



Performance Evaluation of the MIDREX Gas Processing System for Reducing Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in the Steel Industry

Mina Yazdani^{a*}, Bahador Abolpour^a, Hanieh Abbaslou^b

^aDepartment of Chemical Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

^bDepartment of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

*Corresponding Author: Mina.yazdani81@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-0833-0831>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/02/22
Received in revised form:
2026/04/13
Accepted: 2026/04/28
Available online: 2026/06/01

Keywords:
Carbon footprint,
Gas processing,
Hydrogen,
Ironmaking,
Natural gas

ABSTRACT

The steel industry is one of the largest consumers of energy and one of the major sources of greenhouse gas emissions worldwide. Among ironmaking technologies, the natural gas-based direct reduction process, particularly the MIDREX technology, is recognized as one of the most efficient and low-carbon methods for producing direct reduced iron (DRI). Despite its advantages, the performance of the gas processing system, especially the reformer, recuperator, and recycle gas circuit, has a significant impact on energy consumption, process efficiency, and CO₂ emissions. Therefore, evaluating and optimizing this system is essential for improving operational performance and reducing environmental impacts. This study aims to evaluate the performance of the gas processing system in an industrial MIDREX plant with an annual production capacity of 825,000 tons of DRI. Operational data, including process gas composition, reformer efficiency, recuperator performance, recycle gas quality, and operating conditions, were collected and analyzed. Subsequently, a comprehensive process model was developed using Aspen HYSYS to simulate plant operation and assess various optimization scenarios. The results indicate that reduced reformer efficiency, heat losses in the recuperator, and increased concentrations of CO₂ and H₂O in the recycle gas are the primary factors contributing to higher natural gas consumption and increased CO₂ emissions. Simulation results show that improving recuperator performance can reduce the reformer heat duty by 6–8%. In addition, reducing CO₂ in the recycle gas, replacing the reformer catalyst, and increasing the inlet gas preheating temperature can collectively decrease the reformer energy consumption by approximately 12%. Furthermore, the evaluation of improvement scenarios demonstrates that combining these optimization measures with a 30% hydrogen substitution in the reducing gas can lower CO₂ emissions to approximately 0.5–0.6 tons per ton of DRI produced. These findings highlight that optimizing the gas processing system is an effective strategy for enhancing energy efficiency, reducing fossil fuel consumption, and advancing the steel industry toward sustainable and low-carbon production.

Introduction

The steel industry is one of the largest energy consumers and a major contributor to global greenhouse gas emissions, accounting for approximately 7–9% of worldwide CO₂ emissions. Growing global demand for steel, combined with increasingly stringent environmental regulations and international commitments to climate change mitigation, has accelerated the search for low-carbon ironmaking technologies. Among the available alternatives, the natural gas-based Direct Reduction Iron (DRI) process, particularly the MIDREX technology, has gained considerable attention due to its lower carbon footprint compared with conventional blast furnace routes. In addition, MIDREX technology offers operational flexibility and the potential for future integration with hydrogen-based reduction pathways. Within the MIDREX process, the methane gas processing system plays a critical role in determining overall process efficiency, reformer performance, reducing gas quality, and environmental emissions. This system includes gas cooling, scrubbing, drying, compression, purification, recycling, and reforming units. Any inefficiency within these components can increase natural gas consumption, deteriorate the H₂/CO ratio of the reducing gas, elevate thermal loads on the reformer, and consequently increase CO₂ emissions. Despite its significance, comprehensive assessments of the environmental implications of gas processing performance in industrial MIDREX plants remain limited. Therefore, this study investigates the operational behavior of the methane gas processing system and evaluates its contribution to reducing environmental impacts in a commercial MIDREX direct reduction plant. The primary objective of this research was to evaluate the efficiency of the methane gas processing system in reducing environmental burdens associated with MIDREX-based ironmaking. Specifically, the study aimed to identify major energy bottlenecks, quantify their effects on energy consumption and CO₂ emissions, and assess the effectiveness of various improvement scenarios, including reformer optimization, recuperator enhancement, CO₂ removal from recycle gas, and partial hydrogen substitution.

Method

A combined industrial-process analysis and engineering simulation approach was employed. A MIDREX direct reduction plant in Iran with an annual production capacity of approximately 825,000 tons of DRI was selected as the case study. Operational data were collected from various process units, including the reformer, shaft furnace, recuperator, scrubber, compressors, and Top Gas recycling system. Parameters such as gas composition, pressure, temperature, equipment efficiency, and energy consumption were analyzed. Thermal imaging techniques were used to identify abnormal temperature distributions and heat losses in the reformer and recuperator. Subsequently, a comprehensive process model was developed using Aspen HYSYS V9. The model incorporated major chemical reactions, including steam methane reforming, dry reforming, and methane decomposition. Actual plant operating conditions were implemented to compare real performance with ideal design conditions. Several improvement scenarios were simulated, including increased recuperator efficiency, reduced CO₂ concentration in recycle gas, enhanced reformer performance, implementation of Hot Direct Reduced Iron (HDRI) technology, and hydrogen integration. Environmental impacts were quantified through mass and energy balance calculations. CO₂ emissions from fuel combustion and process operations were estimated for each scenario, allowing a comparative evaluation of their environmental benefits. The simulation results were validated against actual plant data to ensure accuracy and reliability of the model predictions.

Results

The results revealed that the reformer, recuperator, and Top Gas recycling system represent the most significant contributors to energy losses and environmental impacts within the MIDREX process. Analysis of the Top Gas system indicated that elevated concentrations of

CO₂ and water vapor reduce reducing-gas quality and decrease the H₂/CO ratio. Environmental factors such as ambient humidity, temperature fluctuations, dust contamination, atmospheric pressure variations, and the presence of SO_x and NO_x pollutants were found to influence gas quality and reduce Top Gas efficiency by approximately 10–12%, resulting in an additional 0.05–0.10 tons of CO₂ emissions per ton of DRI. The reformer was identified as the largest energy consumer within the plant. Catalyst deactivation, uneven flame distribution, carbon deposition, and inadequate insulation were found to significantly increase fuel consumption. Simulation results demonstrated that reformer optimization could reduce natural gas consumption by up to 12%, corresponding to a reduction of approximately 0.12 tons CO₂ per ton of DRI. The recuperator was found to have a substantial influence on process energy efficiency. Improving heat recovery performance increased inlet gas temperatures and reduced reformer thermal demand by approximately 6–8%, resulting in a further reduction of CO₂ emissions. Additional simulations showed that reducing recycle-gas CO₂ concentration from 15% to 8% increased the H₂/CO ratio from 1.2 to 1.6 while decreasing reformer heat requirements by approximately 5%. Furthermore, replacing 30% of natural gas with hydrogen reduced reformer energy demand by 18–20% and significantly lowered carbon emissions. The combined implementation of all improvement measures yielded the most promising results. Total natural gas consumption decreased by approximately 22–25%, while CO₂ emissions were reduced by 0.5–0.6 tons per ton of DRI produced. These findings demonstrate that systematic optimization of the methane gas processing system can achieve substantial environmental benefits while maintaining operational efficiency.

Conclusions

The findings confirm that methane gas processing performance in the MIDREX direct reduction process has a major impact on energy consumption, reducing gas quality, and CO₂ emissions. The reformer, recuperator, and Top Gas system were identified as the main sources of efficiency losses. Reformer inefficiency caused by carbon deposition, temperature non-uniformity, and inadequate insulation increases natural gas consumption and CO₂ emissions, while recuperator heat losses and poor recycled gas quality increase the reformer's thermal load and reduce the H₂/CO ratio. Simulation results indicate that improving these three sections through better control, heat recovery, and gas drying can significantly enhance system performance. Combined optimization measures have the potential to reduce CO₂ emissions by approximately 0.5–0.6 tons per ton of DRI, with substantial benefits for energy costs and emission intensity. The study also indicates that gradual hydrogen integration, particularly with 30% substitution of natural gas, could provide an effective pathway for further decarbonization. Overall, optimization of the gas processing system is both a technical necessity and an important strategy for sustainable and low-carbon steel production. Future studies should focus on the effects of furnace load variations, economic evaluation of hydrogen substitution scenarios, and real-time optimization of gas processing systems.



ارزیابی عملکرد سیستم فرآوری گاز MIDREX با هدف کاهش مصرف انرژی و انتشار دی اکسید کربن در صنعت فولاد

مینا یزدانی^{a*}، بهادر ابولپور^a، حانیه عباسلو^b

^aگروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

^bگروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

*نویسنده مسئول: Mina.yazdani81@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱	صنعت فولاد یکی از اصلی ترین مصرف کنندگان انرژی و از بزرگ ترین منابع انتشار گازهای گلخانه ای در جهان به شمار می رود. در میان فناوری های تولید آهن، فرایند احیای مستقیم مبتنی بر گاز طبیعی، به ویژه فناوری MIDREX، به عنوان یکی از کارآمدترین و کم کربن ترین روش های تولید آهن اسفنجی شناخته می شود. با وجود مزایای این فناوری، عملکرد سیستم فرایند گاز، به ویژه بخش های رفورمر، ریکوپراتور و مدار بازیافت گاز، تأثیر مستقیمی بر مصرف انرژی، بازده فرایند و میزان انتشار دی اکسید کربن دارد. از این رو، ارزیابی و بهینه سازی این بخش از فرایند، نقش مهمی در افزایش بهره وری و کاهش اثرات محیط زیستی ایفا می کند. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد سیستم فرایند گاز در یک واحد صنعتی MIDREX با ظرفیت تولید ۸۲۵ هزار تن آهن اسفنجی در سال انجام شد. در این راستا، داده های عملیاتی شامل ترکیب گازهای فرایندی، بازده رفورمر، عملکرد ریکوپراتور، کیفیت گاز برگشتی و شرایط عملیاتی واحد جمع آوری و تحلیل شدند. سپس مدل کامل فرایند با استفاده از نرم افزار Aspen HYSYS توسعه یافته و برای بررسی عملکرد واقعی و ارزیابی سناریوهای مختلف بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که افت بازده رفورمر، اتلاف حرارتی در ریکوپراتور و افزایش غلظت CO ₂ و H ₂ O در گاز برگشتی، مهم ترین عوامل افزایش مصرف گاز طبیعی و رشد انتشار CO ₂ هستند. بر اساس نتایج شبیه سازی، بهبود عملکرد ریکوپراتور می تواند بار حرارتی رفورمر را ۶ تا ۸ درصد کاهش دهد. همچنین کاهش CO ₂ گاز برگشتی، تعویض کاتالیست رفورمر و افزایش دمای پیش گرمایش گاز ورودی، در مجموع موجب کاهش حدود ۱۲ درصدی مصرف انرژی رفورمر می شوند. افزون بر این، ارزیابی سناریوهای اصلاحی نشان داد که ترکیب اقدامات بهینه سازی با جایگزینی ۳۰ درصد هیدروژن در گاز احیا کننده، قادر است انتشار CO ₂ را به حدود ۵/۰ تا ۶/۰ تن به ازای هر تن آهن اسفنجی کاهش دهد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که بهینه سازی سیستم فرایند گاز، راهبردی مؤثر برای افزایش بهره وری انرژی، کاهش مصرف سوخت های فسیلی و حرکت صنعت فولاد به سوی تولید پایدار و کم کربن است.
کلیدواژه ها: آهن سازی، ردپای کربن، فرایند گاز، هیدروژن، گاز طبیعی.	

مقدمه

صنعت فولاد به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی و منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای، سهمی قابل‌توجه (حدود ۷ تا ۹ درصد) در انتشار دی‌اکسیدکربن جهانی دارد (Ariyama, 2025; Davis et al., 2025; World Steel Association, 2024) با تولید سالانه بیش از ۱/۹ میلیارد تن فولاد، این صنعت با فشارهای فزاینده‌ای از سوی توافقات بین‌المللی اقلیمی و مقررات محیط‌زیستی سخت‌گیرانه برای گذار به مسیرهای تولید کم‌کربن مواجه است (Draxler et al., 2021; Schlacke et al., 2022). توافق پاریس و متعاقباً تعهدات بیش از ۴۰ کشور برای دستیابی به بی‌طرفی کربنی تا سال ۲۰۵۰، جستجو برای فناوری‌های تحول‌آفرینی را که قادر به کاهش قابل‌توجه ردپای کربن صنعت فولاد باشند، شتاب بخشیده است.

در میان مسیرهای مختلف تولید آهن، فرایند احیای مستقیم با گاز طبیعی و به‌ویژه فناوری MIDREX جایگاه ویژه‌ای دارد؛ زیرا نسبت به روش کوره‌بلند، مصرف انرژی و انتشار CO₂ کمتری داشته و امکان یکپارچه‌سازی آن با هیدروژن نیز وجود دارد (Astoria et al., 2023; Chevrier et al., 2021; Kopfle & Hunter, 2008). مسیر-DRI-EAF می‌تواند انتشار مستقیم CO₂ را تا ۶۸ درصد در مقایسه با روش سنتی کوره‌بلند-کوره اکسیژن‌پایه کاهش دهد (Skaf et al., 2025). به‌طوری‌که شرکت تکنولوژی میدرکس^۱ گزارش کرده است تولید جهانی آهن اسفنجی از طریق واحدهای MIDREX در سال ۲۰۲۳ به ۷۶ میلیون تن رسیده و پیش‌بینی می‌شود تقاضای جهانی برای آهن اسفنجی و آهن بریکت‌شده داغ^۲ (HBI) تا سال ۲۰۳۰ به ۱۸۰ میلیون تن برسد که برای تأمین آن به سرمایه‌گذاری حدود ۱۶ تا ۲۰ میلیارد دلاری در واحدهای جدید نیاز است (S&P Global, 2026). این گسترش، ضرورت بهبود مستمر در بازدهی فرایند و عملکرد محیط زیستی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

در فرایند MIDREX، سیستم پردازش گاز متان شامل واحدهای خنک‌سازی، خشک‌سازی، تصفیه، فشرده‌سازی و بازیافت گاز برگشتی است و کیفیت و ترکیب گاز احیاکننده نقش تعیین‌کننده‌ای در بازده انرژی، کیفیت آهن اسفنجی و میزان انتشار آلاینده‌ها دارد. کوچک‌ترین افت عملکرد در این بخش‌ها می‌تواند باعث افزایش بار رفورمر، افزایش مصرف گاز طبیعی، کاهش نسبت H₂/CO و در نتیجه افزایش انتشار CO₂ شود (Zhao et al., 2022). رفورمر به‌ویژه بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی در واحد است و عملکرد آن مستقیماً تحت تأثیر کیفیت گاز برگشتی Top Gas و بازده ریکوپراتور^۳ قرار دارد.

مطالعات متعددی به بررسی ابعاد مختلف بهینه‌سازی فرایند MIDREX پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، عبادی و همکاران^۴ مدل‌سازی و بهینه‌سازی رفورمرهای MIDREX با سوخت متانول را برای تولید کارآمد هیدروژن بررسی کردند. وو و همکاران^۵ تحلیل فنی-اقتصادی جامعی از یکپارچه‌سازی جذب و ذخیره‌سازی کربن با فرایند MIDREX انجام داده و بازده سرمایه‌گذاری ۱۹۰۹ درصدی را گزارش کرده‌اند که viability اقتصادی را در شرایط فعلی بازار نشان می‌دهد. اسکاف و همکاران^۶ استراتژی‌های تولید آهن سبز مبتنی بر هیدروژن را ارزیابی کرده و نشان داده‌اند که سناریوهای مبتنی بر هیدروژن می‌توانند ردپای کربن را بسته به منبع تأمین برق، ۵۳ تا ۸۲ درصد در مقایسه با MIDREX معمولی مبتنی بر گاز طبیعی کاهش دهند. همچنین آستوریا و همکاران^۷ مسیرهای گذار از MIDREX مبتنی بر گاز طبیعی به هیدروژن را مطالعه کرده و امکان‌پذیری فنی ادغام تدریجی هیدروژن را برجسته ساخته‌اند.

1. Midrex Technologies

2. Hot Briquetted Iron (HBI)

3. Recuperator

4. (Abadi et al., 2026b)

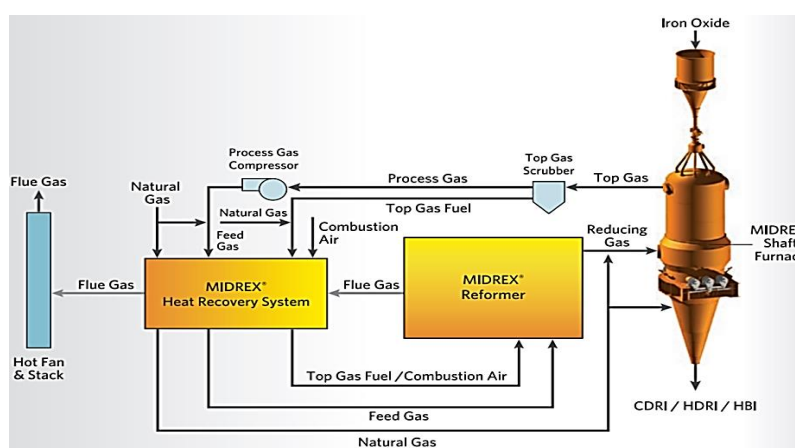
5. (Vu et al., 2024)

6. (Skaf et al., 2025)

7. (Astoria et al., 2023)

در راستای توسعه فناوری‌های سبز، پژوهش‌های جدید بر روی مدل‌سازی جامع و شبیه‌سازی‌های چندفیزیکی برای بهینه‌سازی عملکرد ریفورمرهای MIDREX متمرکز شده‌اند. به عنوان مثال، مطالعه‌ای جامع با استفاده از داده‌های واقعی یک واحد صنعتی در ایران، رفتار حرارتی، سینتیکی و ترمودینامیکی یک ریفورمر متان را شبیه‌سازی کرده و نشان داده است که افزایش دمای دیواره از ۱۳۰۰ به ۱۵۰۰ کلوین، تولید هیدروژن را تا ۱۲۰۲۴ درصد افزایش می‌دهد (Abadi et al., 2026a). همچنین، فناوری MIDREX Flex با ارائه قابلیت انعطاف‌پذیری در استفاده از گاز طبیعی و هیدروژن، مسیری عملی برای کاهش تدریجی انتشار CO₂ فراهم آورده است، به گونه‌ای که واحدهای مجهز به این فناوری می‌توانند با کمترین تغییرات در تجهیزات، تا ۳۰ درصد گاز طبیعی خود را با هیدروژن جایگزین نمایند (Midrex Technologies, Inc., 2025). با وجود اهمیت شناخته‌شده سیستم پردازش گاز، در بسیاری از واحدهای صنعتی، تحلیل سیستماتیک و جامع از رفتار واقعی آن، گلوگاه‌های انرژی و اثرات محیط‌زیستی مرتبط انجام نشده است؛ این موضوع شکاف اصلی پژوهشی را تشکیل می‌دهد (Abadi et al., 2026; Kopfle & Hunter, 2008). بیشتر مطالعات موجود بر مؤلفه‌های منفرد متمرکز بوده‌اند تا تحلیل یکپارچه از کل سیستم پردازش گاز، و تعداد کمی از آن‌ها یافته‌های خود را با داده‌های عملیاتی واقعی صنعتی از واحدهای ایرانی اعتبارسنجی کرده‌اند.

پژوهش حاضر با هدف تحلیل دقیق عملکرد سیستم پردازش گاز MIDREX بر اساس داده‌های واقعی صنعتی و شبیه‌سازی مهندسی انجام شده است. در این تحقیق، نواقص کلیدی شامل بازدهی پایین ریفورمر، اتلاف حرارتی ریکوپراتور، ناکارآمدی سیستم Top Gas و اثرات ترکیب نامناسب گاز برگشتی شناسایی و اثر هر یک بر مصرف انرژی و انتشار CO₂ کمی‌سازی شده است (Zhao et al., 2022). همچنین سناریوهای اصلاحی مانند افزایش بازده بازیابی حرارت، کاهش CO₂ گاز برگشتی و جایگزینی هیدروژن بررسی شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اصلاح سیستم پردازش گاز می‌تواند یکی از مؤثرترین راهکارها برای حرکت به سوی تولید فولاد سبز باشد و امکان کاهش انتشار CO₂ را تا حدود ۰٫۵ تا ۰٫۶ تن به ازای هر تن آهن اسفنجی فراهم کند؛ عددی که در مقیاس صنعتی بسیار قابل توجه است. این پژوهش ضمن ارائه تحلیل فنی دقیق، مسیر عملی برای بهینه‌سازی انرژی و ارتقای پایداری محیط‌زیستی واحدهای احیای مستقیم پیشنهاد می‌کند (Rechberger et al., 2020; Skaf et al., 2025). فلوشتیت استاندارد MIDREX با گاز طبیعی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. فلوشتیت استاندارد میدرکس گاز طبیعی (Midrex Technologies, Inc., 2021)

Figure 1. Standard Midrex Natural Gas Flowsheet

روش انجام این پژوهش بر پایه یک رویکرد ترکیبی شامل تحلیل داده‌های عملیاتی یک واحد صنعتی MIDREX، شبیه‌سازی مهندسی و مدل‌سازی موازنه جرم و انرژی طراحی شده است. هدف اصلی این بخش شناخت دقیق رفتار

سیستم فرایند گاز و شناسایی عوامل مؤثر بر کارایی انرژی و انتشار CO₂ است. مراحل تحقیق شامل چهار بخش اصلی زیر است.

آهن‌سازی به روش میدرکس

فرایند MIDREX متداول‌ترین فناوری احیای مستقیم در جهان است و بر پایه تبدیل گاز طبیعی به گاز احیاکننده (H₂ و CO) و واکنش آن با سنگ‌آهن در کوره شفتی است. در این واحد صنعتی، سنگ‌آهن گندله پس از ورود از بالای کوره، توسط گاز احیاکننده داغ در دماهای حدود ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد احیا شده و آهن اسفنجی (DRI)^۱ تولید می‌شود (Midrex Technologies, Inc., 2021).

مراحل اصلی فرایند به صورت زیر است:

۱- تولید گاز احیاکننده

گاز طبیعی (CH₄) در رفرورمر با استفاده از سطوح بالای حرارت و حضور کاتالیست، از طریق واکنش‌های ریفورم بخار (معادله ۱) و ریفورم خشک (معادله ۲) به گاز احیاکننده شامل H₂ و CO تبدیل می‌شود (Horne & Miller, 2017).



۲- احیا در کوره شفتی

گاز احیا با دمای حدود ۹۰۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد وارد بخش پایین کوره شفتی می‌شود و به سمت بالا حرکت می‌کند. گندله آهن از بالا وارد شده و واکنش طبق معادله ۳ انجام می‌شود (Szekely et al., 1976):



۳- بازیافت گاز خروجی (Top Gas)

گاز خروجی کوره (Top Gas) شامل CO، CO₂، H₂ و گردوغبار است. این گاز پس از خنک‌سازی و تصفیه، بخشی به رفرورمر بازگردانده می‌شود و بخشی مشعل‌ها را تغذیه می‌کند. در این مطالعه، تمامی داده‌های مربوط به دما، فشار، ترکیب گاز و عملکرد بخش‌های ذکر شده، از واحد مورد مطالعه برداشت و تحلیل شدند.

سیستم فرایند گاز

سیستم فرایند گاز بخش کلیدی فرایند MIDREX است و وظیفه آن آماده‌سازی گاز برگشتی برای ورود دوباره به رفرورمر است. هرگونه نقص در این سیستم می‌تواند بازده رفرورمر و کل فرایند را کاهش دهد.

اجزای اصلی سیستم فرایند گاز عبارت‌اند از:

- خنک‌سازی اولیه: Top Gas از دمای حدود ۴۰۰-۳۵۰ درجه سانتی گراد به حدود ۴۰ درجه سانتی گراد می‌رسد. این مرحله برای جلوگیری از آسیب به تجهیزات بعدی ضروری است.

- حذف گردوغبار: در اسکرابر، گردوغبار و بخشی از CO₂ جذب شده و رطوبت گاز کاهش می‌یابد. در صورتی که عملکرد این بخش ضعیف باشد، CO₂ و H₂O بالا وارد رفرورمر شده و بار آن افزایش می‌یابد (Wang et al., 2020).

- فشرده‌سازی گاز تصفیه‌شده به فشار ۲-۳ bar فشرده می‌شود تا امکان ورود به مبدل‌های حرارتی و رفرورمر را داشته باشد.

-پیش گرمایش در ریکوپراتور: ریکوپراتور با استفاده از دودکش رفورمر، گاز برگشتی را از ۴۰ درجه سانتیگراد به حدود ۴۵۰-۵۲۰ درجه سانتیگراد گرم می کند.

این بخش مهم ترین واحد کاهش دهنده مصرف انرژی است (Kumar & Singh, 2018). افت عملکرد ریکوپراتور یکی از دلایل افزایش CO₂ در واحدهای صنعتی است.

- مخلوط سازی با گاز طبیعی (NG + Recycle Mixing): نسبت گاز طبیعی به گاز برگشتی براساس طراحی واحد تنظیم می شود.

نسبت بیشتر گاز برگشتی^۱ معمولاً سبب کاهش هزینه سوخت و بهبود کیفیت گاز احیا می شود.

- ورود مخلوط به رفورمر: در رفورمر گاز گرم شده در حضور کاتالیست به H₂ و CO تبدیل شده و به سمت کوره شفتی ارسال می شود.

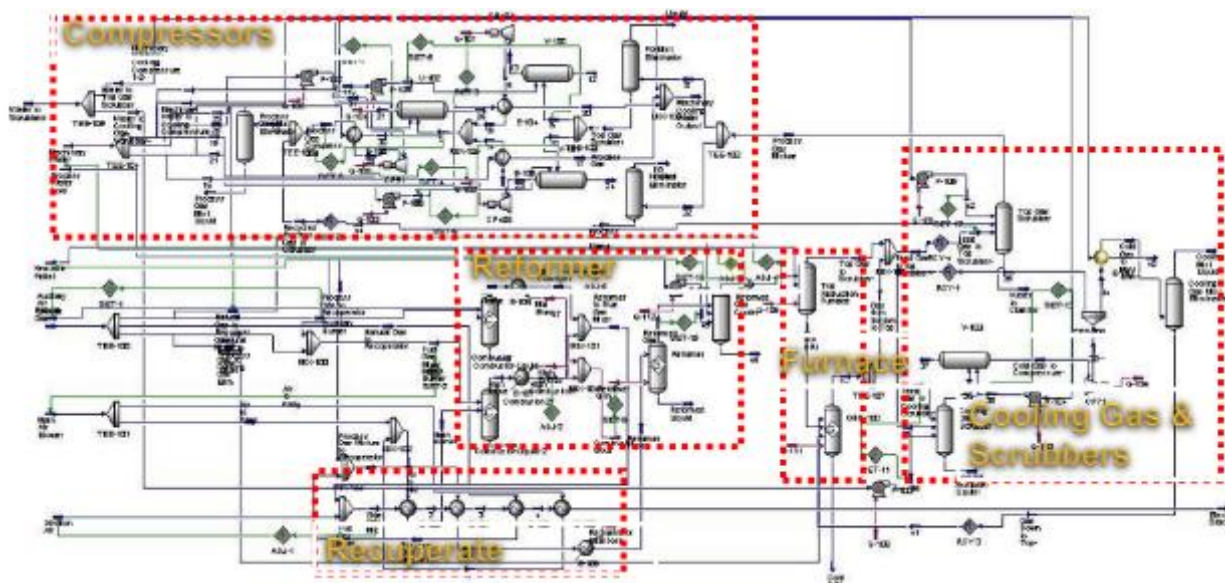
شبیه سازی با نرم افزار Aspen HYSYS

به منظور تحلیل دقیق عملکرد سیستم فرایند گاز و سنجش اثر تغییرات عملیاتی، یک مدل کامل فرایند در نرم افزار Aspen HYSYS ساخته شد (Alvarez & Gómez-Barea, 2018). در شبیه سازی انجام شده، معادله حالت Soave-Redlich-Kwong به عنوان مدل ترمودینامیکی انتخاب شد، زیرا ترکیب گازهای موجود در فرایند شامل متان، هیدروژن، مونوکسید کربن و دی اکسید کربن است و این معادله حالت دقت مناسبی در پیش بینی رفتار ترمودینامیکی چنین مخلوط هایی در دما و فشار عملیاتی واحد MIDREX دارد (International Energy Agency, 2021). انتخاب این مدل امکان محاسبه صحیح تعادل فاز، آنتالپی و خواص انتقالی جریان های گازی را فراهم کرد و پایه اصلی شبیه سازی دقیق فرایند را شکل داد. مدل شبیه سازی به صورت یک فلو شیت کامل فرایندی ایجاد شد که تمامی واحدهای اصلی سیستم فرایند گاز را دربر می گرفت. این مدل شامل رفورمر، ریکوپراتور، مبدل های حرارتی، کمپرسور گاز برگشتی، اسکرابر، خطوط انتقال گاز طبیعی و مسیرهای بازیافت گاز بود. اتصال صحیح این تجهیزات به یکدیگر به گونه ای انجام شد که مسیر واقعی جریان ها، تبادل حرارت و افت فشارها مطابق با شرایط صنعتی بازسازی شود و رفتار کل واحد به صورت یکپارچه قابل تحلیل باشد. در مدل شبیه سازی، واکنش های شیمیایی اصلی حاکم بر عملکرد رفورمر تعریف شدند. این واکنش ها شامل ریفورمینگ بخار متان، ریفورمینگ خشک متان با دی اکسید کربن و واکنش تجزیه متان بودند که همگی به صورت واکنش های گرماگیر در نظر گرفته شدند. نرخ این واکنش ها بر اساس داده های صنعتی و سینتیک های متداول تنظیم شد تا تولید هیدروژن و مونوکسید کربن در شرایط عملیاتی واقعی با دقت مناسبی شبیه سازی شود.

به منظور نزدیک کردن شبیه سازی به عملکرد واقعی واحد، شرایط عملیاتی حقیقی مستقیماً در مدل اعمال شد. این داده ها شامل دمای گازهای ورودی، فشار گاز برگشتی، دمای کاری رفورمر، ترکیب گاز احیا کننده و دمای دودکش رفورمر بود. اعمال این اطلاعات باعث شد نتایج شبیه سازی بازتاب دقیقی از وضعیت موجود واحد صنعتی داشته باشد و امکان مقایسه مستقیم بین شرایط واقعی و شرایط اصلاح شده فراهم شود.

پس از پایدارسازی مدل، سناریوهای مختلف اصلاحی بر روی شبیه سازی اجرا شد. این سناریوها شامل افزایش بازده ریکوپراتور، کاهش میزان دی اکسید کربن در گاز برگشتی، جایگزینی تدریجی هیدروژن به میزان ۱۰ تا ۳۰ درصد، بهبود عایق بندی رفورمر و افزایش دمای پیش گرمایش گاز ورودی بودند. برای هر سناریو، شاخص هایی نظیر مصرف گاز طبیعی، ترکیب گاز احیا، دمای محصول، میزان انتشار دی اکسید کربن و تغییر بار حرارتی رفورمر استخراج و با یکدیگر مقایسه شدند تا اثر هر اقدام اصلاحی به صورت کمی ارزیابی شود. فلو شیت فرایندی شبیه سازی شده در نرم افزار Aspen HYSYS در شکل ۲ ارائه شده است.

^۱- Recycle Gas



شکل ۲. Pfd شبیه سازی شده توسط نرم افزار Aspen HYSYS V9
Figure 2. PFD simulated by Aspen HYSYS V9 software

موازنه جرم و انرژی

موازنه جرم و انرژی واحد احیای مستقیم MIDREX به صورت جامع و یکپارچه انجام شد تا ارتباط دقیق بین جریان‌های مادی، مصرف انرژی و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن به طور کمی مشخص شود. موازنه جرم بر پایه شناسایی و ردیابی تمامی جریان‌های ورودی و خروجی سیستم فرایند گاز و کوره شفتی انجام گرفت (Himmelblau & Riggs, 2012). جریان‌های اصلی شامل گاز طبیعی ورودی به رفورمر، گاز برگشتی حاصل از بالای کوره شفتی، گاز احیاکننده تولیدی و گاز خروجی Top Gas بودند. با در نظر گرفتن پایستگی جرم، برای هر یک از واحدهای عملیاتی معادلات موازنه نوشته شد تا تطابق کامل بین جرم ورودی و خروجی برقرار گردد. این تحلیل نشان داد که افزایش سهم CO_2 و بخار آب در گاز برگشتی، بدون تغییر محسوس در دبی جرمی کل، باعث تغییر قابل توجه در ترکیب گاز ورودی به رفورمر می‌شود که در نهایت کیفیت گاز احیاکننده را کاهش داده و نیاز به مصرف انرژی بیشتر را ایجاد می‌کند.

محاسبه شاخص‌های محیط‌زیستی

شاخص‌های محیط زیستی در روابط ۴ تا ۸ نشان داده شده‌اند.

- شدت کربن ویژه واحد (Specific Carbon Intensity – SCI)

$$SCI = \frac{(\text{سال/تن}) \text{ کل انتشار دی اکسید کربن}}{(\text{سال/تن}) \text{ تولید آهن اسفنجی}} \quad (4)$$

انتشار CO_2 در حالت پایه حدود ۰/۵ تا ۰/۶ تن به ازای هر تن آهن اسفنجی ذکر شده است. با احتساب ظرفیت واحد (۸۲۵ هزار تن در سال)، انتشار سالانه حدود ۴۱۲،۵۰۰ تا ۴۹۵،۰۰۰ تن CO_2 است. شاخص شدت کربن ویژه واحد می‌دهد که به ازای هر تن محصول، چه مقدار CO_2 منتشر می‌شود. پس از اعمال راهکارهای بهینه‌سازی (بهبود ریکوپراتور، کاهش CO_2 برگشتی، جایگزینی هیدروژن)، این مقدار می‌تواند تا ۰/۴ تن/تن کاهش یابد که معادل کاهش ۲۰٪ در شدت کربن است. این بهبود، همسو با اهداف صنعت فولاد کم‌کربن است.

- بازده انرژی ویژه (Specific Energy Consumption – SEC)

$$SEC = \frac{(\text{سال/گیگاژول}) \text{ مصرف گاز طبیعی}}{(\text{سال/تن}) \text{ تولید آهن اسفنجی}} \quad (5)$$

با توجه به کاهش ۲۲ تا ۲۵ درصدی مصرف گاز طبیعی پس از بهینه‌سازی، اگر مصرف اولیه واحد را حدود ۱۰ گیگاژول بر تن در نظر بگیریم، پس از بهبود به ۷/۵ تا ۷/۸ گیگاژول بر تن می‌رسد. این شاخص نشان می‌دهد که به ازای هر تن آهن اسفنجی، چقدر انرژی مصرف می‌شود. کاهش ۲۵-۲۲٪ در SEC نشان‌دهنده بهبود قابل توجه بهره‌وری انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است.

- نسبت کاهش انتشار ناشی از هیدروژن (H₂ Substitution Impact – HSI)

$$HSI = \frac{\text{کاهش دی اکسید کربن ناشی از جایگزینی هیدروژن}}{\text{کل انتشار پایه}} \quad (6)$$

جایگزینی ۳۰٪ هیدروژن منجر به کاهش ۰/۲۵ تن دی اکسیدکربن به ازای تن DRI می‌شود. اگر انتشار پایه را ۰/۵ تن/تن بگیریم، $HSI \approx ۵۰\%$ خواهد بود. این شاخص نشان می‌دهد که جایگزینی هیدروژن چقدر می‌تواند در کاهش انتشار موثر باشد. مقدار ۵۰٪ بیانگر پتانسیل بالای هیدروژن برای کربن‌زدایی در فرآیند MIDREX است.

- نسبت بازیافت حرارتی مؤثر (Effective Heat Recovery Ratio – EHRR)

$$EHRR = \frac{(\text{سال/گیگاژول}) \text{ انرژی بازیافتی ریکوپراتور}}{(\text{سال/گیگاژول}) \text{ انرژی ورودی ریفورمر}} \quad (7)$$

با بهبود ریکوپراتور، ۶-۸٪ از بار حرارتی ریفورمر کاسته می‌شود. اگر انرژی ورودی به ریفورمر را ۱۰۰ واحد در نظر بگیریم، $EHRR \approx ۶-۸\%$ خواهد بود. این شاخص نشان می‌دهد که چقدر از انرژی تلف‌شده قابل بازیافت است. افزایش EHRR نه تنها مصرف سوخت را کاهش می‌دهد، بلکه از انتشار CO₂ اضافی جلوگیری می‌کند.

- شاخص کیفیت گاز برگشتی (Return Gas Quality Index – RGQI)

$$RGQI = \frac{[H_2] + [CO]}{[CO_2] + [H_2O]} \quad (8)$$

افزایش CO₂ و H₂O در گاز برگشتی باعث کاهش کیفیت می‌شود. پس از بهینه‌سازی، این نسبت بهبود می‌یابد. افزایش RGQI نشان‌دهنده بهبود کیفیت گاز برگشتی و کاهش بار روی ریفورمر است. این شاخص می‌تواند به عنوان معیاری برای پایش عملیاتی واحد استفاده شود.

ارزیابی اقتصادی

برای تکمیل تحلیل فنی و محیط‌زیستی، یک ارزیابی اقتصادی برای بررسی امکان‌پذیری مالی سناریوهای بهبود پیشنهادی انجام شد. تحلیل اقتصادی بر برآورد سرمایه‌گذاری اولیه موردنیاز، صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی و دوره بازگشت سرمایه مرتبط با اجرای اقدامات بهینه‌سازی شناسایی‌شده متمرکز بود. شاخص‌های کلیدی اقتصادی شامل کل سرمایه‌گذاری، صرفه‌جویی سالانه هزینه ناشی از کاهش مصرف گاز طبیعی و دوره بازگشت سرمایه ساده، بر اساس قیمت‌های فعلی بازار ایران برای گاز طبیعی و تجهیزات محاسبه شد. تحلیل سناریوهای بهبود زیر را در نظر گرفت: (۱) افزایش بازده ریفورمر، (۲) بهبود عملکرد ریکوپراتور، (۳) ارتقای سیستم Top Gas با حذف CO₂، و (۴) اجرای همزمان تمامی اقدامات. هزینه‌های تجهیزات بر اساس استعلام قیمت از تأمین‌کنندگان و روابط استاندارد هزینه‌یابی صنعتی برآورد شد، در حالی که صرفه‌جویی گاز طبیعی از نتایج شبیه‌سازی بخش قبل استخراج گردید. این ارزیابی اقتصادی چارچوب اولیه‌ای برای بررسی مقرون‌به‌صرفه بودن اصلاحات پیشنهادی فراهم کرده و از تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری برای بهره‌برداران واحد پشتیبانی می‌کند.

یافته‌ها و بحث

فرایند گاز در فرایند MIDREX

بررسی داده‌های عملیاتی واحد صنعتی نشان داد که سیستم فرایند گاز یکی از مؤثرترین بخش‌ها در تعیین بازده کلی فرایند احیای مستقیم به روش MIDREX است. گاز برگشتی خروجی از بالای کوره شفتی که شامل CO ، CO_2 ، H_2 ، بخار آب و مقادیر جزئی متان است، در صورت عدم تصفیه و آماده‌سازی مناسب، می‌تواند بار حرارتی و شیمیایی قابل توجهی به رفورمر تحمیل کند. نتایج نشان داد که افزایش CO_2 و H_2O در گاز برگشتی باعث تشدید واکنش‌های گرماگیر در رفورمر شده و کیفیت گاز احیاکننده تولیدی را کاهش می‌دهد. این موضوع به‌طور مستقیم موجب افزایش مصرف گاز طبیعی، کاهش نسبت H_2/CO و افت بازدهی واکنش‌های احیا در کوره شفتی می‌شود. همچنین عملکرد نامناسب واحدهای خنک‌سازی، اسکرابر و فشرده‌سازی گاز برگشتی، منجر به ورود ناخالصی‌ها و رطوبت به تجهیزات پایین‌دست شده و شرایط عملیاتی رفورمر و مبدل‌های حرارتی را از حالت بهینه خارج می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از انرژی مصرفی واحد صرف جبران افت کیفیت گاز برگشتی می‌شود و بهینه‌سازی این سیستم می‌تواند نقش کلیدی در کاهش شدت انرژی داشته باشد (Adewuyi & Fletcher, 2019).

شبیه‌سازی فرایند با Aspen HYSYS

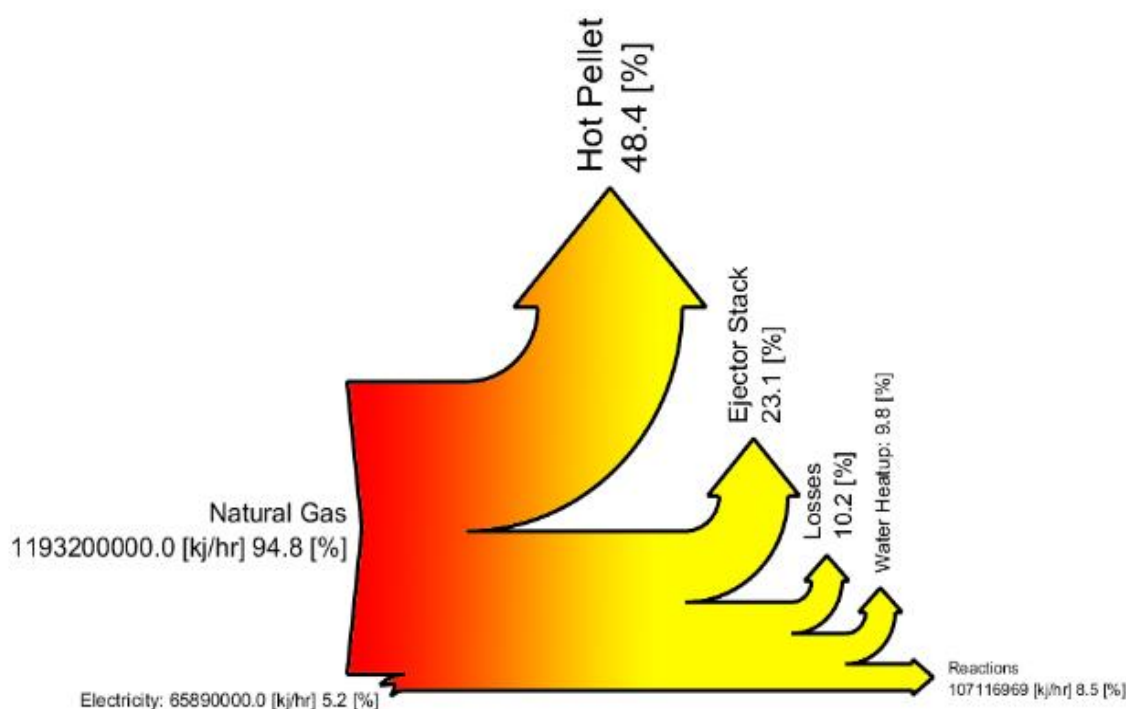
شبیه‌سازی فرایند با استفاده از داده‌های واقعی صنعتی در محیط Aspen HYSYS انجام شد تا تأثیر شرایط عملیاتی مختلف بر عملکرد سیستم فرایند گاز بررسی شود (Alvarez & Gómez-Barea, 2018). نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزایش دمای گاز برگشتی ورودی به رفورمر، که عمدتاً از طریق بهبود عملکرد ریکوپراتور حاصل می‌شود، تأثیر قابل توجهی در کاهش بار حرارتی رفورمر دارد. با افزایش دمای پیش‌گرمایش گاز ورودی، نیاز به احتراق سوخت در مشعل‌ها کاهش یافته و نسبت H_2 به CO در گاز احیاکننده بهبود پیدا می‌کند. همچنین کاهش میزان CO_2 در گاز برگشتی موجب کاهش شدت واکنش‌های گرماگیر ریفورمینگ و افزایش کیفیت گاز احیا شد. در سناریوی جایگزینی بخشی از گاز طبیعی با هیدروژن، نتایج نشان داد که بار رفورمر به‌طور محسوسی کاهش یافته و انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از احتراق سوخت افت قابل توجهی پیدا می‌کند. زمانی که تمامی اصلاحات به‌صورت هم‌زمان اعمال شدند، کاهش چشمگیر مصرف گاز طبیعی و بهبود معنی‌دار شاخص‌های محیط‌زیستی واحد مشاهده شد که تطابق مناسبی با داده‌های عملیاتی واقعی داشت و اعتبار مدل شبیه‌سازی را تأیید کرد.

موازنه جرم و انرژی

برای تحلیل نحوه توزیع انرژی در واحد احیای مستقیم، موازنه جرم و انرژی بر اساس داده‌های عملیاتی و نتایج شبیه‌سازی انجام شد و نتایج به‌صورت دیاگرام سنکی نمایش داده شد. این تحلیل نشان داد که رفورمر بیشترین سهم مصرف انرژی را در کل واحد به خود اختصاص می‌دهد و پس از آن، ریکوپراتور نقش مهمی در بازیافت بخشی از انرژی دودکش ایفا می‌کند. با وجود این، مقدار قابل توجهی از انرژی به‌صورت اتلاف حرارتی از بدنه رفورمر و دودکش از دست می‌رود که این موضوع یکی از عوامل اصلی افزایش مصرف سوخت و انتشار دی‌اکسیدکربن است. نتایج دیاگرام سنکی نشان داد که حتی بهبود محدود در بازده ریکوپراتور و کاهش اتلاف حرارتی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش شدت انرژی کل واحد داشته باشد. دیاگرام موازنه انرژی خط احیای شبیه‌سازی‌شده در شکل ۳ ارائه شده است. موازنه جرم مشخص کرد که سهم بازیافت گاز برگشتی نقش مهمی در کاهش مصرف گاز طبیعی دارد، اما در صورتی که کیفیت این گاز کنترل نشود، مزیت بازیافت به یک عامل تشدیدکننده مصرف انرژی تبدیل می‌شود. انرژی‌های ورودی شامل انرژی شیمیایی گاز طبیعی، انرژی همراه گاز برگشتی، انرژی تأمین‌شده توسط مشعل‌های رفورمر و سهم انرژی ناشی از پیش‌گرمایش جریان‌ها بود. در مقابل، انرژی خروجی به‌صورت انرژی موجود در گاز احیاکننده، انرژی انتقال‌یافته به کوره شفتی، انرژی بازیافتی در ریکوپراتور و اتلاف‌های حرارتی از بدنه رفورمر و

دودکش در نظر گرفته شد. نتایج این موازنه نشان داد که بخش قابل توجهی از انرژی ورودی به رفورمر صرف جبران افت دمای گاز ورودی و انجام واکنش‌های گرماگیر ناشی از حضور CO_2 و H_2O اضافی در گاز برگشتی می‌شود. به عبارت دیگر، کاهش کیفیت گاز برگشتی مستقیماً موجب افزایش بار حرارتی رفورمر و افزایش مصرف سوخت می‌گردد. تحلیل انرژی همچنین نشان داد که ریکوپراتور نقش کلیدی در بهبود کارایی انرژی واحد دارد، زیرا با بازیافت حرارت دودکش رفورمر، دمای گاز برگشتی را پیش از ورود به رفورمر افزایش می‌دهد. هرگونه افت بازده در این مبدل حرارتی باعث کاهش دمای پیش‌گرمایش، افزایش نیاز به احتراق سوخت در مشعل‌ها و در نتیجه افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود. نتایج موازنه انرژی نشان داد که اتلاف حرارت از بدنه رفورمر و دودکش سهم قابل توجهی از انرژی کل را به خود اختصاص می‌دهد و بهبود عایق‌بندی و ارتقای تجهیزات بازیافت حرارت می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش مصرف انرژی داشته باشد. در بخش محاسبه انتشار دی‌اکسیدکربن، نتایج موازنه جرم و انرژی به صورت هم‌زمان مورد استفاده قرار گرفت. دی‌اکسیدکربن تولیدی از احتراق سوخت رفورمر، CO_2 حاصل از واکنش‌های شیمیایی احیا و CO_2 موجود در گاز خروجی کوره شفتی به عنوان اجزای اصلی انتشار در نظر گرفته شدند. محاسبات نشان داد که افزایش مصرف سوخت در رفورمر، که عمدتاً ناشی از افت کارایی سیستم فرایند گاز است، بیشترین سهم را در افزایش انتشار CO_2 دارد. از سوی دیگر، بهبود شرایط عملیاتی و کاهش بار حرارتی رفورمر باعث کاهش هم‌زمان مصرف سوخت و انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود.

در مجموع، نتایج موازنه جرم و انرژی نشان داد که عملکرد سیستم فرایند گاز به طور مستقیم بر رفتار انرژی و محیط‌زیستی کل واحد MIDREX اثرگذار است (Ezzati & Carroll, 2018). هرگونه بهبود در کیفیت گاز برگشتی، افزایش بازده ریکوپراتور و کاهش اتلاف‌های حرارتی، نه تنها موجب کاهش مصرف گاز طبیعی می‌شود، بلکه اثر مستقیمی بر کاهش انتشار CO_2 به ازای هر تن آهن اسفنجی دارد. این تحلیل جامع تأیید می‌کند که موازنه جرم و انرژی ابزاری کلیدی برای شناسایی نقاط بحرانی مصرف انرژی و طراحی راهبردهای مؤثر برای حرکت به سوی تولید آهن و فولاد کم‌کربن و پایدار است.



شکل ۳. دیاگرام موازنه انرژی خط احیاء شبیه‌سازی شده

Figure 3. Energy balance diagram of the simulated reduction line

کارایی انرژی

تحلیل کارایی انرژی واحد نشان داد که بازدهی واقعی فرایند کمتر از مقدار طراحی استاندارد فناوری MIDREX است. این اختلاف عمدتاً ناشی از افت عملکرد تجهیزات کلیدی مانند ریکوپراتور و رفورمر، افزایش CO_2 و بخار آب در گاز برگشتی و اتلاف حرارتی از بدنه تجهیزات است. نتایج نشان داد که بهبود شرایط پیش‌گرمایش گاز برگشتی، تعویض یا احیای کاتالیست رفورمر و کاهش ناخالصی‌های گاز بازیافتی می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه کارایی انرژی شود. اجرای هم‌زمان این اصلاحات امکان افزایش بازده کلی واحد را فراهم می‌کند و می‌تواند فاصله موجود بین عملکرد واقعی و شرایط طراحی را به‌طور محسوسی کاهش دهد (International Energy Agency, 2020).

کاهش مصرف گاز طبیعی در رفورمر باعث کاهش بار حرارتی مورد نیاز واحد شده و در کنار افزایش بازیافت حرارت در ریکوپراتور، منجر به استفاده بهینه‌تر از انرژی ورودی گردیده است. این عوامل در مجموع سبب افزایش بازده انرژی واحد و کاهش مصرف ویژه انرژی به ازای هر تن آهن اسفنجی تولیدی شده‌اند.

انتشار دی‌اکسیدکربن و شاخص‌های محیط زیستی

نتایج تحلیل انتشار دی‌اکسیدکربن نشان داد که رفورمر اصلی‌ترین منبع تولید CO_2 در واحد MIDREX است و مصرف سوخت در این بخش بیشترین سهم را در آلاینده‌گی کل دارد. افزایش ناخالصی‌های گاز برگشتی، به‌ویژه CO_2 و بخار آب، موجب افزایش مصرف سوخت و در نتیجه افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بهبود بازده ریکوپراتور و کاهش بار حرارتی رفورمر می‌تواند انتشار CO_2 را به‌طور مستقیم کاهش دهد. همچنین جایگزینی تدریجی هیدروژن به جای گاز طبیعی یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن ارزیابی شد، به‌طوری‌که در سناریوی بهینه، کاهش قابل توجهی در میزان CO_2 تولیدی به‌ازای هر تن آهن اسفنجی حاصل گردید (Gielen & Yagi, 2021).

جدول ۱. اقدامات اصلاحی پتانسیل کاهش انتشار CO_2 Table 1. Corrective actions with potential for CO_2 emission reduction

اقدام	کاهش CO_2 (تن/تن DRI)
افزایش بازده رفورمر	۰/۱۲
افزایش بازده ریکوپراتور	۰/۰۵
HDRI	۰/۰۸
استفاده از هیدروژن تا ۳۰٪	۰/۲۵
حذف CO_2 محلول	۰/۰۲

نتایج ارائه‌شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که هر یک از اقدامات اصلاحی پیشنهادی، بسته به نوع و میزان تأثیرگذاری خود، می‌تواند در کاهش انتشار CO_2 و بهبود عملکرد محیط‌زیستی واحد احیای مستقیم نقش داشته باشد. با این حال، بررسی اثرات هر اقدام به‌صورت منفرد نمی‌تواند به‌تنهایی بیانگر عملکرد نهایی و میزان بهبود حاصل از اجرای مجموعه اقدامات بهینه‌سازی باشد؛ زیرا در شرایط عملیاتی، عوامل مختلف سیستم فرایند گاز، از جمله عملکرد رفورمر، بازده ریکوپراتور، کیفیت گاز برگشتی و میزان استفاده از هیدروژن، به‌صورت متقابل بر مصرف انرژی و انتشار CO_2 اثر می‌گذارند. بنابراین، پس از شناسایی پتانسیل هر یک از اقدامات اصلاحی، اثر تجمعی آن‌ها بر عملکرد کلی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا، شاخص‌های کمی انرژی و محیط‌زیستی شامل شدت کربن ویژه (Specific Carbon Intensity – SCI)، بازده انرژی ویژه (Specific Energy Consumption – SEC)،

نسبت کاهش انتشار ناشی از هیدروژن و بازیافت حرارتی مؤثر، به عنوان معیارهای اصلی ارزیابی عملکرد در نظر گرفته شدند. مقادیر پایه و مقادیر حاصل پس از اعمال سناریوهای بهینه سازی و همچنین میزان بهبود هر شاخص در جدول ۲ ارائه شده است. این مقایسه امکان ارزیابی دقیق تر میزان تأثیر اقدامات اصلاحی بر کاهش شدت کربن، کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری حرارتی سیستم را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که ترکیب اقدامات اصلاحی می‌تواند علاوه بر کاهش مستقیم انتشار CO_2 ، به بهبود هم‌زمان شاخص‌های عملکردی واحد نیز منجر شود.

جدول ۲. شاخص‌های کمی محیط‌زیستی و عملکردی

Table 2. Quantitative Environmental and Performance Indicators

شاخص	مقدار پایه	مقدار پس از بهینه‌سازی	بهبود (%)
شدت کربن ویژه (تن CO_2 /تن DRI)	۰/۵۵	۰/۴	۲۷٪
بازده انرژی ویژه (GJ/تن)	۱۰	۷/۶	۲۴٪
نسبت کاهش انتشار هیدروژن	–	۰/۵۰	–
بازیافت حرارتی مؤثر	۵٪	۷٪	۴۰٪

تحلیل اقتصادی

به منظور ارزیابی امکان‌پذیری مالی اقدامات بهینه‌سازی پیشنهادی، یک تحلیل اقتصادی بر اساس نتایج شبیه‌سازی و شرایط فعلی بازار ایران انجام شد. این تحلیل بر برآورد سرمایه‌گذاری اولیه، صرفه‌جویی سالانه هزینه‌های عملیاتی و دوره بازگشت سرمایه ساده برای سناریوهای اصلی بهبود متمرکز گردید.

سرمایه‌گذاری موردنیاز برای اجرای اصلاحات پیشنهادی بسته به دامنه و پیچیدگی هر اقدام متفاوت است. بر اساس داده‌های صنعتی، احداث یک واحد جدید MIDREX با ظرفیت ۱/۵ میلیون تن در سال معمولاً به سرمایه‌گذاری بیش از ۱ میلیارد دلار نیاز دارد (S&P Global, 2026). برای واحد مورد مطالعه با ظرفیت ۸۲۵,۰۰۰ تن در سال، هزینه‌های سرمایه‌ای برآوردی برای هر سناریوی بهبود در جدول ۳ خلاصه شده است. بهینه‌سازی ریفورمر شامل تعویض کاتالیست، تنظیم مشعل‌ها و ارتقای عایق‌بندی، به سرمایه‌گذاری حدود ۸ تا ۱۲ میلیون دلار نیاز دارد. ارتقای ریکوپراتور شامل تعویض لوله‌ها و اصلاح سطح انتقال حرارت، تقریباً ۳ تا ۵ میلیون دلار هزینه دربردارد. ارتقای سیستم Top Gas با نصب واحد حذف CO_2 ، بیشترین هزینه سرمایه‌ای را به خود اختصاص می‌دهد و بین ۱۵ تا ۲۰ میلیون دلار برآورد می‌شود. اجرای هم‌زمان تمامی اقدامات با بهره‌مندی از صرفه‌جویی مقیاس و زیرساخت‌های مشترک، بین ۲۵ تا ۳۵ میلیون دلار سرمایه‌گذاری نیاز دارد.

جدول ۳. سرمایه‌گذاری اولیه برآوردی و صرفه‌جویی سالانه برای سناریوهای بهبود

Table 3. Estimated Initial Investment and Annual Savings for Improvement Scenarios

سناریوی بهبود	سرمایه‌گذاری اولیه (برآوردی (میلیون دلار))	صرفه‌جویی سالانه گاز (طبیعی (میلیون دلار در سال))	دوره بازگشت (سرمایه ساده (سال))
بهینه‌سازی ریفورمر	۸–۱۲	۴/۸–۳/۲	۳–۲/۵
ارتقای ریکوپراتور	۳–۵	۲/۴–۱/۶	۲/۵–۱/۹
ارتقای (Top Gas حذف CO_2)	۱۵–۲۰	۳/۲–۲/۴	۳–۵/۶
اجرای هم‌زمان تمامی اقدامات	۲۵–۳۵	۲/۴–۷/۱۰	۲–۳/۵

توجه: محاسبات بر اساس قیمت گاز طبیعی به مبلغ ۰/۱ تا ۰/۱۵ دلار به ازای هر متر مکعب (نرخ صنعتی داخلی ایران، سال ۱۴۰۴) انجام شده است.

منبع اصلی صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی ناشی از کاهش مصرف گاز طبیعی است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده در بخش قبل، اجرای همزمان تمامی اقدامات بهینه‌سازی می‌تواند مصرف گاز طبیعی را ۲۲ تا ۲۵ درصد کاهش دهد که برای واحد ۸۲۵,۰۰۰ تنی معادل صرفه‌جویی سالانه حدود ۷۲ تا ۹۶ میلیون متر مکعب گاز طبیعی است. با نرخ فعلی گاز طبیعی صنعتی ایران (۰/۱ تا ۰/۱۵ دلار بر مترمکعب)، این مقدار به صرفه‌جویی سالانه ۷/۲ تا ۱۰/۴ میلیون دلار منجر می‌شود. صرفه‌جویی‌های اضافی ممکن است از طریق کاهش جرایم انتشار CO₂ حاصل شود، هرچند که مکانیسم‌های قیمت‌گذاری کربن هنوز در ایران به‌طور کامل پیاده‌سازی نشده و بنابراین در تحلیل پایه لحاظ نشده‌اند.

دوره بازگشت سرمایه ساده که به‌صورت نسبت سرمایه‌گذاری به صرفه‌جویی سالانه هزینه محاسبه می‌شود، برای اقدامات بهبود منفرد بین ۱/۹ تا ۶/۳ سال و برای سناریوی اجرای همزمان بین ۳ تا ۳/۵ سال متغیر است (جدول ۳). ارتقای ریکوپراتور به دلیل هزینه سرمایه‌ای نسبتاً پایین و صرفه‌جویی فوری انرژی، کوتاه‌ترین دوره بازگشت سرمایه (۱/۹ تا ۲/۵ سال) را ارائه می‌دهد. بهینه‌سازی ریفورمر نیز با دوره بازگشت سرمایه ۲/۵ تا ۳ سال از اقتصاد مطلوبی برخوردار است. ارتقای سیستم Top Gas با حذف CO₂ طولانی‌ترین دوره بازگشت سرمایه (۵ تا ۶/۳ سال) را دارد که عمدتاً به دلیل هزینه سرمایه‌ای بالای واحد جذب CO₂ مبتنی بر آمین است و با یافته‌های مطالعات قبلی همخوانی دارد (Vu et al., 2024). با این حال، وقتی تمامی اقدامات به‌صورت یکپارچه اجرا شوند، دوره بازگشت سرمایه به ۳ تا ۲/۵ سال بهبود می‌یابد که نشان‌دهنده مزایای هم‌افزایی بهینه‌سازی یکپارچه است.

برای مقایسه، سلیمی و همکاران (۲۰۲۲) دوره بازگشت سرمایه بیش از ۱۷ سال را برای سیستم‌های بازیابی حرارت هدررفته در واحدهای MIDREX ایران تحت ساختار تعرفه‌های فعلی خرید تضمینی برق گزارش کرده‌اند که نشان‌دهنده جذابیت نسبی اقتصادی بهبودهای مستقیم بازده پیشنهادی در این مطالعه است. علاوه‌براین، اگرچه ادغام هیدروژن در قیمت‌های فعلی از نظر اقتصادی با گاز طبیعی رقابت‌پذیر نیست، اما مسیر راهبردی برای کاهش انتشار در آینده ارائه می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد که آهن‌اسفنجی مبتنی بر هیدروژن بسته به منبع برق می‌تواند انتشار CO₂ را ۵۰ تا ۸۰ درصد کاهش دهد (Skaf et al., 2025). و با کاهش هزینه‌های تولید هیدروژن سبز به حدود ۲ تا ۳ دلار بر کیلوگرم، انتظار می‌رود viability اقتصادی ادغام هیدروژن به‌طور قابل‌توجهی بهبود یابد (Astoria et al., 2023).

تحلیل اقتصادی در معرض چندین عدم قطعیت است. قیمت گاز طبیعی در ایران در حال حاضر یارانه‌ای است و هرگونه تعدیل آتی به سمت نرخ‌های بازار بین‌المللی، اقتصاد اقدامات پیشنهادی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. در مقابل، نوسانات هزینه تجهیزات، هزینه‌های نصب و زمان توقف واحد در حین اجرا می‌تواند دوره بازگشت سرمایه را افزایش دهند. با این وجود، تحلیل نشان می‌دهد که اقدامات بهینه‌سازی پیشنهادی در شرایط فعلی از نظر مالی توجیه‌پذیر بوده و پتانسیل قابل‌توجهی برای صرفه‌جویی هزینه، به‌ویژه در صورت اجرای هماهنگ، ارائه می‌دهند.

نتیجه‌گیری

عملکرد سیستم فرایند گاز متان در فرایند احیای مستقیم آهن به روش MIDREX با تمرکز بر کارایی انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن به‌صورت جامع مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب داده‌های واقعی یک واحد صنعتی با شبیه‌سازی دقیق مهندسی در نرم‌افزار Aspen HYSYS امکان تحلیل هم‌زمان رفتار عملیاتی، موازنه جرم و انرژی و اثر سناریوهای اصلاحی را فراهم ساخت. نتایج نشان داد که کیفیت گاز برگشتی، بازده رفورمر و عملکرد ریکوپراتور سه عامل کلیدی در تعیین شدت مصرف انرژی و میزان انتشار CO₂ در واحدهای MIDREX هستند. تحلیل‌ها نشان داد که افزایش

CO₂ و بخار آب در گاز برگشتی موجب تشدید واکنش‌های گرماگیر در رفورمر، افزایش بار حرارتی و در نهایت افزایش مصرف گاز طبیعی می‌شود. در مقابل، بهبود عملکرد ریکوپراتور و افزایش دمای پیش‌گرمایش گاز برگشتی می‌تواند بار رفورمر را به‌طور محسوسی کاهش داده و کیفیت گاز احیاکننده را بهبود بخشد. نتایج موازنه جرم و انرژی و دیگرام سنکی نیز نشان داد که رفورمر بیشترین سهم مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن را در کل واحد به خود اختصاص می‌دهد و کاهش اتلاف حرارتی در این بخش نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد کلی دارد. سناریوهای اصلاحی نشان داد که اجرای هم‌زمان اقدامات بهینه‌سازی عملیاتی، شامل کاهش CO₂ گاز برگشتی، ارتقای بازده ریکوپراتور، بهبود شرایط رفورمر و جایگزینی تدریجی هیدروژن، می‌تواند منجر به کاهش ۲۲ تا ۲۵ درصدی مصرف گاز طبیعی و کاهش حدود ۰/۵ تا ۰/۶ تن دی‌اکسیدکربن به‌ازای هر تن آهن اسفنجی شود. این میزان کاهش در مقیاس صنعتی بسیار قابل‌توجه بوده و نشان‌دهنده ظرفیت بالای سیستم فرایند گاز برای کنترل شدت انرژی و آلاینده‌ها است. در مجموع، نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که بهینه‌سازی سیستم فرایند گاز متان نه تنها یک راهکار عملی برای افزایش بهره‌وری انرژی واحدهای MIDREX است، بلکه به‌عنوان یک پیش‌نیاز اساسی برای گذار تدریجی به سمت استفاده از هیدروژن و تولید فولاد کم‌کربن و پایدار مطرح می‌شود. رویکرد ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان چارچوبی مهندسی برای ارزیابی و بهبود عملکرد واحدهای احیای مستقیم در مسیر تحقق اهداف محیط-زیستی صنعت فولاد مورد استفاده قرار گیرد.

References

- Abadi, M. M., Ghasemi, M., Ghasmi, H. K., Zare, M., Thumu, U., Taghipour, A., & Mohammadi, M. S. H. (2026a). Multiphasic simulation and thermal stress evaluation of an industrial methane reformer in the DRI hydrogen production process. *Chemical Engineering Research and Design*, 226, 114–133. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.12.033>
- Abadi, M. M., Rashidi, M. M., & Thumu, U. (2026b). Modeling and optimization of methanol-fueled MIDREX reformers for energy-efficient hydrogen production. *Energy Conversion and Management*: X, 101521. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101521>
- Adewuyi, Y. G., & Fletcher, S. (2019). Top gas composition impacts on reformer efficiency in MIDREX DRI plants. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 67, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.04.015>
- Alvarez, D., & Gómez-Barea, A. (2018). Process simulation of natural gas-based DRI plants. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 43, pp. 1537–1542). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64235-6.50269-3>
- Ariyama, T. (2025). Perspectives on the promising pathways to zero carbon emissions in the steel industry toward 2050. *ISIJ International*, 65(2), 165–184. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-320>
- Association, W. S. (2024). Sustainability indicators 2023 report. World Steel Association.
- Astoria, T., Hughes, G., & Mizutani, N. (2023). Moving from natural gas to hydrogen. *Steel Times International*, 47(1), 40–45.
- Chevrier, V., Lauren, L., & Michishita, H. (2021). MIDREX® Process: Bridge to ultra-low CO₂ ironmaking. *Kobelco Technology Review*, 39, 33–40. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:264431946>
- Davis, C., Li, Z., Styring, P., Curry, R., & Holliman, P. J. (2025). Routes to reducing emissions from steel production. *Nature Reviews Clean Technology*, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s44359-025-00118-1>
- Draxler, M., Sormann, A., Kempken, T., Pierret, J.-C., De Santis, M., Ratto, V., & others. (2021). Funding opportunities to decarbonise the EU steel industry. *Green Steel for Europe*.
- Ezzati, A., & Carroll, J. (2018). Energy analysis and gas recycling in MIDREX DRI plants. *Journal of Cleaner Production*, 196, 645–657. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.038>
- Gielen, D., & Yagi, M. (2021). Iron and steel technology roadmap. International Energy Agency.

- Himmelblau, D. M., & Riggs, J. B. (2012). Basic principles and calculations in chemical engineering (8th ed.). Prentice Hall.
- Horne, S., & Miller, T. (2017). The MIDREX direct reduction process: Past, present, and future developments. *Iron & Steel Technology*, 14(7), 45–52.
- International Energy Agency. (2020). Energy efficiency and decarbonisation pathways for iron and steel (Tracking Report Series).
- International Energy Agency. (2021). Tracking Industry CO₂ Emissions. Paris: IEA.
- Kopfle, J., & Hunter, R. (2008). Direct reduction's role in the world steel industry. *Ironmaking & Steelmaking*, 35(4), 254–259. <https://doi.org/10.1179/174328108X301732>
- Kumar, V., & Singh, R. (2018). Thermal analysis of shell & tube recuperators. *Applied Thermal Engineering*, 130, 120–131.
- Midrex Technologies, Inc. (2021). Midrex process overview and innovations.
- Midrex Technologies, Inc. (2025). The green revolution in steelmaking: How Midrex is leading the way.
- Rechberger, K., Spanlang, A., Sasiain Conde, A., Wolfmeir, H., & Harris, C. (2020). Green hydrogen-based direct reduction for low-carbon steelmaking. *Steel Research International*, 91(11), 2000110. <https://doi.org/10.1002/srin.202000110>
- S&P Global. (2026). INTERVIEW: Midrex plans for 16 new plants on rising direct-reduction tech demand. S&P Global Commodity Insights.
- Schlacke, S., Wentzien, H., Thierjung, E.-M., & Köster, M. (2022). Implementing the EU Climate Law via the 'Fit for 55' package. *Oxford Open Energy*, 1, oiab002. <https://doi.org/10.1093/ooenergy/oiab002>
- Skaf, A., Tiruta-Barna, L., & Ahmadi, A. (2025). Technical and environmental assessment of new green iron production strategies using hydrogen. *Journal of Cleaner Production*, 532, 146970. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146970>
- Szekely, J., Evans, J. W., & Sohn, H. Y. (1976). Gas-solid reactions. Academic Press.
- Vu, T. T., Seo, J., Kim, E., Ryoo, S. G., Park, B. C., & Song, D. (2024). Techno-economic analysis of integrated MIDREX process with CO₂ capture and storage: Evaluating sustainability and viability for iron production. *Process Safety and Environmental Protection*, 189, 1314–1322. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.07.005>
- Wang, C., Mellin, P., Lövgren, J., Nilsson, L., Yang, W., Salman, H., Hultgren, A., & Larsson, M. (2020). CO₂ capture and utilization in direct reduction ironmaking. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123321. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123321>
- Zhao, Z., Tang, J., Chu, M., Wang, X., Zheng, A., Wang, X., & Li, Y. (2022). Direct reduction swelling behavior of pellets in hydrogen-based shaft furnaces under typical atmospheres. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29(10), 1891–1900. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2494-4>