

Research Article

Iran's Steel Industry at a Crossroads: Production Targets and the Carbon Cost of Growth by 2035Razieh Jafaraghaie^{1*}, Mehdi Alikhani²

1- Assistant Professor, Department of Mathematics and Statistics, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

2- Industrial Automation Specialist, Khouzestan Steel Company (KSC), Ahvaz, Iran



Citation: Jafaraghaei, R., and Alikhani, M. (2026), "Iran's Steel Industry at a Crossroads: Production Targets and the Carbon Cost of Growth by 2035", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.48-59. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.596678.1053>

Article info:**Article History:****Received:** 22 February 2026**Revised:** 8 June 2026**Accepted:** 17 June 2026**Published:** 23 September 2026**Keywords:**

Green Steel

Iran

Monte Carlo Simulation

CO₂ Emissions

Scenario Analysis

Hydrogen-Based Direct

Reduction

ABSTRACT

Background: Iran's steel industry produced 32 million tonnes in 2025, ranking tenth globally and first in the Middle East. However, the gap between official targets (55 million tonnes) and actual output, along with the carbon impact of future growth, has rarely been assessed quantitatively and probabilistically. This study aims to evaluate whether production targets can coexist with climate constraints by 2035 and to identify optimal decarbonization pathways, considering Iran's unusual direct reduction-dominated starting point.

Methods: The study uses a mixed-methods approach: describing the 2021–2025 performance with World Steel Association data, and building three production scenarios (Status Quo, Policy Target based on the Vision Document, and Optimistic based on the five-percent growth of the 7th Development Plan) for 2026–2035. CO₂ emissions under three technology pathways (current mix, full gas-based direct reduction, and hydrogen-based direct reduction) were modeled using Monte Carlo simulation with 10,000 iterations and a gate-to-gate system boundary. Iran was also benchmarked against the world's ten largest producers.

Results: Iran's steel production reached 32 million tonnes at a compound annual growth rate of 3.1%. Achieving the 55 million tonne target requires 11.5% annual growth, four times the observed rate. Under the Policy Target scenario, the current technology mix raises emissions to about 82 million tonnes by 2035, nearly doubling them. Completing the shift to full gas-based direct reduction yields only a 14.5% reduction, since its low-carbon advantage has already been captured. In contrast, hydrogen-based direct reduction cuts emissions by 80.6% and is the only pathway aligned with Paris-compatible reduction targets (a 25% cut by 2030).

Conclusion: Iran's production targets are compatible with climate constraints only if adjusted to a realistic growth of three to five percent. Early investment in green hydrogen infrastructure, learning from shared challenges with India rather than Europe, and reporting probabilistic ranges instead of single figures in policy documents are the key practical contributions of this study for policymakers.

* Corresponding Author's E-mail: Razieh.Jafaraghaee@iau.ac.ir



Copyright for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Iranian Society of Steel Structures Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Introduction

The global steel industry accounts for roughly 7 to 9% of global CO₂ emissions, and no credible climate pathway exists without deep cuts in this sector. The challenge is sharpest in emerging producers, where expansion plans and decarbonization pressures collide. Iran illustrates this tension well: with 32.0 Mt of crude steel in 2025, it ranks tenth globally and first in the Middle East, and its output grew 13% over 2021–2025 while world production contracted by about 6%. Yet Iranian planning documents have long targeted 55 Mt of crude steel, a figure first attached to 2025 and achieved only 58%, which now anchors longer-term ambitions. Two features make Iran distinctive. Unlike the blast-furnace-dominated industries of Europe, Japan, or China, about three quarters of Iranian steel is produced via gas-based direct reduction with electric arc furnaces (DRI-EAF), giving it a below-average carbon intensity from the start; and the next step on this platform, hydrogen-based direct reduction (H₂-DRI), is precisely the route tested by leading green-steel pilots such as HYBRIT. However, most techno-economic studies are European and assume a blast-furnace starting point that does not apply to Iran, and the Iran-specific literature remains fragmented, covering demand forecasting, energy use, or qualitative green-steel discussion without combining target assessment, benchmarking, and probabilistic emissions analysis. This study fills that gap by combining policy-anchored scenarios, international benchmarking, and Monte Carlo emission simulation for Iran through 2035, which constitutes the novelty of the work.

Methods

Production data for 2021–2025 and for the ten largest producers were obtained from the World Steel Association. Policy anchors are the 55 Mt target of the national vision document and the 5% annual growth of the 7th Five-Year Development Plan. Route-

specific emission factors are taken from IEA and green-steel assessments: 1.85 t CO₂ per tonne of steel for BF-BOF, 1.10 for gas-based DRI-EAF, and 0.25 for H₂-DRI; the current-mix factor is the 75/25 weighted average, 1.29 t CO₂/t. Because five annual observations are too short and too volatile (growth swung from +8.0% in 2022 to +0.3% in 2023) for reliable statistical extrapolation, projections are anchored in three policy scenarios for 2026–2035: Status Quo (continuation of the observed 3.1% CAGR), Policy Target (linear path to 55 Mt by 2030, then 3% per year), and Optimistic (5% per year per the 7th Plan). Uncertainty is propagated with 10,000 Monte Carlo iterations, applying normal shocks of 5% to production and 10% to emission factors; medians and 95% intervals (2.5th–97.5th percentiles) are reported. All simulations were run in R with a fixed seed for reproducibility. Benchmarking uses 2025 volume, 2021–2025 growth, and world market share.

Results

Production rose from 28.3 to 32.0 Mt (CAGR 3.1%) but with sharp swings (+8.0% in 2022, +0.3% in 2023), showing high sensitivity to energy and sanction shocks. The Policy Target implies about 11.5% average annual growth to 2030, nearly four times the observed rate, while the Optimistic scenario reaches only 40.8 Mt by 2030 and 52.1 Mt by 2035, missing the official target within the horizon. In the international comparison, only four of the ten largest producers grew during 2021–2025 (India +40.1%, Saudi Arabia +23.5%, Iran +13.0%, Egypt +3.4%) while world output fell 5.7%; Iran's growth exceeded the world average by 18.7 percentage points, and it produces about three times the next Middle Eastern producer. Under the Policy Target, the current mix reaches 70.6 Mt CO₂ [55–87] in 2030 and 81.9 Mt CO₂ [64–101] in 2035, nearly double the 2026 level. Completing the shift to full DRI-EAF cuts emissions by only 14.5%, because Iran has already captured most of that route's low-carbon advantage;

European studies that report large DRI gains assume a blast-furnace baseline that does not apply here. By contrast, H₂-DRI cuts emissions by 80.6% (15.9 Mt [13–19]) and is the only pathway that stays below the Paris-aligned benchmark (about 53 Mt) across the whole horizon. From an engineering standpoint, these results mean that capacity expansion plans must be evaluated together with decarbonization pathways, and that the DRI platform already in place gives Iran a credible base for hydrogen pilots. The global shift of steel growth toward Asia and the Middle East supports Iran's case for regional leadership, and its challenges resemble India's constrained expansion more than Europe's BF-to-DRI transition, suggesting South–South cooperation may be more relevant than European partnerships.

Conclusion

Iran is a top-ten producer with positive growth, but its targets outrun observed trends; achieving them with the current mix would nearly double emissions by 2035. DRI completion offers only marginal cuts, while hydrogen delivers about 81% and is the sole Paris-compatible route. The principal technical contribution is a probabilistic, scenario-based framework that quantifies the growth–carbon tension for a DRI-dominated producer, an aspect missing from earlier deterministic studies. Four practical recommendations follow: anchor targets to the observed 3–5% growth; invest early in renewable electricity and hydrogen pilots co-located with steel plants; benchmark against India rather than Europe; and report emission ranges, not single figures, in planning documents. The main limitations are the short data record and policy-anchored parameters, partly compensated by the explicit Monte Carlo uncertainty treatment; future work should update the scenarios as new production and energy data become available.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

During the preparation of this work, the author(s) used a generative AI assistant in

order to improve the language and readability of the manuscript. After using this tool, the author(s) reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author's Contributions

First Author: Conceptualization, Methodology, Formal Analysis, Simulation, Writing—Original Draft, Review and Editing.

Second Author: Data Curation, Technical Validation, Review and Editing.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

صنعت فولاد ایران بر سر دوراهی: اهداف تولید، جایگاه جهانی و بهای کربنی رشد تا ۲۰۳۵

راضیه جعفرآقایی^{۱*}، مهدی علیخانی^۲

۱- گروه ریاضی و آمار، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۲- کارشناس اتوماسیون صنعتی، شرکت فولاد خوزستان، اهواز، ایران



Citation: Jafaraghaei, R., and Alikhani, M. (2026), "Iran's Steel Industry at a Crossroads: Production Targets and the Carbon Cost of Growth by 2035", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.48-59. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.596678.1053>

چکیده

زمینه پژوهش: صنعت فولاد ایران با تولید ۳۲ میلیون تن در سال ۲۰۲۵، دهمین تولیدکننده بزرگ جهان و نخستین تولیدکننده خاورمیانه است. با این حال، شکاف میان اهداف رسمی تولید (۵۵ میلیون تن) و عملکرد واقعی و پیامدهای کربنی رشد آینده این صنعت، کم‌تر به صورت کمی و احتمالاتی سنجیده شده‌اند. هدف این پژوهش، ارزیابی سازگاری اهداف تولید با قیدهای اقلیمی تا سال ۲۰۳۵ و شناسایی مسیرهای بهینه کربن‌زدایی با توجه به نقطه شروع غیرمعمول و احیای مستقیم-محور صنعت فولاد ایران است.

روش پژوهش: این مطالعه از رویکرد ترکیبی بهره می‌گیرد: توصیف عملکرد ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ با داده‌های انجمن جهانی فولاد و ساخت سه سناریوی تولید (وضع موجود، هدف سیاستی مبتنی بر سند چشم‌انداز و خوش‌بینانه مبتنی بر رشد پنج درصدی برنامه هفتم توسعه) برای افق ۲۰۲۶ تا ۲۰۳۵. انتشار دی‌اکسیدکربن تحت سه مسیر فناوری (ترکیب فعلی، احیای مستقیم گازی کامل و احیای مستقیم هیدروژنی) با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ده‌هزار تکرار و با مرز سیستم دروازه کارخانه مدل‌سازی شد. همچنین پنج‌مارک بین‌المللی با ۱۰ تولیدکننده بزرگ جهان انجام گرفت.

یافته‌ها: تولید فولاد ایران با نرخ رشد مرکب ۳/۱ درصد به ۳۲ میلیون تن رسید. رسیدن به هدف ۵۵ میلیون تن به رشد سالانه ۱۱/۵ درصد نیاز دارد که چهار برابر نرخ مشاهده‌شده است. تحت سناریوی هدف سیاستی، ترکیب فناوری فعلی انتشار را تا ۲۰۳۵ به حدود ۸۲ میلیون تن (تقریباً دو برابر) می‌رساند. تکمیل گذار به احیای مستقیم گازی تنها ۱۴/۵ درصد کاهش ایجاد می‌کند، زیرا مزیت کم‌کربن آن پیش‌تر محقق شده است. در مقابل، احیای مستقیم هیدروژنی انتشار را ۸۰/۶ درصد کاهش داده و تنها مسیری است که با هدف‌های کاهش سازگار با توافق پاریس (کاهش ۲۵ درصدی تا ۲۰۳۰) هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری: اهداف تولیدی ایران تنها در صورتی با قیدهای اقلیمی سازگار می‌شوند که بر پایه رشد واقع‌بینانه سه تا پنج درصد تنظیم شوند. سرمایه‌گذاری زودهنگام در زیرساخت هیدروژن سبز، الگوبرداری از چالش‌های مشترک با هند به‌جای اروپا و جایگزینی بازه‌های احتمالاتی به‌جای ارقام قطعی در اسناد سیاستی، از مهم‌ترین دستاوردهای کاربردی این پژوهش برای تصمیم‌گیران است.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۳ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۸ خرداد ماه ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۲۷ خرداد ماه ۱۴۰۵

تاریخ انتشار: ۱ مهر ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

فولاد سبز

ایران

شبیه‌سازی مونت‌کارلو

انتشار دی‌اکسیدکربن

تحلیل سناریو

احیای مستقیم هیدروژنی

کوره قوس الکتریکی

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: Razieh.Jafaraghaei@iau.ac.ir

حقوق نشر این مقاله برای نویسنده(گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه‌های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می‌باشد. برای اطلاعات بیشتر، لطفاً به وبسایت

مربوطه مراجعه فرمایید. <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

قطعی، بازه‌های عدم قطعیت را برای تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران فراهم آورد.

۲- مرور ادبیات و پیشینه پژوهش

ادبیات موجود در حوزه صنعت فولاد ایران و جهان را می‌توان در سه محور اصلی دسته‌بندی کرد. در محور نخست، مطالعات جهانی در زمینه کربن‌زدایی و گذار فناورانه در صنعت فولاد بررسی می‌شود؛ در محور دوم، پژوهش‌های مختص صنعت فولاد ایران شامل چالش‌های زنجیره ارزش، انرژی، آب، تحریم‌ها و توسعه فناورانه مرور می‌شود و در محور سوم، شکاف پژوهشی موجود و نوآوری پژوهش حاضر تبیین می‌شود.

۲-۱- مطالعات جهانی در زمینه کربن‌زدایی و گذار فناوری

صنعت فولاد یکی از بزرگ‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان است و کربن‌زدایی این صنعت به یکی از چالش‌های اصلی سیاست‌گذاری اقلیمی تبدیل شده است. آژانس بین‌المللی انرژی در گزارش‌های خود تأکید کرده است که بدون کاهش عمیق انتشار در صنعت فولاد، دستیابی به اهداف اقلیمی جهانی ممکن نخواهد بود [۲]. آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر نیز در مجموعه گزارش‌های خود، مسیرهای مختلف کربن‌زدایی صنعت فولاد از جمله گذار به هیدروژن سبز، افزایش سهم قراضه، و بهبود راندمان انرژی را بررسی کرده است [۳].

در سطح پژوهش‌های دانشگاهی، فیشدیک^۱ و همکاران گزینه‌های کاهش کربن صنعت فولاد تا سال ۲۰۵۰ را به‌طور جامع بررسی کردند و نشان دادند که ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر با جذب و ذخیره کربن برای دستیابی به کاهش قابل‌توجه انتشار ضروری است [۴].

وو^۲ و همکاران در مطالعه‌ای در نشریه نیچر، مسیرهای فناورانه برای کربن‌زدایی مقرون‌به‌صرفه فولاد را مدل‌سازی کردند [۵].

آلگرز^۳ و همکاران در مرور جامعی نشان دادند که مسیر احیای مستقیم با هیدروژن سبز مهم‌ترین راهکار برای کربن‌زدایی عمیق صنعت فولاد است [۶].

فان^۴ و فریدمن^۵ گزینه‌های فناورانه تولید کم‌کربن فولاد را با ارزیابی اقتصادی و سیاستی بررسی نمودند [۷].

صنعت فولاد یکی از ارکان اصلی توسعه صنعتی در جهان است و نقش مهمی در اقتصاد کشورها ایفا می‌کند. با این حال، این صنعت به دلیل مصرف بالای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، با چالش‌های زیست‌محیطی جدی مواجه است. در سال‌های اخیر، فشارهای بین‌المللی برای کاهش انتشار کربن و حرکت به سمت تولید پایدار، صنعت فولاد را در یک دوراهی قرار داده است: ادامه مسیر رشد با روش‌های فعلی؛ یا تحول به سمت فناوری‌های کم‌کربن.

ایران به عنوان یکی از تولیدکنندگان مهم فولاد در منطقه، با چالش‌های ویژه‌ای مواجه است. از یک سو، اسناد بالادستی و برنامه‌های توسعه، اهداف جاه‌طلبانه‌ای برای افزایش تولید تعیین کرده‌اند. از سوی دیگر، محدودیت‌های منابع طبیعی مانند آب و انرژی و همچنین محدودیت‌های بین‌المللی، تحقق این اهداف را با چالش مواجه کرده‌اند. این شکاف میان اهداف تعیین شده و عملکرد واقعی، یکی از مسائل اصلی سیاست‌گذاری صنعتی در کشور است.

ویژگی بارز صنعت فولاد ایران، اتکای گسترده آن به فناوری احیای مستقیم گازی همراه با کوره قوس الکتریکی است. طبق آمار انجمن فولاد ایران [۱]، در سال ۲۰۲۵، حدود ۷۵ درصد از ظرفیت تولید فولاد خام کشور بر پایه این فناوری استوار است و تنها ۲۵ درصد باقی‌مانده از مسیر کوره بلند-اکسیژن قلیایی تأمین می‌شود. این فناوری نسبت به روش‌های سنتی مبتنی بر کوره بلند، شدت کربن کم‌تری دارد، اما همچنان به تأمین پایدار منابع انرژی وابسته است. در نتیجه، صنعت فولاد ایران در یک موقعیت خاص قرار دارد: از یک سو، مزیت نسبی اولیه در مقایسه با صنایع مبتنی بر زغال‌سنگ دارد، اما از سوی دیگر، برای حرکت به سمت کربن‌زدایی عمیق، نیازمند تحول فناورانه است.

مسئله اصلی این پژوهش آن است که آیا اهداف تولیدی تعیین شده در اسناد بالادستی، با توجه به محدودیت‌های موجود و الزامات کربن‌زدایی، قابل تحقق هستند؟ هدف این مطالعه، ارائه یک چارچوب تحلیلی برای ارزیابی سناریوهای مختلف تولید و انتشار کربن در صنعت فولاد ایران است. نوآوری اصلی این پژوهش در استفاده از شبیه‌سازی احتمالاتی برای کمی‌سازی عدم قطعیت و تلفیق آن با پنج‌مارک بین‌المللی است تا به جای اعداد

¹ Fishedick

² Wu

³ Algers

⁴ Fan

⁵ Friedmann

وگل^۱ و همکاران در یک مطالعه پایه‌ای، نشان دادند که احیای مستقیم هیدروژنی با برق ۱۰۰ درصد تجدیدپذیر، می‌تواند شدت کربن تولید فولاد را به حدود ۰/۲۵ تن به‌ازای هر تن فولاد کاهش دهد [۸].

پروژه سوئدی هایبریت (HYBRIT^۲) نیز نخستین تحویل تجاری فولاد سبز بر پایه این فناوری را در سال ۲۰۲۲ انجام داد [۹].

ماددو^۳ و همکاران پتانسیل کاهش کربن از طریق برقی‌سازی مستقیم تأمین حرارت در صنایع سنگین اروپا را بررسی نمودند که چارچوب مفهومی مناسبی برای درک نقش برقی‌سازی در کربن‌زدایی ارائه می‌دهد [۱۰].

سازمان همکاری اقتصادی و توسعه نیز در گزارش چشم‌انداز فولاد ۲۰۲۵، بر اهمیت سیاست‌گذاری هماهنگ برای کربن‌زدایی صنعت فولاد تأکید کرده است [۱۱].

۲-۲- مطالعات مختص صنعت فولاد ایران

پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی متمرکز بر ایران، ابعاد مختلف ناپایداری در زنجیره ارزش فولاد این کشور را آشکار کرده‌اند:

الف) چالش‌های زنجیره ارزش و انرژی:

قاضی‌نوری و همکاران نشان دادند که زنجیره ارزش فولاد ایران به دلیل پراکندگی کارخانه‌ها و ناپایداری تأمین انرژی، «نامتعارف و ناپایدار» است [۱۲].

مشیری و همکاران تأثیر یارانه‌های انرژی بر شدت مصرف در ایران را تحلیل کردند [۱۳].

محسن‌زاده و همکاران در شرکت فولاد خوزستان نشان دادند که نوسازی تجهیزات می‌تواند انتشار دی‌اکسیدکربن را کاهش دهد [۱۴].

ب) بحران آب و محدودیت‌های زیست‌محیطی:

مادانی؛ شریفی و همکاران به سوءمدیریت منابع آب و بحران حوضه زاینده‌رود پرداختند [۱۵ و ۱۶].

گرگری و همکاران مدل‌سازی ریاضی برای پیوند آب-انرژی-کربن در صنعت فولاد ایران ارائه دادند و آرائی و همکاران تأثیرات زیست‌محیطی توسعه صنایع فولادی در مناطق کم‌آب را به‌شدت منفی ارزیابی نمودند [۱۷ و ۱۸].

ج) تحریم‌ها و توسعه فناوریانه:

عطاریور و همکاران نشان دادند که تحریم‌ها مانع از «یادگیری فناوریانه» در صنعت فولاد ایران شده‌اند [۱۹].

موسوی‌راد و همکاران چالش‌های پایداری ناشی از تحریم‌ها را در صدر موانع توسعه قرار دادند [۲۰].

مجیدپور به شکاف فناوریانه ناشی از انحصار جهانی در صنعت توربین‌های گازی اشاره کرد [۲۱].

د) اهداف سیاستی:

سند چشم‌انداز بیست‌ساله ایران هدف تولید ۵۵ میلیون تن فولاد خام را تعیین کرده بود [۲۲]. برنامه هفتم توسعه نیز بر رشد سالانه ۵ درصدی تأکید دارد [۲۳]. باین‌حال، انجمن فولاد ایران [۱] و آمار انجمن جهانی فولاد نشان می‌دهند که تولید واقعی فاصله قابل‌توجهی با این اهداف داشته است [۲۴].

۲-۳- شکاف پژوهشی

مرور ادبیات نشان می‌دهد که مطالعات پیشین، چالش‌های صنعت فولاد ایران را به‌صورت جزیره‌ای بررسی کرده‌اند. برخی صرفاً بر بحران آب [۱۵ و ۱۶، ۱۸]، برخی بر یارانه‌های انرژی [۱۲ و ۱۳] و برخی بر تأثیر تحریم‌ها [۱۹-۲۱] تمرکز داشته‌اند. ازسوی دیگر، مطالعات جهانی کربن‌زدایی [۴-۷] عمدتاً بر پایه گذار از کوره بلند استوار هستند و نقطه شروع متفاوت ایران را لحاظ نکرده‌اند. شکاف اصلی پژوهش حاضر در عدم وجود یک چارچوب یکپارچه است که تحلیل سناریویی مبتنی بر اسناد سیاستی، شبیه‌سازی احتمالاتی انتشار با مونت کارلو^۴، و پنج‌مارک بین‌المللی را به‌طور هم‌زمان پوشش دهد. این مطالعه با تلفیق این سه بُعد در یک چارچوب واحد، ابزاری کمی و احتمالاتی برای تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران فراهم می‌کند که در مطالعات پیشین صنعت فولاد ایران سابقه ندارد.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- منابع داده

داده‌های تولید ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ و داده‌های ۱۰ تولیدکننده بزرگ از انجمن جهانی فولاد گرفته شده است [۲۴]. اهداف سیاستی عبارت‌اند از هدف ۵۵ میلیون تنی سند چشم‌انداز ملی [۲۲] و رشد سالانه پنج درصدی برنامه هفتم توسعه [۲۳]. ضریب انتشار هر مسیر از آژانس بین‌المللی انرژی و مطالعات فولاد سبز گرفته شده است [۲، ۷، ۸، ۱۰]. مرز سیستم در این پژوهش، دروازه

^۴ Monte Carlo

^۱ Vogl

^۲ Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology

^۳ Madeddu

کارخانه است و شامل فرآیند احیا و ذوب در کارخانه می‌شود. بر این اساس، ضریب انتشار مسیر کوره بلند-اکسیژن قلیایی (میانگین جهانی) برابر ۱/۸۵، مسیر احیای مستقیم-کوره قوس الکتریکی گازی (با احتساب مصرف گاز طبیعی) برابر ۱/۱۰ و مسیر احیای مستقیم هیدروژنی (با فرض هیدروژن سبز تولیدی از برق تجدیدپذیر) برابر ۰/۲۵ تن دی‌اکسیدکربن به‌ازای هر تن فولاد در نظر گرفته شده است [۲ و ۸]. ضریب ترکیب فعلی، میانگین وزنی ۷۵ به ۲۵ است که ۱/۲۹ تن دی‌اکسیدکربن به‌ازای هر تن فولاد می‌شود (جدول (۲)) [۱]. مرز سیستم در این پژوهش، دروازه کارخانه است و شامل فرآیند احیا و ذوب در کارخانه می‌شود. ضریب ۰/۲۵ برای مسیر احیای مستقیم هیدروژنی بر اساس فرض هیدروژن سبز تولیدی از برق ۱۰۰ درصد تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است [۸].

۳-۲- رویکرد سناریویی

سه سناریو برای ۲۰۲۶ تا ۲۰۳۵ تعریف می‌شود (جدول (۱)): «وضع موجود» با ادامه رشد ۳/۱ درصدی مشاهده‌شده، «هدف سیاستی» با رسیدن خطی به ۵۵ میلیون تن تا ۲۰۳۰ و سپس رشد سه درصدی و «خوش‌بینانه» با رشد پنج درصدی سالانه. نرخ رشد پنج درصدی در سناریوی خوش‌بینانه بر اساس اهداف کلان برنامه هفتم توسعه (۱۴۰۲-۱۴۰۶) برای رشد بخش صنعت و معدن به‌عنوان پیشران رشد اقتصادی هشت درصدی و با در نظر گرفتن

ظرفیت‌های بالقوه طرح‌های در دست احداث صنعت فولاد کشور انتخاب شده است [۲۳]. اگرچه تحقق این نرخ نیازمند رفع محدودیت‌های انرژی است، این سناریو به‌عنوان یک سناریوی خوش‌بینانه و مبتنی بر اسناد بالادستی در مدل لحاظ شده است. هدف ۵۵ میلیون تن ابتدا در سند چشم‌انداز بیست‌ساله (افق ۱۴۰۴) برای سال ۲۰۲۵ تعیین شده بود [۲۲]. با توجه به این‌که ایران در سال ۲۰۲۵ تنها به ۳۲ میلیون تن (۵۸ درصد هدف) دست یافت، در این پژوهش فرض شده است که این هدف با تأخیر پنج‌ساله به سال ۲۰۳۰ منتقل شود. این فرض با رویه متداول در برنامه‌ریزی صنعتی ایران (انتقال اهداف محقق‌نشده به افق بعدی) هم‌خوانی دارد.

۳-۳- شبیه‌سازی مونت کارلو

انتشار برابر است با تولید شبیه‌سازی‌شده ضرب در ضریب مسیر. برای انتقال عدم قطعیت، ۱۰۰۰۰ تکرار مونت کارلو اجرا می‌شود: در هر تکرار و هر سال، تولید یک شوک نرمال با انحراف معیار پنج درصد و ضریب انتشار شوکی با انحراف معیار ۱۰ درصد می‌گیرد؛ میانه و بازه ۹۵ درصد گزارش می‌شود (جدول (۲)). انحراف معیار پنج درصد برای تولید بر اساس نوسانات مشاهده‌شده در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ انتخاب شده است. انحراف معیار ۱۰ درصد برای ضرایب انتشار نیز بر اساس بازه گزارش‌شده در مطالعات مختلف برای هر فناوری در نظر گرفته شده است [۲ و ۸].

جدول ۱- سناریوهای تولید فولاد ایران، ۲۰۲۶-۲۰۳۵

مبنا	سناریو	تولید ۲۰۳۵ (Mt)	تولید ۲۰۳۰ (Mt)	فرض رشد
عملکرد واقعی ۲۰۲۱-۲۰۲۵	وضع موجود	۴۳/۴	۳۷/۳	۳/۱٪ در سال (CAGR)
سند چشم‌انداز [۲۲]	هدف سیاستی	۶۳/۸	۵۵/۰	خطی تا ۵۵ تا ۲۰۳۰، سپس ۳٪
برنامه هفتم [۱]	خوش‌بینانه	۵۲/۱	۴۰/۸	در سال ۵٪

یادداشت: سه سناریو، سه آینده ممکن را نشان می‌دهند؛ وضع موجود روند گذشته را ادامه می‌دهد، هدف سیاستی به هدف رسمی ۵۵ میلیون تن می‌رسد و خوش‌بینانه با رشد پنج درصدی پیش می‌رود.

جدول ۲- ضرایب انتشار فناوری و تنظیمات شبیه‌سازی مونت کارلو

منبع/منطق	مقدار	پارامتر
[۱۰]، [۸]، [۷]، [۲]	۱/۸۵	ضریب کوره بلند-اکسیژن قلیایی (t CO ₂ /t steel)
[۱۰]، [۸]، [۷]، [۲]	۱/۱۰	ضریب احیای مستقیم-کوره قوس الکتریکی گازی (t CO ₂ /t steel)
[۹]	۰/۲۵	ضریب احیای مستقیم هیدروژنی (t CO ₂ /t steel)
۷۵٪ احیای مستقیم + ۲۵٪ کوره بلند	۱/۲۹	ترکیب فناوری فعلی (CO ₂ /t steel t)
بازتاب نوسانات اقتصادی	±۵	عدم قطعیت تولید (%)
پوشش پراکندگی فناوری‌ها	±۱۰	عدم قطعیت ضریب انتشار (%)
پایداری برآوردهای صدکی	۱۰,۰۰۰	تعداد تکرار مونت کارلو
مقاوم به توزیع‌های چول	میانه + بازه ۹۵٪	آمار گزارش‌شده

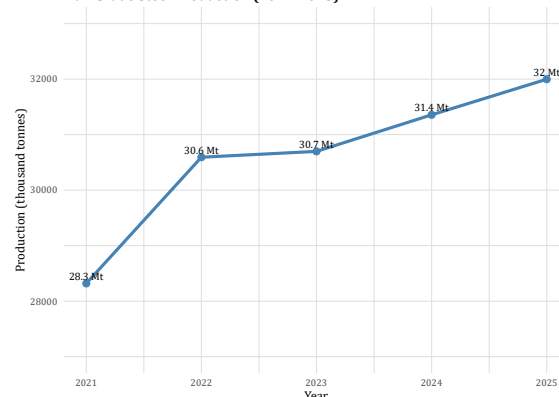
یادداشت: ضرایب انتشار از آژانس بین‌المللی انرژی و مطالعات فولاد سبز؛ t CO₂/t steel = تن دی‌اکسیدکربن به‌ازای هر تن فولاد.

۴- یافته‌ها

۴-۱- عملکرد اخیر (۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵)

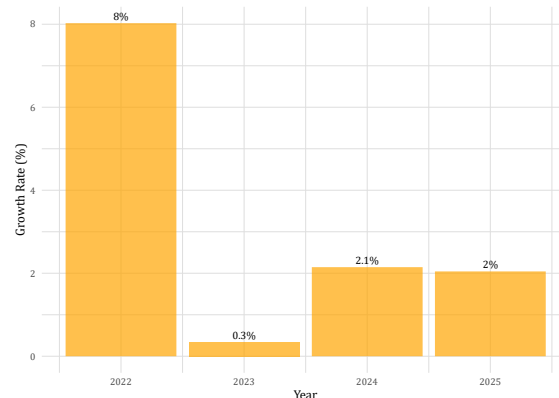
تولید فولاد خام ایران از ۲۸/۳ به ۳۲/۰ میلیون تن رسید (نرخ رشد سالانه مرکب ۳/۱ درصد؛ جمعاً ۱۳/۰ درصد)؛ اما رشد سالانه نوسان زیادی داشت: ۸/۰ درصد (۲۰۲۲)، ۰/۳ درصد (۲۰۲۳)، ۲/۱ درصد (۲۰۲۴) و ۲/۰ درصد (۲۰۲۵) (شکل‌های (۱) و (۲)). این نوسانات نشان می‌دهد که صنعت فولاد ایران بسیار حساس به شوک‌های خارجی است (تحریم، قیمت انرژی، تقاضای جهانی). رشد ۸ درصدی در ۲۰۲۲ احتمالاً بازگشت از کرونا یا افزایش تقاضای داخلی بوده و رکود ۲۰۲۳ ناشی از بحران انرژی و تحریم‌ها است [۲۴].

Iran Crude Steel Production (2021-2025)



شکل ۱- روند تولید فولاد خام ایران، ۲۰۲۱-۲۰۲۵ (Mt)

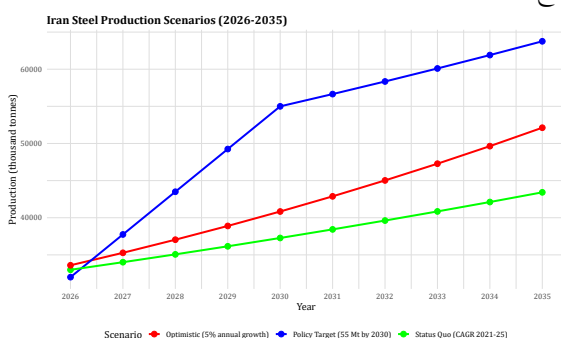
Year-over-Year Growth Rate



شکل ۲- نرخ رشد سالانه تولید فولاد خام ایران (%)

۴-۲- سناریوهای تولید (۲۰۲۶ تا ۲۰۳۵)

نتایج سناریوها در جدول (۱) و شکل (۳) ارائه شده است. سناریوی وضع موجود، تولید را به ۳۷/۳ میلیون تن در ۲۰۳۰ و ۴۳/۴ میلیون تن در ۲۰۳۵ می‌رساند. سناریوی هدف سیاستی به ۵۵ میلیون تن در ۲۰۳۰ و ۶۳/۸ میلیون تن در ۲۰۳۵ می‌رسد، که به رشد سالانه حدود ۱۱/۵ درصد تا ۲۰۳۰ نیاز دارد؛ این نزدیک به چهار برابر نرخ مشاهده‌شده است. سناریوی خوش‌بینانه نیز تنها به ۴۰/۸ میلیون تن در ۲۰۳۰ و ۵۲/۱ میلیون تن در ۲۰۳۵ می‌رسد و هدف رسمی را در این بازه محقق نمی‌کند. این شکاف بزرگ نشان می‌دهد که هدف ۵۵ میلیون تن بیش‌تر بلندپروازانه است تا واقع‌بینانه.



شکل ۳- سناریوهای تولید فولاد ایران، ۲۰۲۶-۲۰۳۵ (هزار تن)

۴-۳- پنج‌مارک بین‌المللی

از ۱۰ تولیدکننده بزرگ، تنها چهار کشور در ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ رشد داشتند: هند (۴۰/۱٪)، عربستان (۲۳/۵٪)، ایران (۱۳/۰٪) و مصر (۳/۴٪)، درحالی‌که تولید جهانی ۵/۷ درصد کاهش یافت (جدول (۳)، شکل‌های (۴) و (۵)). رشد ایران ۱۸/۷ واحد درصد بیش‌تر از میانگین جهانی بود. ایران ۱/۷۳ درصد از تولید جهانی را در اختیار دارد و حدود سه برابر تولیدکننده بعدی خاورمیانه (عربستان) فولاد تولید می‌کند. تمام تولیدکنندگان توسعه‌یافته (چین، آمریکا، ژاپن، آلمان) متقبض شدند. این الگو نشان می‌دهد که مرکز ثقل صنعت فولاد در حال انتقال از غرب به شرق و خاورمیانه است.

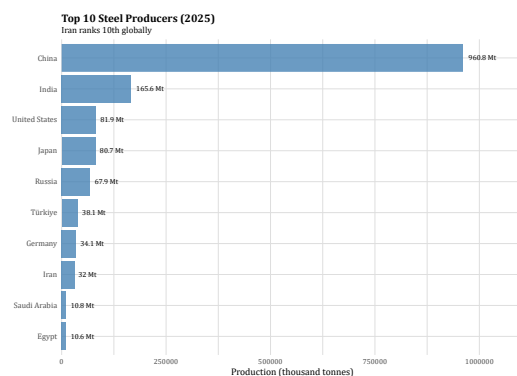
جدول ۳- تولید، رشد و سهم جهانی ۱۰ تولیدکننده بزرگ فولاد

کشور	سهم جهانی ۲۰۲۵ (%)	رشد ۲۰۲۱-۲۰۲۵ (%)	تولید ۲۰۲۵ (Mt)	تولید ۲۰۲۱ (Mt)
China	51.93	-7.2	960.8	1035.2
India	8.95	+40.1	165.6	118.2
United States	4.43	-4.5	81.9	85.8
Japan	4.36	-16.3	80.7	96.3
Russia	3.67	-11.8	67.9	77.0
Türkiye	2.06	-5.6	38.1	40.4
Germany	1.84	-15.3	34.1	40.2
Iran	1.73	+13.0	32.0	28.3
Saudi Arabia	0.58	+23.5	10.8	8.7
Egypt	0.58	+3.4	10.6	10.3

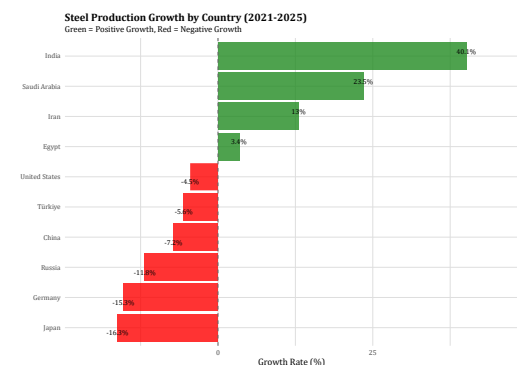
یادداشت: داده‌های تولید از انجمن جهانی فولاد [۲۴]: Mt = میلیون تن؛ علامت مثبت/منفی نشان‌دهنده جهت رشد است.

۴-۴- انتشار دی‌اکسید کربن تحت مسیرهای فناوری

تحت هدف سیاستی، ترکیب فعلی در ۲۰۳۰ به ۷۰/۶ میلیون تن دی‌اکسید کربن (بازه ۵۵ تا ۸۷) و در ۲۰۳۵ به ۸۱/۹ میلیون تن (بازه ۶۴ تا ۱۰۱) می‌رسد که تقریباً دو برابر سطح ۲۰۲۶ است (جدول ۴) و شکل (۶)). گذار کامل به احیای مستقیم-کوره قوس الکتریکی انتشار را تنها ۱۴/۵ درصد کم می‌کند (۷۰/۰ میلیون تن در ۲۰۳۵)، اما احیای مستقیم هیدروژنی آن را ۸۰/۶ درصد کاهش می‌دهد (۱۵/۹ میلیون تن با بازه ۱۳ تا ۱۹) (شکل ۷)). سطح هم‌راستا با توافق پاریس (حدود ۵۳ میلیون تن، معادل کاهش ۲۵ درصدی نسبت به سطح ۲۰۳۰ با ترکیب فعلی) بر اساس مسیرهای کربن‌زدایی عمیق پیشنهادی آژانس بین‌المللی انرژی برای صنایع سخت‌کربن‌بر در سناریوی انتشار خالص صفر (NZE)^۱ و هم‌سو با توصیه‌های هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC)^۲ استخراج شده است [۲]. این سطح را ترکیب فعلی حدود ۲۰۲۸ و احیای مستقیم-کوره قوس الکتریکی کامل حدود ۲۰۲۹ رد می‌کنند، اما احیای مستقیم هیدروژنی در همه سال‌ها زیر آن می‌ماند (شکل ۸)).



شکل ۴- مقایسه تولید ۱۰ تولیدکننده بزرگ فولاد در ۲۰۲۵ (Mt)



شکل ۵- مقایسه رشد تولید فولاد کشورها، ۲۰۲۱-۲۰۲۵ (%)

¹ Net Zero Emissions

² Intergovernmental Panel on Climate Change

جدول ۴- انتشار دی اکسید کربن تحت سناریوهای فناوری، با تولید هدف سیاستی

فناوری	کاهش نسبت به ترکیب فعلی (%)	بازه احتمالی ۲۰۳۵ (CO ₂ Mt)	میان ۲۰۳۵ (Mt CO ₂)	بازه احتمالی ۲۰۳۰ (CO ₂ Mt)	میان ۲۰۳۰ (Mt CO ₂)
ترکیب فعلی	—	64 to 101	81.9	55 to 87	70.6
احیای مستقیم-کوره قوس الکتریکی کامل	14.5	55 to 86	70.0	48 to 74	60.2
فولاد سبز (احیای مستقیم هیدروژنی)	80.6	13 to 19	15.9	11 to 17	13.8

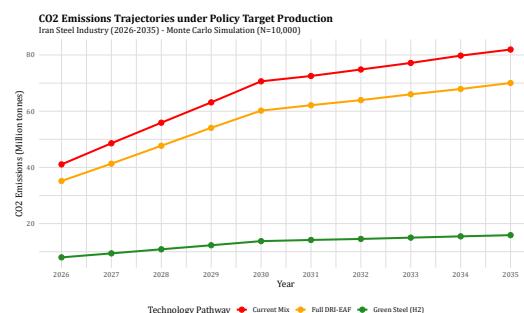
یادداشت: میانه، مرکز نتایج ۱۰۰۰۰ شبیه سازی مونت کارلو است؛ بازه احتمالی، بازه ای است که ۹۵٪ نتایج در آن افتاده اند؛ کاهش، درصد کربن کم تر نسبت به روش فعلی است.

۵- بحث

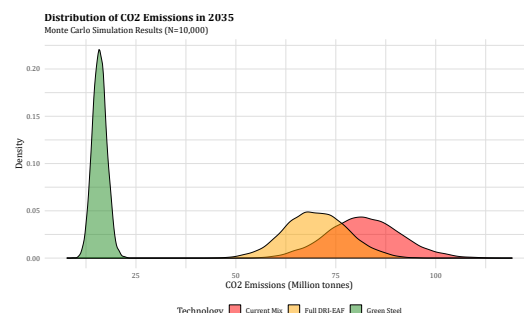
سه نکته برجسته است. نخست، شکاف سیاست و واقعیت بزرگ است: هدف ۵۵ میلیون تن به حدود چهار برابر رشد مشاهده شده نیاز دارد و این الگوی تکراری برنامه ریزی آرمان گرایانه است؛ هدف ۴۰ تا ۴۵ میلیون تنی برای ۲۰۳۰ باورپذیر خواهد بود. سند چشم انداز ۱۴۰۴ هدف ۵۵ میلیون تن تا ۲۰۲۵ را داشت، اما ایران فقط به ۳۲ میلیون تن رسید (۵۸ درصد از هدف). تجربه عدم تحقق این هدف نشان می دهد که هدف گذاری های کلان بدون در نظر گرفتن محدودیت های ساختاری، با چالش های جدی در اجرا مواجه خواهند شد.

دوم، پایه احیای مستقیم-محور ایران دو روی دارد: شدت کربن فعلی (۱/۲۹) بسیار کم تر از میانگین کوره بلند-اکسیژن قلیایی (۱/۸۵) است. کاهش های سهل الوصولی که مطالعات اروپایی [۷ و ۸، ۱۰] برای گذار از کوره بلند به احیای مستقیم گزارش می کنند، در ایران به دلیل استقرار پیشین فناوری احیای مستقیم، پیش تر محقق شده اند؛ از این رو، عدد ۱۴/۵ درصد تنها برای همین پایه فناوری صادق است. بنابراین، صنعت فولاد ایران نمی تواند صرفاً با تکیه بر تکمیل ظرفیت های احیای مستقیم به کاهش های چشم گیر دست یابد و بخش عمده ای از این مزیت نسبی در ساختار فعلی محقق شده است.

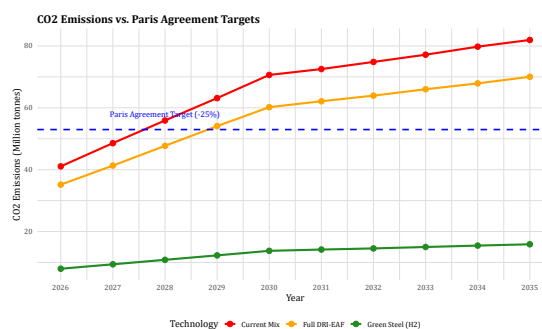
سوم، احیای مستقیم هیدروژنی تنها مسیری است که انتشار را به طور چشم گیری کاهش می دهد و با اهداف اقلیمی هم خوانی دارد؛ اما تحقق آن نیازمند برق تجدیدپذیر، الکترو لایزر و دسترسی به فناوری است که در شرایط تحریم دشوار است. جابه جایی رشد فولاد به آسیا و خاور میانه [۱۱] جایگاه منطقه ای ایران را تقویت می کند. چالش های صنعت فولاد ایران بیش تر به الگوی رشد هند شبیه است تا الگوی گذار اروپا از کوره بلند به احیای مستقیم؛ بنابراین، تبادل تجربه با کشورهایی مانند هند می تواند سودمندتر



شکل ۶- مسیرهای انتشار دی اکسید کربن تحت سناریوی هدف سیاستی (Mt CO₂)



شکل ۷- توزیع انتشار شبیه سازی شده دی اکسید کربن در ۲۰۳۵ (Mt CO₂)



شکل ۸- انتشار دی اکسید کربن در مقایسه با سطح هم راستا با توافق پاریس (Mt CO₂)

از الگوبرداری از اروپا باشد. این مطالعه محدودیت‌هایی نیز دارد: بازه داده‌ها کوتاه و پارامترها مبتنی بر اسناد سیاستی هستند. بااین حال، شبیه‌سازی مونت کارلو با گزارش بازه‌های عدم قطعیت، بخشی از این محدودیت را جبران کرده است.

باید تأکید کرد که رشد تولید فولاد تنها تابع نرخ رشد مرکب سالانه نیست، بلکه به عوامل متعددی از جمله دسترسی به سنگ آهن، وضعیت تأمین برق و انرژی، محدودیت‌های آبی و تحریم‌های بین‌المللی نیز وابسته است [۱۲، ۱۵، ۱۹]. در این پژوهش، این عوامل به‌طور غیرمستقیم در قالب عدم قطعیت پنج درصد برای تولید لحاظ شده‌اند، اما تحلیل صریح تأثیر هریک از این محدودیت‌ها، نیازمند پژوهش‌های آتی است.

۶- نتیجه‌گیری

ایران تولیدکننده‌ای در ۱۰ تایی اول با رشد مثبت است، اما اهداف تعیین شده با روندهای مشاهده شده همخوانی ندارند؛ رسیدن به آن‌ها با ترکیب فعلی، انتشار را تا ۲۰۳۵ تقریباً دو برابر می‌کند. تکمیل گذار احیای مستقیم فقط کاهش‌های کوچک می‌دهد؛ هیدروژن حدود ۸۱ درصد کاهش می‌دهد و تنها مسیر سازگار با پاریس است. چهار پیشنهاد سیاستی ارائه می‌شود:

(۱) اهداف را بر پایه رشد مشاهده شده سه تا پنج درصد تنظیم کنید؛

(۲) زودتر با برق تجدیدپذیر و پیلوت‌های هیدروژن در کنار کارخانه‌های فولاد شروع کنید؛

(۳) با هند مقایسه کنید، نه اروپا؛

(۴) در اسناد برنامه‌ریزی به جای تک عدد، بازه انتشار گزارش کنید.

این پژوهش محدودیت‌هایی نیز دارد. بازه زمانی داده‌ها کوتاه است و پارامترهای مدل بر اساس اسناد سیاستی تنظیم شده‌اند. همچنین، شبیه‌سازی مونت کارلو تنها عدم قطعیت‌های تولید و ضرایب انتشار را پوشش می‌دهد و سایر منابع عدم قطعیت مانند قیمت انرژی، سیاست‌های دولت، تحریم‌های بین‌المللی و دسترسی به فناوری هیدروژن در مدل لحاظ نشده‌اند. گنجاندن این عوامل در قالب سناریوهای شرطی یا تحلیل حساسیت پیشرفته، از مسیرهای پژوهش آینده است.

- [15] Madani, K. (2014), "Water Management in Iran: What Is Causing the Looming Crisis?", *Journal of Environmental Studies & Sciences*, 4(4), pp.315-328.
- [16] Sharifi, A., Mirchi, A., Pirmoradian, R., Mirabbasi, R., Tourian, M.J., Haghighi, A.T., and Madani, K. (2021), "Battling Water Limits to Growth: Lessons from Water Trends in the Central Plateau of Iran", *Environmental Management*, 68(1), pp.53-64.
- [17] Gargari, L.S., Joda, F., and Ameri, M. (2024), "A Techno-Economic Assessment for the Water-Energy-Carbon Nexus Based on the Development of a Mathematical Model: In the Iron and Steel Industry", *Sustainable Energy Technologies & Assessments*, 63, p.103653.
- [18] Arani, M.H., Mohammadzadeh, M., Kalantary, R.R., Rad, S.H., Moslemzadeh, M., and Jaafarzadeh, N. (2021), "Environmental Impact Assessment of a Steel Industry Development Plan Using Combined Method Involving Leopold Matrix and RIAM", *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 19(2), pp.1997-2011.
- [19] Attarpour, M., Elyasi, M., and Mohammadi, A. (2023), "Patterns of Technological Capability Development in Iran's Steel Industry: An Analysis Based on Windows of Opportunity for Technological Learning", *Resources Policy*, 85, p.104040.
- [20] Moosavirad, S.H., and Moshtari, M. (2024), "Sustainability Challenges to the Steel Industry in a Developing Country: Sanctions and Security Issues at the Forefront", *Business Strategy & the Environment*, 33, pp.1-15.
- [21] Majidpour, M. (2011), "The Dynamics of Technological Catching-Up: The Case of Iran's Gas Turbine Industry", PhD Dissertation. Brighton, UK: University of Sussex.
- [22] Management and Planning Organization of Iran (2004), "Iran's Twenty-Year Vision Plan (Horizon 1404)", Tehran, Iran: Management & Planning Organization of Iran. (In Persian)
- [23] Islamic Consultative Assembly (2023), "Seventh Five-Year Development Plan of the Islamic Republic of Iran", Tehran, Iran: Islamic Consultative Assembly. (In Persian)
- [24] World Steel Association (2026), "World Steel in Figures 2026", Brussels: World Steel Association.
- [1] Iranian Steel Producers Association (2026), "Annual Steel Statistics Report", Tehran, Iran: Iranian Steel Producers Association. (In Persian)
- [2] International Energy Agency (IEA) (2023), "Iron and Steel: Tracking Clean Energy Progress", Paris: International Energy Agency.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023), "Decarbonising Hard-to-Abate Sectors with Renewables: Iron and Steel", Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- [4] Fishedick, M., Marquard, A., and Pichler, A. (2015), "Future CO₂ Emissions and Climate Change Mitigation Options for the Iron and Steel Industry", *Energy Policy*, 87, pp.184-197.
- [5] Wu, X., Meng, J., Liang, X., Sun, L., Coffman, D.M., Kontoleon, A., and Guan, D. (2025), "Technological Pathways for Cost-Effective Steel Decarbonization", *Nature*, 647(8088), pp.93-101.
- [6] Algers, J., Åhman, M., and Nilsson, L.J. (2025), "Steel Decarbonization—From Optimization to Transformation", *Annual Review of Environment and Resources*, 50.
- [7] Fan, Z., and Friedmann, S.J. (2021), "Low-Carbon Production of Iron and Steel: Technology Options, Economic Assessment, and Policy", *Joule*, 5(4), pp.829-862.
- [8] Vogl, S., Åhman, M., and Nilsson, L.J. (2018), "Assessment of Hydrogen Direct Reduction for Fossil-Free Steelmaking: A Levelized Cost of Energy Study", *Journal of Cleaner Production*, 203, pp.736-745.
- [9] HYBRIT Development AB (2022), "Fossil-Free Steel: First Commercial Delivery and Technology Summary", Luleå: HYBRIT Development AB.
- [10] Madeddu, S., Ueckerdt, F., Pehl, M., Peterseim, J., Lord, M., Kumar, K.A., and Luderer, G. (2020), "The CO₂ Reduction Potential for the European Industry via Direct Electrification of Heat Supply (Power-to-Heat)", *Environmental Research Letters*, 15(12), p.124004.
- [11] OECD (2025), "Steel Outlook 2025", Paris: OECD Publishing.
- [12] Ghazinoory, S., Fatemi, M., and Adab, A. (2022), "Iranian Steel Value Chain: Advantageous but Unsustainable", *Clean Technologies & Environmental Policy*, 24(7), pp.2099-2115.
- [13] Moshiri, S., Atabi, F., Panjehshahi, M.H., and Lechtenboehmer, S. (2012), "Long-Run Energy Demand in Iran: A Scenario Analysis", *International Journal of Energy Sector Management*, 6(1), pp.120-144.
- [14] Mohsenzadeh, F.M., Payab, H., Abedi, Z., and Abdoli, M.A. (2019), "Reduction of CO₂ Emissions and Energy Consumption by Improving Equipment in Direct Reduction Ironmaking Plant", *Clean Technologies & Environmental Policy*, 21(4), pp.847-860.