بین‌المللی شناخته می‌باشد که تبدیل داده‌ها از مناطق و سیستم‌های مختلف را به یک واحد تسهیل می‌کند و به تبادل تجربه، مقایسه و انتقال دانش در مناطق مختلف کمک می‌نماید. مرحله (۵) وجود دیدگاه بلند مدت: روش امرژی بر ماهیت کل نگر سیستم‌ها و توسعه بلندمدت تأکید دارد، به پیش‌بینی روندهای آینده سیستم‌ها کمک می‌کند، سیستم‌های تولید صنعتی را به سمت توسعه پایدار هدایت می‌کند و از اقدامات کوته‌بینانه اجتناب می‌کند. بنابراین، ارزیابی پایداری سیستم‌های تولید صنعتی با روش امرژی به درک عمیق‌تر عملیات سیستم، ارائه پشتیبانی علمی و مراجع تصمیم‌گیری برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار کمک می‌کند.
روش جا پای کربن	ارزیابی جاپای کربن بر انتشار گازهای گلخانه‌ای تولید شده توسط محصولات یا فعالیت‌ها متمرکز است و با کمی سازی انتشار کربن، به شناسایی نقاط داغ و کاهش اجزای انتشار کربن بالا کمک می‌کند؛ این امر برای رسیدگی به تغییرات اقلیمی بسیار مهم است و کاهش انتشار هدفمند آلایندگی را فعال می‌نماید(دارای اهمیت بسیار بالا برای صنعت فولاد). مراحل خاص این روش عبارتند از: (الف) تعریف محدوده: تعیین محدوده ارزیابی، از جمله تهیه مواد خام، تولید، حمل و نقل، مراحل استفاده و دفع زباله. (ب) جمع آوری داده‌ها: جمع آوری داده‌های مورد نیاز برای هر مرحله، از جمله مصرف انرژی، ورودی مواد، انتشار زباله و غیره. ج) محاسبه انتشار کربن: استفاده از ابزارها و روش‌های مربوطه برای محاسبه انتشار کربن برای هر مرحله و تبدیل داده‌ها به معادل‌های کربن. (د) تجزیه و تحلیل نتایج: تجزیه و تحلیل نتایج ارزیابی برای شناسایی منابع انتشار کربن اولیه و مناطق بهبود بالقوه. (ه) برنامه اقدام: توسعه تدابیر و استراتژی‌های خاص برای کاهش انتشار کربن بر اساس نتایج ارزیابی، مانند اتخاذ منابع انرژی پاک‌تر یا بهبود کارایی منابع (و) نظارت و گزارش: پایش منظم انتشار کربن، بهبود مداوم و ارزیابی نتایج همراه با گزارش‌های مستمر درخصوص کاهش اثرات انتشار به ذینفعان. از طریق ارزیابی چرخه عمر ردپای کربن، کارخانه های فولاد می‌توانند درک جامعی از انتشار کربن خود به دست آورند، شیوه‌های تولید سازگار با محیط‌زیست را ترویج کنند و به توسعه پایدار کمک کنند.
روش چرخه عمر	تأثیر محیط‌زیستی یک محصول را در کل چرخه عمر آن، از استخراج مواد خام گرفته تا تولید و استفاده و در نهایت امحاء آن را در نظر می‌گیرد. نوآوری این روش درخصوص ادغام کل چرخه عمر یک محصول در محدوده ارزیابی آن نهفته است.

با وجود روش‌های مختلف، تحقیقات صورت گرفته دارای محدودیت‌هایی نیز هستند. این کمبودها ممکن است پیامدهای منفی برای پایداری در زمینه‌های صنعتی داشته باشد. بنابراین برای رفع این کمبودها، از تحلیل امرژی [1](EMA) استفاده می‌شود. روش Emergy ابزاری مؤثر برای ارزیابی جامع پایداری محصولات سیستم‌های صنعتی است (شکل ۱). مزایای این روش عبارتند از: توانایی کمّی کردن منابع مختلف در یک واحد، در نظر گرفتن روابط متقابل بین عوامل بوم‌شناختی، اقتصادی و اجتماعی، کمک به آشکارسازی انرژی داخلی جریان‌های پیچیده، فرآیندهای تبدیل مواد در سیستم‌ها و ارائه اطلاعات پشتیبان و سیستمی به تصمیم‌گیرندگان. بنا به دلایل فوق، برای تعیین امرژی کل چرخه عمر سیستم صنعت فولاد، هفت نوع ورودی در نظر گرفته و تجزیه و تحلیل می‌گردد که در معادلات ذیل بیان شده است (جدول ۲). با این روش می‌توان تعادل بین استفاده از منابع، حفاظت از محیط‌زیست و توسعه صنعتی را هدایت و ایجاد کرد (Zhang & Asutosh, 2025).

[1] Emergy Analysis

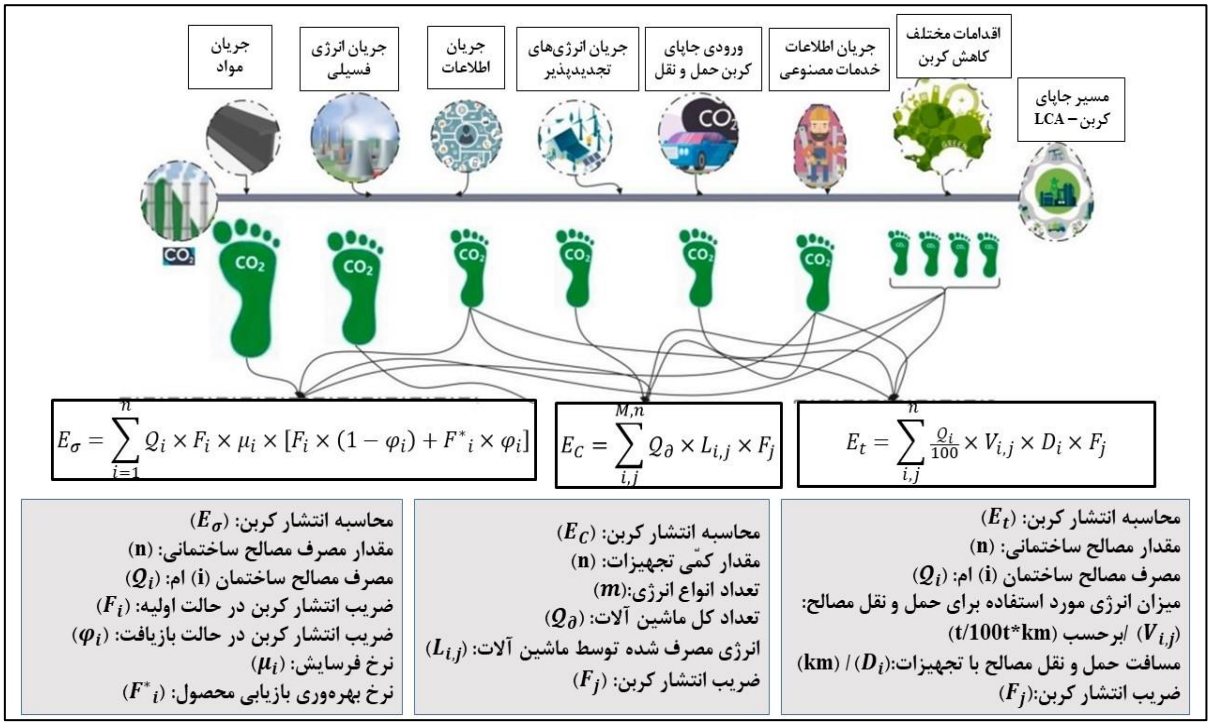
جدول (۲) محاسبات تعیین امرژی در کل چرخه عمر صنعت فولاد (Zhang & Asutosh, 2025)

ردیف	ورودی مدل	فرمول محاسباتی	توضیح پارامترهای مورد استفاده در معادلات
(۱)	مدل تابش خورشیدی	$E_{Solar} = A \times E_J \times (1-\omega) \times t_c \times T_{UEVs}$	E_{Solar} امرژی خورشیدی در فرآیند ساخت و ساز ؛ A سطح سایت ؛ E_J مقدار تابش خورشیدی [72] (3.5E+09 J/m2)؛ E_J آلبدو سطح (۰.۷)؛ t_c زمان ساخت و ساز ؛ T_{UEVs} مقادیر واحد امرژی است.
(۲)	مدل محاسبه جرم	$E_M = \sum_{i=1}^{n} Q_i T_{UEVs-mass}$	E_M امرژی جرمی ؛ Q_i مقدار جرم ؛ $T_{UEVs-mass}$ مقدار واحد امرژی است.
(۳)	مدل محاسبه برق	$E_{ele} = M_\delta - T_{UEVs-ele}$	E_{ele} امرژی الکتریکی در سیستم ساختمان؛ M_δ کمیت برق و $T_{UEVs-ele}$ مقدار واحد امرژی الکتریکی است.
(۴)	مدل امرژی آب (مرحله اول)	$E_{water} = V \times \rho \times G \times UEV_W$	در مرحله تخریب ساختمان و ساخت و ساز که E_{water} امرژی آب ؛ V حجم آب؛ ρ چگالی آب؛ G انرژی گیبس آب با میزان (۴.۹۲ J/g) و UEV_w تبدیل واحد آب است.
	مدل امرژی آب (مرحله دوم)	$F_{water} = V_0 \times N_0 \times T_0 \times \rho \times G \times UEV_W$	در مرحله بهره‌برداری که F_{water} امرژی آب در مرحله بهره‌برداری ساختمان است؛ V_0 حجم آب برای یک نفر در روز؛ N_0 تعداد کارکنان؛ T_0 مدت زمان کار کردن است.
(۵)	مدل امرژی سوخت دیزل	$E_{diesel} = \varsigma \times \zeta \times UEV_d$	E_{diesel} نشان دهنده امرژی سوخت دیزل است؛ ς مقدار روغن دیزل مورد استفاده در سیستم ساختمان است؛ ζ ارزش حرارتی سوخت دیزل و UEV_d مقدار واحد امرژی است.
(۶)	مدل محاسبه امرژی بنزین	$E_{gasoline} = \lambda \times \upsilon \times UEV_g$	$E_{gasoline}$ امرژی بنزین است؛ λ مقدار بنزین است؛ υ ارزش حرارتی و UEV_g مقدار واحد امرژی است.
(۷)	محاسبه امرژی نیروی انسانی	$H_{Human} = T_{Work} \times N_P \times w_d \times UEV_H$	E_{Human} امرژی نیروی انسانی؛ T_{work} زمان کار؛ N_P تعداد کارگران شاغل؛ W_d روز کاری؛ UEV_H مقدار واحد امرژی.



شکل (۱) دیاگرام مدل ارزیابی اثرات محیط‌زیست بر اساس محاسبات روش Emergy (Zhang & Asutosh, 2025)

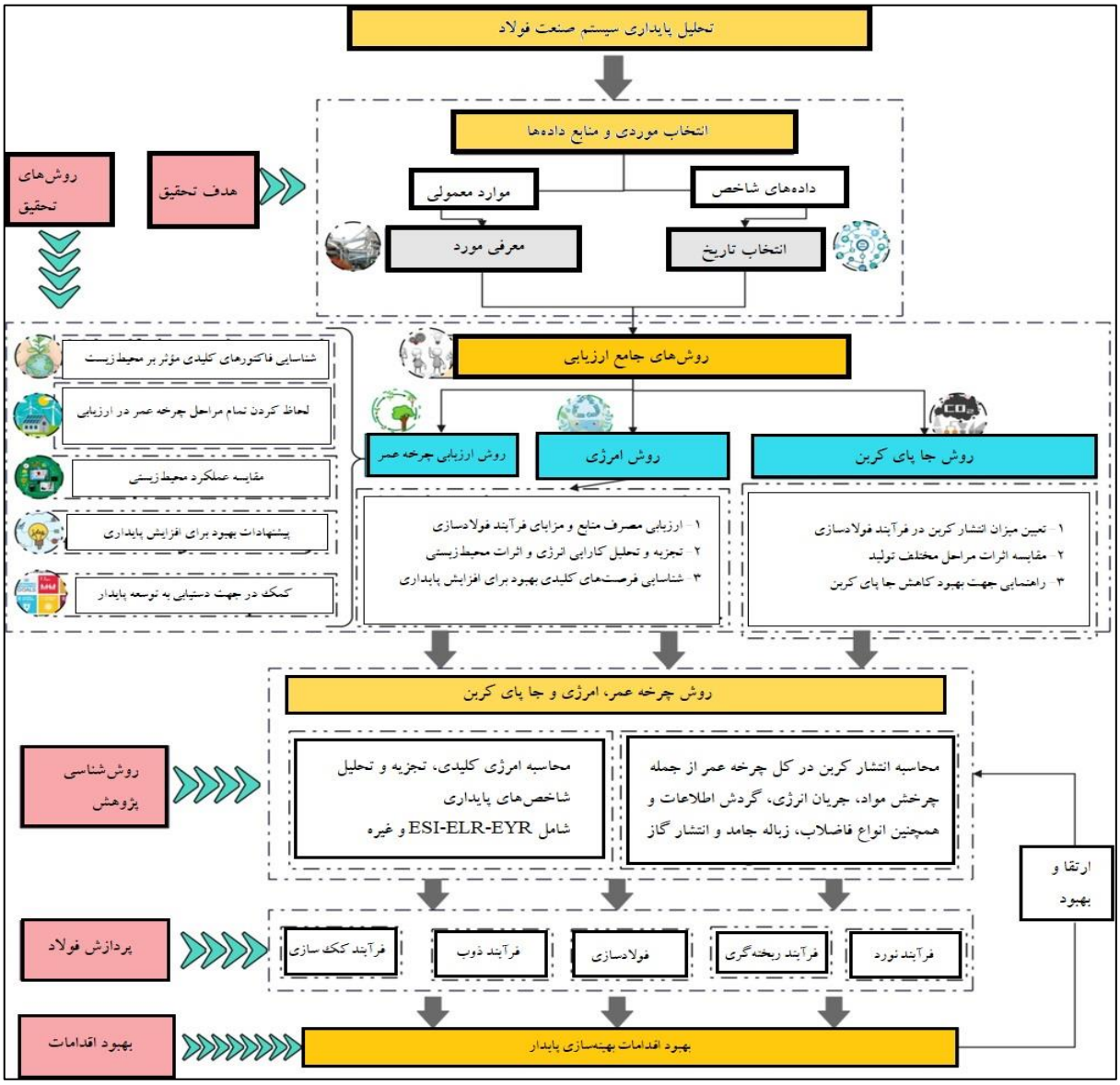
با استفاده از روش LCA و جاپای کربن نیز می‌توان اجرای اصول توسعه پایدار را ترویج و مشاغل و افراد را تشویق کرد تا اقدامات سازگارتر با محیط‌زیست انجام و در نتیجه انتشار کلی کربن را کاهش دهند. محاسبات آن در (شکل ۲) درج شد.



شکل (۲) مسیر ارزیابی یک کارخانه فولاد بر اساس روش LCA-Carbon footprint (Zhang & Asutosh, 2025)

فرآیند تلفیق روش‌های جامع ارزیابی در صنعت فولاد

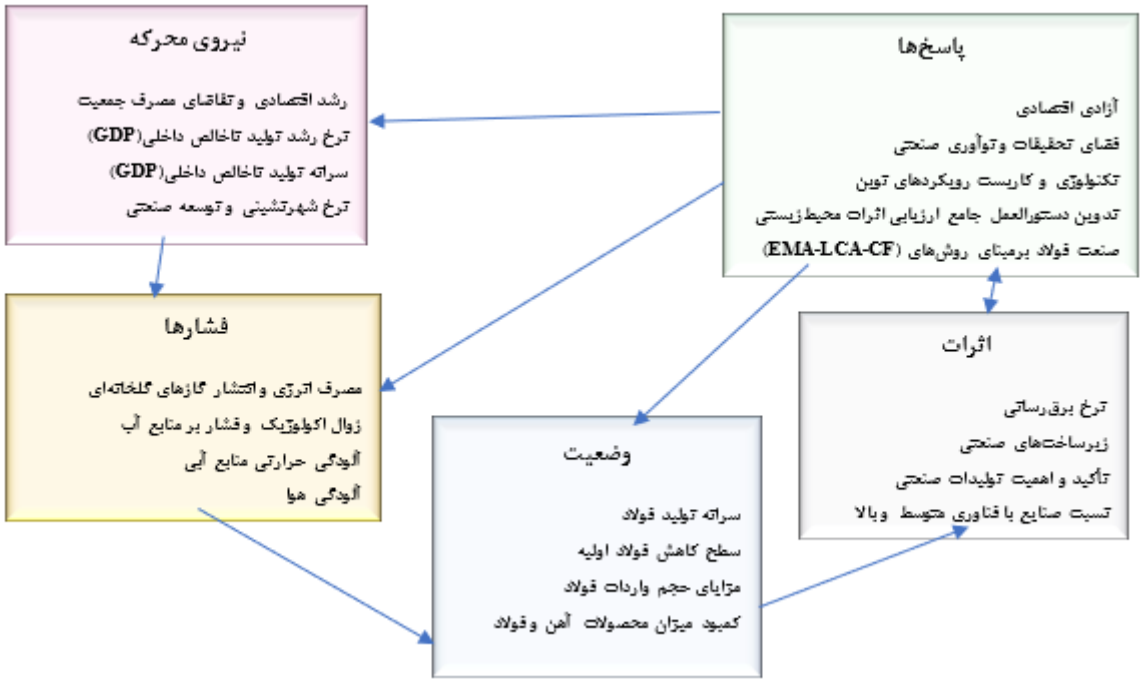
فرایند ادغام روش‌های ارزیابی چرخه کامل عمر، امرژی اکولوژیکی و جاپای کربن در یک سیستم کارخانه فولاد در دیاگرام شکل (۳) ترسیم شده است. این نمودار مسیر اجرای فرآیند را نشان می‌دهد و شامل مراحل: ۱. تعیین مرزها و اهداف سیستم. ۲. جمع آوری داده‌ها در ورودی‌ها و خروجی‌های منابع. ۳. برآورد شاخص‌های امرژی اکولوژیکی برای هر فرآیند. ۴. ارزیابی جاپای کربن در کل چرخه عمر ۵. ادغام نتایج امرژی، چرخه عمر و جاپای کربن برای تجزیه و تحلیل جامع. ۶. انجام تجزیه و تحلیل حساسیت برای شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر پایداری و ۷. تفسیر یافته‌های تحقیق همراه با ارائه توصیه‌هایی برای بهبود پایداری در سیستم‌های صنعتی فولاد است. (Zhang & Asutosh, 2025).



شکل (۳) دیاگرام تلفیق روش‌های جامع ارزیابی در صنعت فولاد (Zhang & Asutosh, 2025)

یافته‌های پژوهش

یکی از پاسخ‌های مدل DPSIR در این پژوهش، تدوین دستورالعمل جامع ارزیابی اثرات محیط‌زیستی صنعت فولاد می‌باشد که به عنوان واکنش خروجی به کنش‌های مدل موصوف، مورد آنالیز قرار گرفت و در شکل (۴) مطرح شده است.



شکل (۴) چارچوب (DPSIR) در صنعت فولاد (Xu etal., 2023)

ابعاد نیروی محرکه (D)، فشار (P)، وضعیت (S) و تأثیر (I) به دنبال هم برای تولید بُعد پاسخ‌ها (R) قرار دارند تا در نهایت بر ظرفیت پاسخگویی دولت‌ها و شرکت‌ها به توسعه پایدار متمرکز شوند. باتوجه به اینکه پاسخ‌ها، واکنش‌های سیاستی و تکنولوژیکی مرتبط با مسئله پژوهش می‌باشد و شامل عواملی مانند آزادی اقتصادی، فضای تحقیقات و نوآوری صنعتی، تکنولوژی و کاربست رویکردهای نوین است؛ عوامل کلیدی مانند توسعه اقتصاد ملی، بهره‌برداری از منابع، تأثیر محیط‌زیستی، ساختار صنعتی، نوآوری در فناوری و چارچوب سیاست‌گذاری را منعکس می‌کنند تا به درک و ارزیابی پایداری صنعتی بینجامد. به همین دلیل این پژوهش در ملاحظات مدل، به تدوین دستورالعمل جامع روش‌های ارزیابی اثرات محیط‌زیستی (امرژی-چرخه عمر و جاپای کربن) اشاره داشته تا بتواند پایداری صنعت فولاد را در بُعد پاسخ‌ها مطرح نماید؛ چرا که استفاده از روش‌های ارزیابی، اطلاعات جامعی ارائه می‌دهد و تصمیم‌گیرندگان و محققان را قادر می‌سازد تا وضعیت فعلی و روند توسعه صنعت فولاد را درک کنند و مبنایی علمی برای تدوین سیاست‌ها و اقدامات مربوطه ارائه دهند.

آسیب‌شناسی و تحلیل اثرات صنایع فولاد

بطور کلی فولاد یک ماده مهم در فرآیندهای تولید فعلی است که اثرات محیط‌زیستی آن در چندین مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است (Gonzalez Hernandez et al., 2018; Olofsson, 2019; Wang et al., 2015). با توجه به اینکه صنعت مزبور تأثیر محیط‌زیستی زیادی دارد (Eurofer, 2019; Poponi et al., 2016)، به منظور مقابله با چالش‌های ناپایداری در جهان (Asada et al., 2020; Susur and Karakaya, 2021) ، لازم است فرآیندهای تولید آن بهینه شود (Eurofer, 2019). مثلاً نوآوری‌های اقتصاد زیستی که می‌تواند نویدبخش کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش فولاد باشند (Broring et al., 2020; Falcone et al., 2019; Toppinen et al., 2020; Wang et al., 2015).

همچنین، در ارزیابی اثرات اجتماعی، توجه به پیشینه‌ها، جهان‌بینی‌ها، برداشت‌ها و اهداف مختلف ذینفعان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تمرکز قوی بر روی اهداف منفرد (مثلاً محیط‌زیستی) می‌تواند منجر به نوسان در مبادلات پایداری شود. اهداف شرکت‌ها یا کنشگران (کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی) ممکن است منجر به عدم دستیابی به اهداف توسط افراد یا کنشگران

دیگر شود (به عنوان مثال حفظ معاش ممکن است در داخل یک کشور در حال توسعه اتفاق بیفتد و اهداف متضادی بین کارگران صنعت زغال سنگ و تلاش‌های فعالان تغییرات اقلیمی رخ دهد و همزمان با وقوع این مسئله بین کشورهای مختلف، بهبود عملکرد محیط‌زیستی، مطلوب به نظر برسد). با این حال، این امر ممکن است باعث شود کارمندان شغل خود را از دست بدهند که با این وجود برای تغذیه خانواده خود به آن وابسته هستند. بنابراین، تغییر فرآیندهای تولید، می‌تواند موجب نارضایتی و ناراحتی‌های روانی نیز شود (Furaker, 2010).

از طرف دیگر زوال اکولوژیک و تغییرات اقلیمی به نگرانی‌های مهمی تبدیل شده است (Sen et al., 2021) و اتحادیه اروپا (EU) را بر آن داشت تا بر توسعه پایدار از طریق سیاست‌های حفاظت از محیط‌زیست تمرکز کند (Sala et al., 2021). یکی از این سیاست‌ها «دستورالعمل طراحی محیط‌زیستی» (2009/125/EC) است(European Parliament, 2017) است که هدف آن کاهش تأثیر کل چرخه عمر محصول با گنجاندن معیارهای محیط‌زیستی در تصمیمات طراحی است (Baki, 2022; Zhao et al., 2016). مدل تولید اقتصاد چرخشی (CE)[1] بر بهبود کاربردهای مواد، افزایش طول عمر محصولات و دستیابی به مدیریت کارآمد منابع، تمرکز دارد (Gillott et al., 2023; Godoy Leon etal., 2022; Wang et al., 2018). اتحادیه اروپا نیز یک استراتژی پایدار در چارچوب CE ایجاد کرده است (European Commission, 2020). با توجه به مدیریت کارآمد منابع، این اتحادیه در سال ۲۰۱۵ فهرستی از مواد خام حیاتی (CRM)[2] ایجاد کرد (European Commission, 2014) که اهمیت اقتصادی و ریسک عرضه را تلفیق می‌کند و هر سه سال یکبار بررسی و به روزرسانی می‌شود (آخرین نسخه در سال ۲۰۲۳)، منتشر شده است(Milan et al., 2023). در مدل تولید اقتصاد چرخشی، کلیه مواد قابل بازیافت نیستند؛ مثلاً فلزات سنگین مرتبط با صنعت فولاد عمدتاً توسط مواد خام (کمکی) و سوخت تولید می‌شوند و با گازهای خروجی، پساب، مواد زائد جامد و ترکیبات جانبی در طی فرآیندهای پخت، ذوب و نورد در دمای بالا تخلیه می‌شوند.

گرد و غبار دود ناشی از انتقال، خرد کردن و ذخیره سازی مواد خام و سوخت نیز مقادیر کمی از عناصر سنگین را حمل می‌کند. میزان و نوع HM[3]ها در انتشار آلایندگی صنعت فولاد، به ترکیب و نوع مواد خام و سوخت بستگی دارد. دود فولاد حاوی مقادیر زیادی سرب، روی و کادمیوم است. سرباره فولاد همچنین حاوی کادمیم و روی است. از کادمیم می‌توان در تولید آلیاژها، رنگ‌ها و پوشش‌های ضد زنگ استفاده کرد. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که کادمیوم در محیط عمدتاً تحت تأثیر ورودی‌های انسانی است (Liu et al., 2023) فاضلاب، رواناب و فعالیت‌های صنعتی ممکن است عامل مقادیر بالای کادمیوم باشند (Niu et al., 2023). کروم یک عنصر آلیاژی مهم است که نقش بسیار مهمی در مواد فولادی دارد و می‌تواند مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر حرارت و سختی فولاد را بهبود بخشد و همچنین خواص مکانیکی و ماشین‌کاری فولاد را بهبود بخشد. آلودگی کروم ناشی از صنعت فولاد سابقه طولانی دارد. مس یکی از رایج‌ترین عناصر آلیاژی در فولاد است و افزودن آن، می‌تواند خواص فولاد را بهبود بخشد. فرآیند اسیدشویی یا زنگ‌زدایی نیز می‌تواند باعث آلودگی مس شود. سرب را می‌توان به عنوان نشانگر در صنایع فلز و رنگ استفاده کرد، رابطه نزدیک بین سرب و آهن نشان می‌دهد که فرآوری فولاد ممکن است موجب تجمع سرب به عنوان یکی از رنگ‌های ضدخوردگی پرکاربرد مواد فولادی در رسوبات باشد (Anbuselvan et al., 2018). استفاده از سولفات روی نیز ممکن است منجر به وجود روی در فاضلاب شود. نیکل طبیعی از هوازدگی سنگ‌ها و خاک‌ها ناشی شده و با رواناب و رسوبات، وارد سیستم آب می‌شود(Aydın et al., 2023). بنابراین آلایندگی صنعت فوق، بطور کامل قابل بازیافت نبوده و اثرات محیط‌زیستی قابل توجهی دارد (جدول۳) که برای کاهش این اثرات، به ارائه رویکردهای نوین درقالب راهکارهای دستیابی به اهداف پایداری (جدول ۴) پرداخته شده است.

[1] Circular Economy
[2] Critical Raw Materials
[3] Heavy metals

جدول (۳) اثرات محیط‌زیستی صنعت فولاد (منبع: یافته‌های پژوهش)

عنوان	تشریح
مصرف بالای انرژی	تولید فولاد مستلزم مصرف بالای انرژی است که می‌تواند به انتشارگازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا منجر شود. در این راستا، فرآیند تولید ورق سیاه در مراحل ذوب و نورد که نیاز به حرارت و فشار زیادی دارد، انرژی بالایی مصرف می‌کند.
انتشار آلاینده‌ها	احتراق سوخت‌های فسیلی برای فرآیندهای مختلف تولید، می‌تواند آلاینده‌هایی مانند دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد و اکسیدهای نیتروژن را در جو پراکنده نماید. در حال حاضر صنعت فولاد یکی از بزرگترین منتشرکنندگان دی‌اکسیدکربن است. یکی از موارد کاربرد سوخت‌های فسیلی در تولید ورق های فولاد، استفاده از کوره‌های قوس الکتریکی است که امروزه این کوره‌ها کاربرد زیادی در صنعت تولید فولاد پیدا کرده‌اند.
تولید زباله و پسماندهای خطرناک	تولید فولاد باعث تولید مواد زاید از جمله سرباره و گرد و غبار می‌شود که در صورت عدم مدیریت صحیح می‌تواند بر اکوسیستم‌ها تأثیر بگذارد. فرآیند تولید ورق فولادی با تولید پسماندهای جامد و مایع خطرناک همراه است و در صورت عدم مدیریت اصولی، باعث آلودگی آب و خاک شده و به سلامت جانداران و محیط‌زیست آسیب می‌رساند.
مصرف آب	مصرف آب کارخانه، منابع آب را تحت فشار قرار داده و به طور بالقوه منجر به آلودگی آب و تنش‌های آبی می‌شود.
استفاده از منابع طبیعی	برای تولید ورق، مقادیر زیادی سنگ آهن، کروم، نیکل و سایر مواد اولیه که از منابع طبیعی استخراج می‌شوند، نیاز است. استخراج این مواد می‌تواند به تخریب محیط‌زیست، از بین رفتن زیست‌بوم‌ها و آلودگی آب و خاک منجر شود.
آلودگی صوت	آلودگی صوت در تجهیزات چرخشی سرعت مانند فن، دمنده و اگزوز وجود دارد که به دلیل نشت هوا و بخار فشرده، تماس فلز با فلز، در کارخانه‌های نورد، کارگاه‌های آهنگری، ریخته‌گری و غیره وجود دارد.

رویکردهای نوین برای پایداری صنعتی در عرصه صنایع فولاد

جدول (۴) رویکردهای نوین به منظور نیل به اهداف پایداری در صنعت فولاد (Zhang & Asutosh, 2025)

اهداف	اقدامات
استفاده از انرژی‌های پاک	استفاده از انرژی پاک جهت کاهش مصرف انرژی فسیلی به عنوان جایگزین تولید برق سنتی جهت تأمین الکتریسته در مراحل مختلف کارخانه‌های فولاد به منظور افزایش پایداری تولید محصولات و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ضرورت دارد.
	گردش منابع از طریق تأمین انرژی فتوولتائیک مازاد که می‌تواند با استفاده از فناوری‌های استحصال انرژی، برای استفاده در آینده ذخیره شود یا به سایر مشاغل فروخته شود، اهمیت دارد. همچنین استفاده مجدد از منابع موجب کاهش ضایعات، بهبود کارایی استفاده از منابع و در نتیجه افزایش پایداری در این صنعت خواهد شد.
	تمرکز بر تکنولوژی‌های سازگار با محیط‌زیست، موجب تصویرسازی برند پیشرفته با سلامت و شکوفایی جامعه شده و زمینه‌ساز مسئولیت اجتماعی در سایر شرکت‌های تولید کننده نیز می‌شود. اتخاذ رویکرد استفاده از انرژی سبز نه تنها مشتریان آگاه از محیط‌زیست را جذب می‌کند، بلکه به طور بالقوه، متضمن حمایت دولت یا اقدامات تشویقی در این راستا می‌گردد.
تکنولوژی صرفه‌جویی انرژی در فرآیندهای ذوب آهن، فولادسازی، مرحله نورد و سایر مراحل تهیه فولاد	مرحله ذوب آهن: خاموش کردن کک خشک در دمای بالا و فشار بالا همراه با تولید برق مرتبط/ تکنولوژی خیس کردن زغال سنگ برای کوره‌های کک/ بازیابی حرارت محسوس از گاز کوره کک/ بازیابی اتلاف گرمای حاصل از تف جوشی گازهای دودکش/ فناوری احتراق برای گازهای زائد ماشین تف جوشی/ فناوری تف جوشی هوای داغ برای گازهای زائد ماشین پخت/ بازیابی گرمای محسوس از زینتر/ سیستم تولید برق چرخه رانکین ارگانیک برای گرمای اتلافی در دمای پایین حاصل از تف‌جوشی/ دانه‌بندی خشک و بازیابی گرمای محسوس از سرباره مذاب با دمای بالا/ بازیابی حرارت هدر رفته از گاز دودکش اجاق گاز داغ/ اتلاف حرارت آهن مذاب با دمای بالا/ گرمای محسوس آب خنک‌کننده کوره / بازیابی گرمای محسوس از گاز کوره بلند.
	فرآیند فولادسازی: سیستم خنک‌کننده گازی برای فولادسازی/ تکنولوژی استخراج خلاء مکانیکی/ دیگ بخار حرارتی زباله برای گازهای دودکش کوره‌های الکتریکی/ فناوری پخت ذخیره‌سازی گاز کم کالری/ بازیابی حرارت تابشی برای بیلت‌های فولادی
	فرآیند نورد: فناوری احتراق کارآمد برای کوره‌ها/ جایگزینی انرژی برای صرفه‌جویی در انرژی فرآیند/ بازیابی حرارتی گاز اتلافی از دودکش در دمای پایین/ خنک‌کننده گازی برای کوره‌های گرمایشی/ احتراق غنی شده با اکسیژن در کوره‌های گرمایش/ فناوری باند حرارتی دودکش زباله‌های فولادی با دمای بالا برای کوره‌های گرمایشی/ فناوری افزایش انتقال حرارت تشعشع سیاه بدنه برای کوره‌های گرمایشی/ فناوری بازیابی و استفاده از آن برای گاز محافظ توأم با تخلیه؛

اهداف	اقدامات
	اقدامات انرژی کم کربن: جمع آوری حرارت فشرده‌سازی بین مرحله‌ای برای کمپرسورهای هوا/ بازیابی حرارت هدر رفته از اگزوز دیگ بخار/ استفاده از فناوری نمک‌زدایی آب دریا و اتلاف گرما در دمای پایین برای تصفیه آب نمک/ بازیابی حرارت اتلافی برای خشک کردن لجن/ فناوری ذخیره‌سازی یخ برای مناطق انفجاری و اکسیژن ساز/ فناوری‌های شبکه انرژی در مناطق/ تأمین سیستم آب با کیفیت و بهره برداری آبشاری/ بازیافت آب باران در مناطق برای کاهش مصرف آب/ کاربرد جامع پمپ‌های آب در مقیاس بزرگ و فناوری فرکانس درایو متغیر برای فن‌ها/ سیستم‌های روشنایی LED کم‌مصرف/ پروژه‌های انرژی خورشیدی فتوولتائیک/ صرفه جویی در تبدیل انرژی فن‌های بزرگ مقیاس در نیروگاه‌ها/ اقدامات بهبود و صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای سیستم‌های هوای فشرده در فرآیندهای فولاد سیلیکونی، نورد سرد و نورد گرم.
سیستم عملیات هوشمند	وجود یک سیستم عملیاتی هوشمند ارزش قابل توجهی در تولید فولاد ایجاد می‌کند. اولاً می‌تواند بر پارامترهای کلیدی را در زمان واقعی فرآیند تولید نظارت کند و کارایی تولید و کنترل کیفیت را افزایش دهد. ثانیاً، برنامه‌های نگهداری تجهیزات را با تجزیه و تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی چرخه‌های تعمیر و نگهداری، کاهش زمان خرابی و بهبود تداوم تولید بهینه کند. علاوه بر این، سیستم هوشمند می‌تواند برنامه‌ریزی تولید را بهینه کند، مصرف انرژی را کاهش دهد و استفاده از منابع را به حداکثر برساند. از طریق اتوماسیون و تصمیم‌گیری هوشمند، سیستم می‌تواند به سرعت به تغییرات تولید پاسخ دهد، انعطاف‌پذیری و سازگاری تولید را افزایش داده و کارخانه فولاد را رقابتی‌تر کند. در نهایت، سیستم عملیاتی هوشمند می‌تواند مدیریت ایمنی را افزایش دهد، از حوادث جلوگیری کند و ایمنی کارکنان و تجهیزات را تضمین کند. به طور کلی، سیستم عملیات هوشمند چندین ارزش مهم را برای تولید فولاد به ارمغان می‌آورد، مانند افزایش راندمان تولید، کاهش هزینه، بهبود کیفیت محصول و ایمنی.
استراتژی طراحی و اجرای پروژه‌های کم‌کربن	استراتژی اصلی برای توسعه سبز و کم کربن آهن و فولاد، اولویت دادن به توسعه سبز، دستیابی به فرآیندهای تولید فولاد سبز، کم‌کربن و بی‌ضرر از طریق فناوری متالورژی و تولیدات هوشمند، تحقق فرآیندهای استفاده از محصولات فولادی سبز و کم‌کربن از طریق پالایش و کمک به ساخت جامعه‌ای بدون کربن است. همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق تبدیل زباله شهری به انرژی، گازسازی زغال سنگ و تولید برق فتوولتائیک نیز می‌باشد. تحقیق و توسعه درخصوص فناوری‌های متالورژی کم‌کربن پیشرفته، مانند متالورژی هیدروژن (DRI)[1] و آهن سبز، تزریق گاز طبیعی به کوره‌های بلند، کوره‌های بلند آزمایشی چرخه کربن غنی از هیدروژن و تف جوشی مایکروویو در این راستا حائز اهمیت است. علاوه بر این، فناوری‌های جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن (CCUS)[2] و فن‌آوری‌های سینک‌کربن، از جمله جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS)[3]، استفاده مجدد از CO_2 در فرآیندهای متالورژی، استفاده از منابع شیمیایی CO_2، و ترسیب مشترک کربن در فرآیندهای متالورژی مهم است.
مدیریت محیط‌زیست	سیستم جمع آوری و تصفیه زباله جامد: بازیافت ضایعات جامد در کارخانه های فولاد، گامی مهم در حفظ محیط‌زیست و استفاده از منابع است. فرآیند دفع زباله جامد شامل بازیافت ضایعات فولادی است که به کاهش استخراج منابع طبیعی و به حداقل رساندن اثرات محیط‌زیست کمک می‌کند. از طریق بازیافت و استفاده مجدد، ضایعات فولاد را می‌توان دوباره برای تولید محصولات یا مواد جدید پردازش کرد. این رویکرد اقتصاد چرخشی به کاهش انباشت زباله، افزایش طول عمر منابع، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و ایجاد فرصت‌های شغلی کمک می‌کند. چنین رویکردی به صورت بلندمدت موجب افزایش منافع اقتصادی و پیامدهای مثبت هم برای محیط‌زیست و هم برای جامعه خواهد شد و دستیابی به توسعه پایدار را ارتقا می‌بخشد.
	سیستم تصفیه فاضلاب و جمع آوری آب باران: اگر آب کارخانجات فولاد از طریق سیستم‌های تصفیه فاضلاب تولید شود و برای تولید آب صنعتی واجد شرایط با هدف استفاده مجدد در سیستم پردازش گردد، باعث کاهش مصرف سالانه آب از بدنه‌های آبی طبیعی می‌گردد. همچنین با ایجاد یک سیستم جمع‌آوری آب باران، از جمله حوضچه‌های برکه‌ای، فرورفتگی‌ها و مخازن جمع‌آوری آب می‌توان به منابع آب مصرفی جدید دست یافت و با افزایش اقدامات صرفه‌جویی در مصرف آب منبع واحدها، درکنار استفاده از روش‌های درجه‌بندی کیفیت آب و بهره‌برداری آبشاری، تا حد قابل توجهی از میزان مصرف آب کاسته می‌شود.
	سیستم فضای سبز مصنوعی و طراحی تنوع زیستی: وجود هماهنگی بین محیط‌های تولید و اکوسیستم‌های طبیعی اطراف آن اهمیت قابل توجهی دارد. تولید و عملیات مداوم در سایه بهبود محیط‌زیست قابل استمرار است. بنابراین لازم است محوطه کارخانه‌ها متناسب با افزایش پوشش سبز و در نظر گرفتن تناسب و تنوع گونه‌های گیاهی طراحی شود. همچنین تأثیر ساخت و ساز پروژه بر محیط‌زیست در مراحل مختلف ارزیابی شود تا از اجرای پروژه‌ها در مناطق شکننده اکولوژیکی جلوگیری شود. در طول عملیات پروژه، نظارت مستمر بر محیط‌زیست استمرار یابد و در حفاظت از تنوع زیستی دقت لازم به عمل آید. همچنین تمرکز بر افزایش شاخص توسعه سبز، نوسازی همه جانبه ظاهر و ظرفیت کارخانه و عملیات تخریب دقیق برای ساخت و ساز

[1] Hydrogen Metallurgy (DRI) Direct Reduced Iron
[2] carbon capture, utilization, and storage
[3] carbon capture and storage

اهداف	اقدامات
	سبز ادامه یابد. شبکه مدیریت کارخانه، به طور کامل برای حفظ نتایج و تلاش برای ساخت کارخانه‌های باغ‌مانند ایجاد گردد. پیشرفت از پاکسازی کامل فضاهای سبز موجود، احیای اکولوژیکی، افزودن کمربندهای جنگلی حائل، درختکاری اجباری و فعالیت‌های سبزسازی بمنظور افزایش فضای سبز رصد شود. برای محافظت از محیط‌زیست در برابر فعالیت‌های انسانی، ارزیابی مداوم انجام شود و به طور فعال حفاظت از تالاب نیز مد نظر قرار گیرد. حفظ غنا و تنوع گونه‌های جانوری و گیاهی توأمان مورد توجه قرار گیرد. پایداری اکولوژیکی کارخانجات فولاد و پیرامون آن با تقویت محیط‌زیست طبیعی و تنوع‌زیستی ارتقا یابد تا درنهایت بتوان با انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب، تخریب و بازسازی اصولی ساختمان‌های متروکه، ادامه فعالیت‌های سبزسازی و اجرای عملیات حفاظت از تالاب‌ها، بهبود محیط کارخانه، بقا و تکثیر گونه‌های مختلف حیات وحش را تسهیل نمود. نظارت و ارزیابی منظم برای بررسی وضعیت محیط‌زیست و اجرای اصولی پروژه‌های مهندسی مورد توجه قرار گیرد. بطور کلی انجام کامل اقدامات مدیریت محیط‌زیست، به طور مؤثرتری از پایداری محیط‌زیست محافظت نموده و آن را به زیستگاه گونه‌های گیاهی و جانوری تبدیل می‌کند و متضمن دستیابی به اهداف توسعه پایدار، حفاظت از محیط‌زیست و تعادل اکولوژیک خواهد بود.

بحث و نتیجه‌گیری

اصولاً آنالیز خطر سمیت فلزات سنگین در رسوبات آبی یک شهر که تحت تسلط صنعت فولاد قرار دارد، از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. فلزاتی مانند مس، کروم، کادمیم، نیکل، سرب و روی در ساخت فولاد، خطرات حاد بالقوه‌ای برای موجودات زنده ایجاد می‌کنند. بر مبنای تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی انجام شده، کادمیوم عامل اصلی تأثیرات نامطلوب در میان فلزات سنگین به حساب می‌آید که لازم است راهبردهای مدیریتی برای جلوگیری از ورود این فلز به محیط‌های پذیرنده، در اولویت قرار گیرد. همچنین ارتباط بین آلودگی فلزات سنگین و متغیرهای محیط شناسایی شود و هات‌اسپات‌ها تحلیل گردد. اقدامات محیط‌زیستی موجود برای از بین بردن آلایندگی فلزات سنگین به طور کامل ارزیابی شود تا از ایمنی محیط‌های آبی اطمینان حاصل شود. در این میان، ویژگی‌های هیدرولیکی فصول مختلف نیز ممکن است بر توزیع فلزات سنگین رسوبات تأثیر بگذارد. بنابراین تغییرات فصلی آلودگی این فلزات نیز مشخص شود و در نهایت نظارتی پویا و مستمر برای تعیین اثرات و خطرات بالقوه مکانیسم جابجایی فلزات سنگین صورت پذیرد (نیو و همکاران، ۲۰۲۳).

در این راستا، نوآوری‌های اقتصاد زیستی متضمن بررسی تأثیرات (مثبت و منفی) فناوری بر محیط‌زیست و جامعه است و ارزیابی اثرات محیط‌زیستی و اجتماعی به شیوه‌ای یکپارچه برای رسیدگی به چالش‌های جهانی لازم است. (زیمک و همکاران، ۲۰۲۴). در بحث اقتصاد زیستی، استفاده مجدد از عناصر سازه‌ای فولاد می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در این مسیر داشته باشد، اما رفع چالش‌های کلیدی مانند محدودیت دسترسی مواد، کم بودن میزان مواد با قابلیت استفاده مجدد، عدم وجود قوانین و استانداردهای طراحی، هزینه‌های اولیه بالا و مشارکت و هماهنگی کامل این فرآیندها، مورد نیاز است که این مسئله با استفاده از فناوری‌های دیجیتال و هوش مصنوعی قابل بررسی و ارائه راهکار است(کانیلماز و همکاران، ۲۰۲۳). اثرات محیط‌زیستی فولادسازی با استفاده از ضایعات و بررسی راه‌حل‌های بالقوه مانند پارادایم اقتصاد چرخشی اهمیت دارد؛ به عنوان مثال؛ منابع ثانویه تولید فولاد دارای مزایای محیط‌زیستی و اقتصادی در کشورهایی هستند که فرآیند تولید فولاد اولیه در آن‌ها وجود ندارد. در این راستا، ساخت میلگردهای تقویت کننده فولاد از منابع ثانویه با استفاده از مسیر کوره القایی با منابع انرژی تجدیدپذیر، پتانسیل اثرات محیط‌زیستی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد؛ اما مزایای اقتصادی و اجتماعی آن برای بررسی هزینه و فایده به مطالعات بیشتری نیاز دارد (فنته و تسهگو، ۲۰۲۴).

ارزیابی چرخه عمر به روش ترکیب سیستماتیک، یک روش گام به گام برای محاسبه اثرات محیط‌زیستی گریدهای فولادی بر اساس ترکیب آنهاست و روشی برای تخصیص ترکیبی از حداکثر مواد خام با حداقل تأثیر محیط‌زیستی ممکن، برای هر گرید فولاد مطرح می‌کند. همچنین به تعیین مواد خام حیاتی با استفاده کارآمد از منابع، می‌پردازد و یک ابزار ارزشمند برای محاسبه دقیق‌تر اثرات محیط‌زیستی فولاد، می‌باشد که می‌تواند به عنوان معیارهای محیط‌زیستی در فرآیند انتخاب مواد لحاظ شود تا امکان تصمیم‌گیری آگاهانه‌تری در مورد پایداری منابع فراهم گردد. همچنین به متخصصان کمک می‌کند تا درک صحیحی از

ماهیت تکنیک ارزیابی چرخه عمر، داشته باشند. این روش تأکید می‌کند، ترکیب مواد به طرز قابل‌توجهی بر محیط‌زیست اثرگذار است و حتی می‌توان اثر برخی از عناصر آلیاژی مانند مولیبدن، مس، تیتانیوم یا کروم را که در فرآیند تولید فولاد نقش دارند و بر محیط‌زیست اثرگذار هستند، تجزیه و تحلیل کرد (گتیرز و همکاران، ۲۰۲۴).

در این پژوهش ضمن توجه به موارد مطروحه و بررسی روش‌های جامع ارزیابی اثرات محیط‌زیستی (ارزیابی چرخه عمر- امرژی و جاپای کربن) صنعت فولاد در چارچوب مدل (DPSIR)، به تحلیل اثرات و آسیب‌شناسی موضوع پرداخته شد و سپس رویکرهای نوین پایداری این صنعت مورد بحث و بررسی قرار گرفت. این پژوهش با بهره‌گیری از مدل (DPSIR) به بررسی به تحلیل وضعیت عوامل مؤثر بر مفاهیم پایه آلایندگی صنعت فولاد، برمبنای نیروی محرکه، فشار، وضعیت و تأثیرات تولید فولاد، جهت مدیریت محیط‌زیست، به ارائه پاسخ مناسب پرداخت. این کار با هدف تجزیه و تحلیل جامع مسائل محیط‌زیستی و ارتباط آنها با توسعه اجتماعی انجام شد. باتوجه به اینکه پاسخ‌ها، واکنش‌های سیاستی و تکنولوژیکی مرتبط با مسئله می‌باشد، تدوین دستورالعمل جامع روش‌های ارزیابی اثرات محیط‌زیستی برمبنای روش‌های (LCA, EMA, CF)، می‌تواند به عنوان پاسخ این مدل در نظر گرفته شود که جنبه‌های نوآورانه و مزایای آن عمدتاً در زمینه‌های متعددی منعکس می‌شود. پژوهش انجام شده همچنین می‌تواند مبنای محاسبات روش‌های ارزیابی اثرات محیط‌زیستی در این زمینه باشد.

این پژوهش نتیجه می‌گیرد که روش‌های جامع ارزیابی اثرات محیط‌زیستی صنعت فولاد مکمل یکدیگرند؛ زیرا ارزیابی چرخه حیات می‌تواند تأثیر محیط‌زیستی یک محصول را در کل چرخه عمر آن، از استخراج مواد خام گرفته تا تولید و استفاده و درنهایت امحاء آن را در نظر بگیرد. نوآوری این روش در ادغام کل چرخه عمر یک محصول در محدوده ارزیابی آن نهفته است و در نتیجه بازتاب دقیق‌تری از تأثیر محیط‌زیستی محصول ارائه می‌دهد. تحلیل امرژی از منظر جریان انرژی عمل می‌کند و تمام ورودی‌ها را به معادل‌های ژول خورشیدی، تبدیل می‌کند تا ارزش تعبیه‌شده و کارایی مصرف انرژی، در محصولات یا فرآیندها را آشکار کند. نوآوری این روش نیز در این است که یک استاندارد واحد اندازه‌گیری انرژی را ارائه می‌دهد و به درک عمیق رابطه بین مصرف انرژی و محیط‌زیست کمک می‌کند. همچنین ارزیابی جاپای کربن، بر انتشار گازهای گلخانه‌ای تولید شده توسط محصولات یا فعالیت‌ها متمرکز است و با کمّی سازی انتشار کربن، به شناسایی و کاهش اجزای انتشار کربن بالا کمک می‌کند؛ این امر برای رسیدگی به تغییرات اقلیمی بسیار مهم است.

بنابراین، ادغام روش‌های مورد بررسی، موجب ارائه چارچوب ارزیابی چندبعدی سیستماتیک و جامع می‌شود که نه تنها اثرات مستقیم محیط‌زیستی را ارزیابی می‌کند، بلکه بهره‌وری انرژی و تأثیر انتشار کربن را نیز در نظر می‌گیرد، در نتیجه به تصمیم‌گیرندگان، اطلاعات جامع‌تری برای ارتقای پایداری طراحی محصول و توسعه صنعتی ارائه می‌دهد. علاوه بر این، به کشف جنبه‌های پنهان اثرات محیط‌زیستی کمک نموده و دستورالعمل‌های مشخصی برای کاهش انتشار و بهبود وضعیت محیط‌زیست، تبیین می‌کند و درنهایت منجر به اجرای سیاست‌های حفظ محیط‌زیست، برای نیل به اهداف توسعه پایدار خواهد شد. با این حال، کاربرد مدل (DPSIR) در اینجا، محدودیت‌هایی دارد که باید به آنها پرداخت. اولاً، محدودیت‌های ناشی از دسترسی داده می‌باشد؛ زیرا خروجی این مدل، برگرفته از یک مطالعه موردی مشابه درکشور چین می‌باشد و برای تدقیق پارامترهای مورد بررسی، به مطالعه موردی واحدهای تولیدکننده صنعت فولاد کشورمان، نیاز است؛ چنین کاری باعث می‌شود شاخص‌های قطعی در ابعاد مختلف به دست آید و محدودیت اولیه برطرف شود. محدودیت دوم به همکاری و هم‌افزایی واحدهای تولیدکننده فولاد، به دلیل منابع حیاتی این صنعت اشاره دارد. بنابراین لازم است جنبه‌هایی مانند روابط بین‌الملل، اقتصاد صنعتی، توسعه صنعتی و سرمایه‌گذاری بین‌المللی تقویت شوند؛ زیرا صنعت فولاد بسیار پیچیده و گسترده است و به دلیل اثرات اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی، به افزایش تخصص‌ها و شاخص‌ها نیاز دارد.

بر اساس تحقیقات انجام شده و تحلیل‌های صورت گرفته، موضوعات زیر برای توسعه پایدار صنعت فولاد پیشنهاد می‌شود.

(۱) تقویت همکاری ملی و ارتباطات بین‌المللی: واحدهای تولیدکننده در کشور توأم با کشورهای مولد بخش صنعت فولاد، همکاری بین‌المللی را افزایش داده و به طور فعال در سیستم جهانی صنعت فولاد ادغام شوند تا توسعه هماهنگ این صنعت را

در سطح ملی و منطقه‌ای ارتقا دهند. با ایجاد اتحادهای بین‌المللی، انجام تبادل فناوری و مشارکت در تحقیقات مشترک، کشورها می‌توانند به طور جمعی به چالش‌ها بپردازند و توسعه پایدار صنعت فوق را ارتقا دهند.

(۲) بهینه‌سازی ساختار صنعتی و ارتقاء فناوری: واحدهای تولیدکننده برای بهینه‌سازی ساختار صنعت فولاد جهت ارتقاء فناوری و بهبود بهره‌وری در استفاده از منابع سازگار با محیط‌زیست تلاش کنند. تحقیق و کاربرد فناوری‌های فولاد سبز و تکنیک‌های تولید پاک، افزایش یابد تا اثرات محیط‌زیستی آن کاهش یافته و به اهداف توسعه پایدار دست یابیم.

(۳) افزایش حمایت از سیاست‌ها و مقررات: دولت هنگام تدوین و اجرای سیاست‌های مربوط به صنعت فولاد، بر هماهنگی و ایجاد تعادل بین منافع مختلف تمرکز کند و هم‌افزایی بین توسعه صنعت و حفظ محیط‌زیست را ارتقا دهد. در عین حال، مقررات شرکت‌های فولاد تقویت شود تا از رعایت قوانین کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود بهره‌وری منابع اطمینان حاصل شود.

(۴) ترویج توسعه سبز و بهره‌برداری پایدار: واحدهای تولیدی، آگاهی محیط‌زیستی خود را تقویت کرده و کاربرد اصول توسعه سبز را در صنعت فولاد ترویج دهند. حمایت از صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و بازیافت افزایش یابد و شرکت‌ها به اتخاذ فناوری‌های تولید پاک و شیوه‌های تولید سبز، برای کاهش مصرف منابع و آلودگی‌ها، تشویق شوند.

همچنین پیشنهادهای ذیل، جهت رفع محدودیت‌های فعلی تحقیق و تدقیق مطالعات آینده صنعت فولاد، ارائه می‌گردد.

(۱) داده‌های جامع و دقیقی جمع‌آوری گردد؛ تحقیقات آینده می‌تواند بر جمع‌آوری داده‌های گسترده و جزئی، از جمله داده‌های مربوط به فعالیت بخش‌های خاص صنعت فولاد، داده‌های دقیق محیط‌زیستی و داده‌های اقتصادی، تمرکز کند. این امر قابلیت اطمینان و دقت یافته‌های تحقیق را افزایش می‌دهد.

(۲) همکاری بین رشته‌ای افزایش یابد؛ همکاری با متخصصان حوزه‌های مرتبط مانند علوم‌محیطی، اقتصاد و جامعه‌شناسی، می‌تواند برای انجام تجزیه و تحلیل جامع درخصوص جنبه‌های مختلف توسعه پایدار صنعت فولاد در نظر گرفته شود. تحقیقات بین رشته‌ای می‌تواند بینش عمیق‌تر و تجزیه و تحلیل جامع‌تری ارائه دهد.

(۳) تحقیقات کیفی تقویت شود؛ علاوه بر تجزیه و تحلیل داده‌های کمی، می‌توان از روش‌های تحقیق کیفی مانند مصاحبه‌های عمیق و مطالعات موردی برای درک بهتر تأثیرات اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی توسعه پایدار صنعت فولاد کشورمان استفاده کرد. این امر به کشف انگیزه‌ها و پیچیدگی‌های اساسی کمک خواهد کرد.

(۴) ارزیابی ریسک در نظر گرفته شود؛ تحقیقات آینده می‌تواند روش‌هایی را برای انجام ارزیابی ریسک و عدم‌قطعیت‌های بالقوه پیش روی توسعه پایدار صنعت فولاد بررسی کند. این امر به توسعه استراتژی‌های مدیریت ریسک و پشتیبانی از تصمیم‌گیری کمک خواهد کرد. با پرداختن به این پیشنهادات، مطالعات آینده می‌تواند بر محدودیت‌های فعلی غلبه کرده و درک جامع‌تری از ظرفیت توسعه پایدار صنعت فولاد ارائه دهد.

منابع

- میربلوکی، هانیه، عابدین‌زاده، نیلوفر، قنبری، فاطمه. (۱۳۹۷). ارزیابی اثرات محیط‌زیستی احداث کارخانه فولاد، *نشریه پژوهش و فناوری محیط‌زیست*، ۳(۴)، ۴۹-۵۷.
- اسدی. روحا... .(۱۴۰۱). تحلیل وضعیت محیط‌زیست شهر مشهد با مدل DPSIR. *جغرافیا و توسعه فضای شهری*، ۹(۴)، ۱۹-۳۸.
- رمضانی موزیرجی، صبور، دزواره، احتشامی. (۱۴۰۲). ارزیابی چرخه حیات تولید فولاد و اثرات زیست‌محیطی آن. *مجله تحقیقات نظام سلامت*، ۱۹(۱)، ۸۵-۹۴.
- محمدی زاده، محمدجواد، نبی بیدهندی، غلامرضا، کرباسی، عبدالرضا. (۱۴۰۲). بررسی وضعیت محیط‌زیستی آلودگی هوا در شهر تهران با استفاده مدل ترکیبی AHP-DPSIR. *فصلنامه مدیریت محیط‌زیست شهری*، ۱(۴)، ۶۷-۸۴.
- Andreotti, M., Brondi, C., Micillo, D., Zevenhoven, R., Rieger, J., Jo, A. ... & Ballarino, A. (2023). Sdgs in the eu steel sector: a critical review of sustainability initiatives and approaches. *Sustainability*, *15*(9), 7521.
- Asada, R., Cardellini, G., Mair-Bauernfeind, C., Wenger, J., Haas, V., Holzer, D., & Stern, T. (2020). Effective bioeconomy? A MRIO-based socioeconomic and environmental impact assessment of generic sectoral innovations. *Technological Forecasting and Social Change*, *153*, 119946.

- Anbuselvan, N. D. S. N., & Sridharan, M. (2018). Heavy metal assessment in surface sediments off Coromandel Coast of India: Implication on marine pollution. *Marine pollution bulletin*, *131*, 712-726.
- Aydın, H., Tepe, Y., & Ustaoğlu, F. (2023). A holistic approach to the eco-geochemical risk assessment of trace elements in the estuarine sediments of the Southeastern Black Sea. *Marine Pollution Bulletin*, *189*, 114732.
- 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.
- Baki, R. (2022). An integrated multi-criteria structural equation model for green supplier selection. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *9*(4), 1063-1076.
- Broring, S., Laibach, N., & Wustmans, M. (2020). Innovation types in the bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, *266*, 121939.
- European Commission. (2020). Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe. Brussels.
- European Commission. (2014). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the Review of the List of Critical Raw Materials for the EU and the Implementation of the Raw Materials Initiative.
- European Parliament. (2017). The Ecodesign Directive (2009/125/EC): European Implementation Assessment. Publications Office, LU.
- Falcone, P. M., González García, S., Imbert, E., Lijó, L., Moreira, M. T., Tani, A. ... & Morone, P. (2019). Transitioning towards the bio-economy: Assessing the social dimension through a stakeholder lens. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, *26*(5), 1135-1153.
- Fan, Z., & Friedmann, S. J. (2021). Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. *Joule*, *5*(4), 829-862.
- Fente, T. E., & Tsegaw, A. A. (2024). Environmental impact assessment of steel reinforcing bar manufacturing process from scrap materials using life cycle assessment method: a case study on the Ethiopian metal industries. Discover Applied Sciences, 6(2), 53.
- Furaker, B. (2010). On The Social Consequences of Unemployment: European Parliament's Special Committee on the Financial, Economic and Social Crisis (IP/A/ CRIS/NT/2009-05, PE 429.996. European Parliament, Policy Department Economic and Scientific Policies, Brussels.
- Gillott, C., Mihkelson, W., Lanau, M., Cheshire, D., & Densley Tingley, D. (2023). Developing regenerate: a circular economy engagement tool for the assessment of new and existing buildings. *Journal of Industrial Ecology*, *27*(2), 423-435.
- Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T., Nuss, P., & Reck, B. K. (2015). Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(14), 4257-4262.
- Gregory A. J, Atkins J. P, Burdon. D, Elliot. M. (2005). A problem structuring method for ecosystem-based management: The DPSIR modeling process. European Journal of Operational Research. 227, 558-569
- Gutierrez, I. G., Pina, C., Tobajas, R., & Elduque, D. (2024). Incorporating composition into life cycle assessment of steel grades. *Journal of Cleaner Production*, *472*, 143538.
- He, K., & Wang, L. (2017). A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *70*, 1022-1039.
- Hernandez, A. G., Paoli, L., & Cullen, J. M. (2018). How resource-efficient is the global steel industry? *Resources, Conservation and Recycling*, *133*, 132-145.
- Kanyilmaz, A., Birhane, M., Fishwick, R., & Del Castillo, C. (2023). Reuse of steel in the construction industry: Challenges and opportunities. International Journal of Steel Structures, 23(5), 1399-1416.
- Kappenthuler, S., & Seeger, S. (2021). Holistic evaluation of the suitability of metal alloys for sustainable marine construction from a technical, economic and availability perspective. *Ocean Engineering*, *219*, 108378.
- Kildahl, H., Wang, L., Tong, L., & Ding, Y. (2023). Cost effective decarbonisation of blast furnace–basic oxygen furnace steel production through thermochemical sector coupling. *Journal of Cleaner Production*, *389*, 135963.
- Leon, M. F. G., Blengini, G. A., Matos, C. T., & Dewulf, J. (2022). Long-term retrospective analysis of the societal metabolism of cobalt in the European Union. *Journal of Cleaner Production*, *338*, 130437.
- Lin, Y., Yang, H., Ma, L., Li, Z., & Ni, W. (2021). Low-carbon development for the iron and steel industry in China and the world: status quo, future vision, and key actions. *Sustainability*, *13*(22), 12548.

- Liu, F., Wang, X., Dai, S., Zhou, J., Liu, D., Hu, Q. ... & Yan, H. (2023). Spatial variations, health risk assessment, and source apportionment of soil heavy metals in the middle Yellow River Basin of northern China. *Journal of Geochemical Exploration*, *252*, 107275.
- Milan, Grohol, Veeh, Constanze, European Commission. (2023). European Commission, Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. Luxembourg.
- Mitrašinović, A., & Tomić, M. (2022). Functional and environmental advantage of cleaning Ti5B1 master alloy. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *9*(3), 783-793.
- Niu, S., Xia, Y., Yang, C., & Liu, C. (2023). Impacts of the steel industry on sediment pollution by heavy metals in urban water system. *Environmental Pollution*, *335*, 122364.
- Olofsson, E. (2019). Regional effects of a green steel industry–fuel substitution and feedstock competition. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *34*(1), 39-52.
- Poponi, D., Bryant, T., Burnard, K., Cazzola, P., Dulac, J., Pales, A. F. ... & West, K. (2016). *Energy technology perspectives 2016: towards sustainable urban energy systems*. International Energy Agency.
- Sala, S., Amadei, A. M., Beylot, A., & Ardente, F. (2021). The evolution of life cycle assessment in European policies over three decades. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *26*, 2295-2314.
- Sen, B., Mia, M., Krolczyk, G. M., Mandal, U. K., & Mondal, S. P. (2021). Eco-friendly cutting fluids in minimum quantity lubrication assisted machining: a review on the perception of sustainable manufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *8*, 249-280.
- Susur, E., & Karakaya, E. (2021). A reflexive perspective for sustainability assumptions in transition studies. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, *39*, 34-54.
- Tolettini, L., & Di Maria, E. (2023). Structuring and measuring environmental sustainability in the steel sector: A single case study. *Sustainability*, *15*(7), 6272.
- Toppinen, A., D'amato, D., & Stern, T. (2020). Forest-based circular bioeconomy: matching sustainability challenges and novel business opportunities? *Forest Policy and Economics*, *110*, 102041.
- Wang, C., Mellin, P., Lövgren, J., Nilsson, L., Yang, W., Salman, H. ... & Larsson, M. (2015). Biomass as blast furnace injectant–Considering availability, pretreatment and deployment in the Swedish steel industry. *Energy Conversion and Management*, *102*, 217-226.
- Wang, P., Kara, S., & Hauschild, M. Z. (2018). Role of manufacturing towards achieving circular economy: the steel case. *CIRP Annals*, *67*(1), 21-24.
- World Steel Association. (2024). World steel in figures 2024. Worldsteel.org. URL.
- Xu, D., Liu, E., Duan, W., & Yang, K. (2022). Consumption-driven carbon emission reduction path and simulation research in steel industry: a case study of China. *Sustainability*, *14*(20), 13693.
- Xu, J., Yu, Q., & Hou, X. (2023). Sustainability assessment of steel industry in the belt and road area based on DPSIR model. *Sustainability*, *15*(14), 11320.
- Zimek, M., Asada, R., Baumgartner, R. J., Brenner-Fliesser, M., Kaltenegger, I., & Hadler, M. (2022). Sustainability trade-offs in the steel industry–A MRIO-based social impact assessment of bio-economy innovations in a Belgian steel mill. *Cleaner Production Letters*, *3*, 100011.
- Zhang, X., Shen, J., Wang, Y., Qi, Y., Liao, W., Shui, W. ... & Yu, X. (2017). An environmental sustainability assessment of China's cement industry based on emergy. *Ecological Indicators*, *72*, 452-458.
- Zhang, J., & Asutosh, A. T. (2025). LCA-emergy and carbon footprint analysis in a steel industry reporting system: A case study of a Chinese steel company. *Science of the Total Environment*, *958*, 177901.
- Zhao, R., Su, H., Chen, X., & Yu, Y. (2016). Commercially available materials selection in sustainable design: an integrated multi-attribute decision making approach. *Sustainability*, *8*(1), 79.