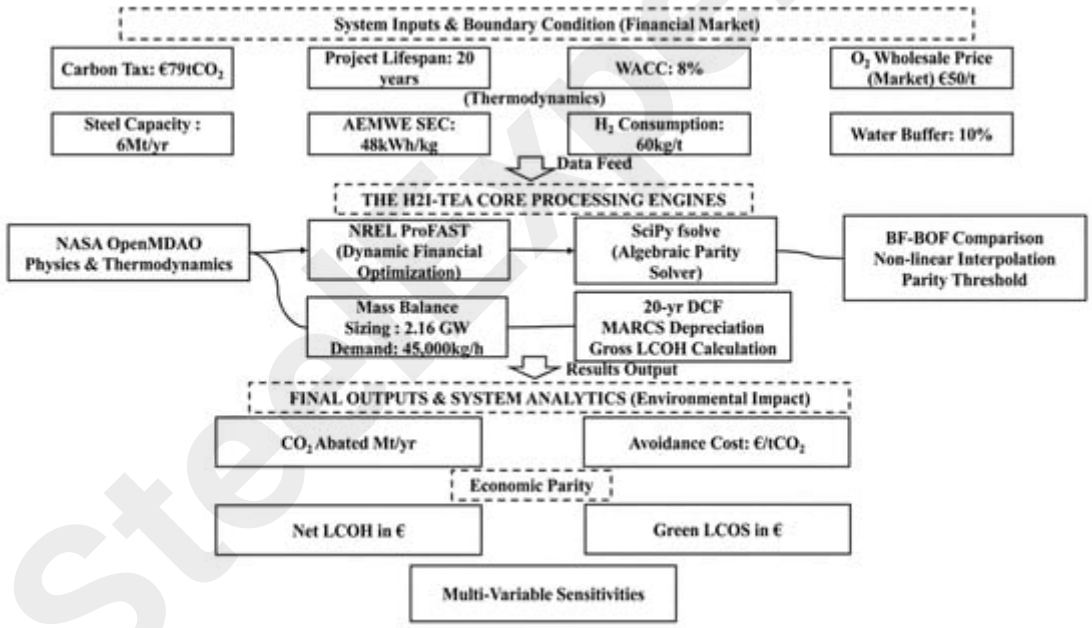
مرکز دانش شبکه خبرگان صنعت فولاد

کربن‌زدایی از صنعت فولاد با استفاده از هیدروژن: ارزیابی فنی و اقتصادی

مقالات تخصصی | علی ارجمندی اصل | ۱۴۰۵/۰۸/۰۴

بررسی فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی گذار مجتمع فولاد تارانتو ایتالیا از کوره‌بلند به احیای مستقیم با هیدروژن سبز و کوره قوس الکتریکی؛ شامل ارزیابی الکترولیز AEMWE، هزینه تمام‌شده، حساسیت قیمت برق، انتشار کربن و عدم‌قطعیت‌های مالی.



چکیده

صنعت آهن و فولاد از کربن‌برترین بخش‌های صنعتی است و به همین دلیل گذار آن به فناوری‌های کم‌کربن، از جمله متالورژی مبتنی بر هیدروژن، ضرورتی فوری دارد. در این پژوهش، تبدیل پیشنهادی مجتمع فولاد تارانتو در ایتالیا با ظرفیت سالانه ۶ میلیون تن از مسیر سنتی کوره‌بلند ـ کنورتور اکسیژنی (BF-BOF) به مسیر احیای مستقیم با هیدروژن سبز و کوره قوس الکتریکی (H -DRI-EAF)، از نظر فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی ارزیابی

می‌شود. پژوهشگران مدلی یکپارچه از تولید هیدروژن، شبیه‌سازی فرایند، تحلیل جریان نقدی تنزیل‌شده، بهینه‌سازی و تحلیل عدم‌قطعیت مونت‌کارلو توسعه داده‌اند. سامانه پیشنهادی از الکترولیز آب با غشای تبادل آنیونی (AEMWE) به ظرفیت ۲٫۱۶ گیگاوات بهره می‌برد. با فرض هزینه سرمایه‌ای ۷۵۰ یورو به ازای هر کیلووات الکترولایزر و قیمت برق ۵۰ یورو به ازای هر مگاوات‌ساعت، هزینه هم‌سطح ناخالص و خالص هیدروژن، به‌ترتیب ۲٫۹۲ و ۲٫۵۲ یورو به ازای هر کیلوگرم هیدروژن محاسبه شده است؛ تفاوت این دو از احتساب درآمد فروش اکسیژن جانبی ناشی می‌شود. در این شرایط، هزینه هم‌سطح فولاد سبز حدود ۶۰۳ یورو به ازای هر تن است. در سناریوی بهینه با سرمایه‌گذاری ۵۰۰ یورو بر کیلووات و برق ۳۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، هزینه خالص هیدروژن به ۱٫۳۹ یورو بر کیلوگرم و هزینه فولاد سبز به حدود ۵۳۶ یورو بر تن کاهش می‌یابد. شدت انتشار این مسیر از ۱٫۸۰ به ۰٫۲۰ تن CO به ازای هر تن فولاد می‌رسد؛ یعنی ۸۸٫۹ درصد کاهش و در ظرفیت کامل، جلوگیری از انتشار حدود ۹٫۶۰ میلیون تن CO در سال. قیمت سربه‌سر کربن در مقایسه با مسیر BF-BOF حدود ۶۸٫۵ یورو به ازای هر تن CO و احتمال رقابت‌پذیری بازاری طبق مفروضات شبیه‌سازی مونت‌کارلو ۶۱٫۹ درصد برآورد شده است.

کلیدواژه‌ها: فولاد سبز؛ احیای مستقیم؛ هیدروژن سبز؛ AEMWE؛ کوره قوس الکتریکی؛ کربن‌زدایی.

۱. مقدمه

۱.۱. پیشینه و چشم‌انداز جهانی کربن‌زدایی

صنعت آهن و فولاد حدود ۷ تا ۹ درصد انتشار مستقیم دی‌اکسیدکربن جهان، نزدیک به ۵ درصد مصرف انرژی و در حدود ۲٫۶ میلیارد تن انتشار سالانه CO را به خود اختصاص می‌دهد. این سهم، هم حاصل مقیاس بزرگ تولید فولاد است و هم ناشی از وابستگی فناوری‌های متداول به سوخت‌های فسیلی. فولاد، با وجود آنکه پرکاربردترین ماده سازه‌ای جهان است، از دشوارترین محصولات صنعتی برای کربن‌زدایی محسوب می‌شود؛ زیرا کربن در آهن‌سازی سنتی هم عامل احیاکننده شیمیایی است و هم حامل انرژی. میانگین جهانیِ موزون با تولید، نزدیک به ۱٫۸۵ تا ۱٫۹ تن CO به ازای هر تن فولاد خام است و مسیر غالب BF-BOF معمولاً ۱٫۸ تا ۲٫۲ تن CO در هر تن فولاد منتشر می‌کند. برای هم‌راستایی با توافق پاریس، سناریوی توسعه پایدار آژانس بین‌المللی انرژی، کاهش حدود ۵۸ درصدی شدت انتشار فولاد خام نسبت به سال ۲۰۱۹ را ضروری می‌داند. انتظار می‌رود هیدروژن در کنار جذب، استفاده و ذخیره کربن (CCUS) نزدیک به یک‌چهارم کاهش تجمعی انتشار موردنیاز را تأمین کند. هدف محدودکردن گرمایش جهانی به بسیار کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد، جایگزینی مسیرهای کربن‌بر کنونی با روش‌های کم‌کربن را به یکی از دشوارترین مأموریت‌های تحول صنعتی تبدیل کرده است. [1، 2، 3، 4،

5، 6، 7، 8، 9، 10، 11]

شکل 1. سهم صنایع سنگین منتخب در انتشار جهانی ۱۳، ۱۲] CO]. تصویر به‌دلیل نامشخص بودن مجوز بازنشر ماده اقتباس‌شده یا متعلق به شخص ثالث، درج نشده است؛ برای مشاهده به نسخه اصلی مقاله مراجعه کنید.

۱.۲. روش‌های متعارف فولادسازی و شدت انتشار

در تولید متعارف فولاد، مسیر کوره‌بلند و کنورتور اکسیژنی (BF-BOF) غالب است و حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد فولاد خام دنیا از این مسیر به دست می‌آید. این فرایند برای تأمین حرارت و احیای شیمیایی، به‌شدت به کک متالورژی و زغال تزریقی متکی است و نزدیک به ۹۰ درصد انتشار CO ناشی از فولادسازی را ایجاد می‌کند. جدول ۱ شدت کربن مسیرهای اصلی را مقایسه می‌کند. [14، 15، 16]

پیکربندی فنی	میانگین شدت کربن	عامل احیاکننده یا خوراک اصلی
کوره‌بلند ـ کنورتور اکسیژنی (BF-BOF)	2.33 [17] tCO /t]	کک متالورژی و زغال‌سنگ
احیای مستقیم با گاز طبیعی و EAF	1.37 [17] tCO /t]	گاز سنتز حاصل از اصلاح متان (CH)
کوره قوس الکتریکی با قراضه	0.68 [17] tCO /t]	قراضه آهنی و برق شبکه
احیای مستقیم با H تجدیدپذیر و EAF	0.46–0.20 [17] tCO /t]	هیدروژن سبز و برق پاک

این مسئله در چین برجسته‌تر است: کشوری که در سال ۲۰۲۳ حدود ۱۰۱۸ میلیون تن فولاد تولید کرد و سهم مسیر زغال‌سنگ‌محور BF-BOF در آن به ۸۹٫۶ درصد رسید. صنعت فولاد تقریباً ۱۵ تا ۲۲ درصد انتشار کربن چین را به خود اختصاص می‌دهد و در یک مجتمع یکپارچه، واحد آهن‌سازی به‌تنهایی مسئول ۷۰ تا ۸۰ درصد انتشار است. برآوردهای کلان برای گذار فولاد چین به بی‌طرفی اقلیمی، سرمایه اولیه‌ای بین ۶۸۶ تا ۱۰۳۰ میلیارد یوان برای ایجاد کارخانه‌های مجازی توزیع‌شده برآورد کرده‌اند که می‌تواند تا سال ۲۰۶۰ از انتشار ۸٫۱۳ میلیارد تن معادل CO جلوگیری کند. شدت کربن به مسیر تولید وابسته است: حدود ۲٫۳۳ تن CO بر تن فولاد برای BF-BOF، حدود ۱٫۳۷ تن برای احیای مستقیم گازطبیعی و کوره قوس، و فقط ۰٫۶۸ تن برای کوره قوس مبتنی بر قراضه. روش قوس الکتریکی، بسته به شارژ فلزی، نسبت به BF-BOF کاهش انتشار حدود ۳۹٫۱ تا ۷۳٫۹ درصدی دارد. بهبودهایی مانند کک زیست‌توده، CCUS درون‌فرایندی و ارتقای بازده انرژی اگرچه مفید بوده‌اند، به‌تنهایی برای رسیدن به خالص صفر کفایت نمی‌کنند. فناوری‌های احیای ذوبی COREX و FINEX نیز با وجود کاهش بعضی پیامدهای کوره‌بلند، همچنان به خوراک کربنی نیاز دارند. جدول ۲ مسیرها، مصرف سوخت و ظرفیت کاهش CO را نشان می‌دهد. [18، 19، 20، 21، 22، 23، 24، 25، 26، 27، 28، 11، 29، 30، 31،

[32، 33، 34، 35، 36، 37، 38، 39]

مسیر تولید	سوخت و عامل احیای اصلی	شدت مصرف سوخت	کاهش CO در برابر کوره‌بلند مدرن	طبقه‌بندی بلندمدت از نظر خالص صفر
BF-BOF متداول [9,40]	کک متالورژی و زغال تزریقی	600–500 kg/t-HM	مبنای مقایسه (0%)	مردود؛ نیازمند بازسازی یا کنارگذاری دارایی‌ها
COREX [32]	زغال حرارتی غیرکک‌شو و سنگ‌آهن درشت یا گندله	940–770 kg/t-HM	20%	ناکافی؛ فناوری گذار
FINEX [37]	زغال حرارتی غیرکک‌شو و نرمه سنگ‌آهن	<700 kg/t-HM	4%	ناکافی؛ فناوری گذار
DRI-EAF با H سبز [21]	هیدروژن سبز تجدیدپذیر	60–50 kg H /t-DRI	85–95%	سازگار با کربن‌زدایی عمیق

۱.۳. متالورژی هیدروژنی؛ تغییر بنیادین در روش تولید

هیدروژن سبز به یکی از جدی‌ترین گزینه‌ها برای حذف اساسی انتشار کربن در آهن‌سازی تبدیل شده است. ابتدا برق بادی و خورشیدی برای تجزیه آب و تولید هیدروژن به کار می‌رود. هیدروژن وارد کوره شفت می‌شود، اکسیژن گندله سنگ‌آهن را می‌گیرد و آهن اسفنجی تولید می‌کند؛ محصول گازی واکنش بخار آب است، نه CO. گاز خروجی کوره در یک کندانسور بازیافت می‌شود تا هیدروژن واکنش‌نداده دوباره به مدار احیا و آب بازیافتی به الکترولایزر بازگردد. آهن اسفنجی در مرحله بعد همراه قراضه، با برق کم‌کربن در کوره قوس الکتریکی ذوب و به فولاد مذاب تبدیل می‌شود. همه بخش‌های صنعت فولاد را نمی‌توان تنها با برق‌رسانی مستقیم کربن‌زدایی کرد؛ محدودیت دسترسی به قراضه و ویژگی‌های خاص فرایندها، هیدروژن را به جانشینی ضروری برای برخی خوراک‌های فسیلی بدل می‌کند. واکنش بنیادی احیای سنگ‌آهن با هیدروژن چنین است: Fe O + 3H 2Fe + 3H O. [41، 11، 42، 6، 43] F e 2 O 3 + 3 H 2 2 F e + 3 H 2 O $Fe_{2}O_{3}+3H_{2}\rightarrow 2Fe+3H_{2}O$

شکل 2. نمای شماتیک تولید فولاد با احیای مستقیم هیدروژنی و کوره قوس الکتریکی [۴۳]. تصویر به‌دلیل نامشخص بودن مجوز بازنشر ماده اقتباس‌شده یا متعلق به شخص ثالث، درج نشده است؛ برای مشاهده به نسخه اصلی مقاله مراجعه کنید.

جایگزینی احیاکننده‌های فسیلی با هیدروژن حاصل از الکترولیز آب و برق تجدیدپذیر، مسیر آهن‌سازی را از نظر تئوری تا آستانه تولید بدون کربن پیش می‌برد. این تحول، مصرف منابع را از زغال و کک به هیدروژن منتقل می‌کند و به‌جای کوره‌بلند پرمصرف، از احیای مستقیم کم‌کربن بهره می‌گیرد. مسیرهای DRI-EAF بسته به منبع گاز احیاکننده شامل گازسازی زغال‌سنگ، گاز ککسازی (COG)، ریفرمینگ گاز طبیعی و الکترولیز آب هستند. در

میان آن‌ها، احیای مستقیم با هیدروژن حاصل از برق سبز بیشترین ظرفیت کربن‌زدایی را دارد و شدت انتشار آن می‌تواند به حدود ۰٫۲ تا ۰٫۴۶ تن CO بر تن محصول فولادی برسد. [42، 44، 45، 41، 46]

ارزیابی‌های فنی‌ـاقتصادی پیشین، امکان‌پذیری احیای مستقیم هیدروژنی را بررسی کرده‌اند. ووگل و همکاران نشان دادند تولید فولاد بدون سوخت فسیلی با هیدروژن سبز به حدود ۳٫۴۸ مگاوات‌ساعت برق برای هر تن فولاد نیاز دارد و قیمت هیدروژن، گلوگاه اصلی اقتصادی است. فن و فریدمن نیز نتیجه گرفتند برای برابری هزینه هیدروژن سبز با دارایی‌های زغال‌سنگ‌محور، معمولاً قیمت کربن بیش از ۶۰ تا ۸۰ یورو بر تن CO لازم است. پژوهش‌های بهاسکار، روزنر و هایکاراینن بر کاهش هزینه سرمایه‌ای الکترولایزر و افزایش بازده آن به‌عنوان دو عامل تعیین‌کننده در پایین‌آوردن هزینه هم‌سطح فولاد (LCOS) تأکید می‌کنند. [43، 6، 44، 42، 47]

۱.۴. گذار به الکترولیز آب با غشای تبادل آنیونی (AEMWE)

انتخاب فناوری اصلی تولید هیدروژن، تصمیمی کلیدی است. الکترولیز با غشای تبادل پروتون (PEMWE) به‌دلیل بلوغ بیشتر، گزینه رایجی بوده است؛ اما استفاده از فلزات گران‌بهای گروه پلاتین، مانند اکسید ایریدیوم در آند و پلاتین در کاتد، هزینه سرمایه‌ای آن را بالا می‌برد. افزون بر آن، ترکیبات پرفلورینه به‌کاررفته در برخی اجزا دغدغه زیست‌محیطی ایجاد می‌کنند. مقاله حاضر الکترولیز آب با غشای تبادل آنیونی (AEMWE) را به‌عنوان جایگزینی تحول‌آفرین بررسی می‌کند. این فناوری در محیط قلیایی کار می‌کند و امکان جایگزینی فلزات نجیب کمیاب با فلزات واسطه فراوان و ارزان‌تر، از جمله نیکل، آهن، کبالت و منگنز، را در الکتروکاتالیست‌ها، لایه‌های انتقال متخلخل و صفحات دوقطبی فراهم می‌سازد. شرکت ENAPTER واحدهای تجاری AEMWE عرضه می‌کند و همکاری‌های پژوهشی و صنعتی می‌تواند سطح آمادگی فناوری را افزایش دهد. [48، 49، 50، 51، 52، 53، 54، 55، 56]

برای تأمین جریان پیوسته ۴۵ هزار کیلوگرم هیدروژن در ساعت، متناسب با ظرفیت پیشنهادی سالانه ۶ میلیون تن فولاد، مجموعه AEMWE با توان ۲٫۱۶ گیگاوات به‌صورت ماژولار طراحی شده است: ۱۰۸ اسکید عملیاتی ۲۰ مگاواتی که هرکدام چهار ماژول استک ۵ مگاواتی دارند. این معماری، محدودیت ساخت واحدهای بزرگ را از ظرفیت نهایی مجتمع جدا می‌کند؛ تولید انبوه استاندارد، پیش‌راه‌اندازی بیرون از سایت و افزونگی عملیاتی N+1 را ممکن می‌سازد. ازاین‌رو می‌توان بدون قطع گازرسانی به کوره شفت احیا، ماژول‌ها را به‌نوبت سرویس کرد. [57، 58]

از منظر زنجیره تأمین و توسعه مقیاس، الکترولیز PEM با کمبود جهانی ایریدیوم روبه‌روست: نیاز کاتالیستی اکسید ایریدیوم در آند ۰٫۷۵ تا ۱٫۵ کیلوگرم بر گیگاوات گزارش شده، درحالی‌که عرضه سالانه جهانی ایریدیوم

فقط حدود ۷ تا ۹ تن است. بنا بر برآوردهای مورد استناد، این محدودیت ظرفیت ساخت سالانه سامانه‌های PEMWE را به حدود ۲ تا ۳ گیگاوات مقید می‌کند. در مقابل، AEMWE به فلزات گروه پلاتین وابسته نیست و از فلزات واسطه فراوان مانند Ni، Fe، Co و Mn بهره می‌برد؛ بنابراین ریسک گلوگاه مواد اولیه کاهش می‌یابد و توسعه تولید آسان‌تر می‌شود. [59، 60، 55، 61، 62]

از نظر دسترس‌پذیری، آرایش ماژولار برای حدود ۸۰۰۰ ساعت کار سالانه طراحی شده است. هر استک ۵ مگاواتی می‌تواند برای تعمیرات دوره‌ای یا تعویض مجموعه غشاـالکترود (MEA) از مدار خارج شود، بی‌آنکه کل کارخانه متوقف یا خوراک هیدروژن کوره احیا قطع شود. [57]

در بخش تجهیزات جانبی و فشار نیز AEMWE مزیت دارد: برخلاف الکترولیز قلیایی رایجِ کم‌فشار یا بی‌فشار که تراکم چندمرحله‌ای پرمصرف نیاز دارد، هیدروژن را با اختلاف فشار ۳۰ تا ۳۵ بار تولید می‌کند و درنتیجه اندازه تجهیزات تراکم پایین‌دستی و مصرف برق کمکی کاهش می‌یابد. [55، 61]

فاصله‌گرفتن از فناوری PEM وابسته به ایریدیوم و از مدارهای قلیایی با محلول بسیار خورنده، امکان ترکیب مواد ارزان‌تر با سلول‌های بدون فاصله الکترودی و عملکرد فشاربالا را فراهم می‌کند. جدول ۳، فناوری AEMWE را با الکترولیز قلیایی متعارف (AWE) و PEMWE از جنبه‌های فناوری، سامانه و چرخه عمر مقایسه کرده است.

شاخص فنی / چرخه‌عمر	الکترولیز قلیایی (AWE)	غشای تبادل پروتون (PEMWE)	غشای تبادل آنیون (AEMWE)	ارجاع
سطح آمادگی فناوری (TRL)	9؛ کاملاً تجاری	8؛ استقرار صنعتی	6–7؛ پایلوت و افزایش مقیاس	[55–57,59,61,63,67]
کاتالیزور آند و کاتد	نیکل، کبالت، آهن؛ فاقد PGM	آند IrO و کاتد Pt/C؛ وابسته به PGM	نیکل، آهن، کبالت، منگنز؛ فاقد PGM	[68,69]
محیط الکترولیت / غشا	دیافراگم متخلخل؛ KOH با غلظت وزنی 20–30%	غشای پرفلوروسولفونیک اسیدی (PFAS)	غشای هیدروکربنی جامد و KOH رقیق 1%	[70]
جنس صفحات دوقطبی و لایه انتقال متخلخل	فولاد زنگ‌نزن با پوشش نیکل	تیتانیوم با پوشش محافظ Pt/Au	فولاد زنگ‌نزن یا فولاد با پوشش نیکل	[71,72]
فشار عملیاتی تفاضلی	1–30 bar؛ کم	30–80 bar؛ زیاد	30–35 bar؛ خروجی مستقیم	[68,72]
مصرف ویژه انرژی (SEC)	50–55 kWh/kg H	50–58 kWh/kg H	48 kWh/kg H؛ بازده 82.1% برابر HHV	[73]
واکنش دینامیکی و افزایش بار	کند؛ 2–20%/min؛ دامنه بار محدود	بسیار سریع؛ 100%/s؛ دامنه بار وسیع	سریع؛ 10–50%/s؛ دامنه بار وسیع	[74]
خورندگی و پیچیدگی تجهیزات جانبی	زیاد؛ پمپ محلول قلیایی خورنده و لوله نیکلی	متوسط؛ تیتانیوم و رزین مقاوم اسید	کم؛ فولاد زنگ‌نزن و قلیای رقیق	[69,75]

شاخص فنی / چرخه‌عمر	الکترولیز قلیایی (AWE)	غشای تبادل پروتون (PEMWE)	غشای تبادل آنیون (AEMWE)	ارجاع
ریسک مواد خام بحرانی	کم؛ فلزات واسطه فراوان	بسیار زیاد؛ محدودیت عرضه جهانی ایریدیوم	فاقد وابستگی به مواد بحرانی؛ فلزات واسطه فراوان	[76]
مخاطرات محیط‌زیستی و PFAS	پسماند زیاد محلول قلیایی خطرناک	خطر غشاهای فلوئوروپلیمری PFAS	امکان استفاده از مواد فاقد PFAS و پسماند کم‌خطر	[70,71,73,77,78]
مشخصات ساختاری	دیافراگم متخلخل ضخیم	محیط اسیدی خورنده	KOH با غلظت کم	[68,72]
سرمایه‌گذاری هدف سامانه	EUR/kW 700–500	EUR/kW 1400–1100	EUR/kW 750–500	[71]

بر مبنای جدول ۳، فناوری AEMWE میان هزینه سرمایه‌ای نسبتاً پایین، در بازه ۵۰۰ تا ۷۵۰ یورو بر کیلووات، نداشتن وابستگی به مواد اولیه بحرانی و خورندگی کمتر سیال تجهیزات جانبی با محلول KOH یک‌درصد وزنی، تعادل برقرار می‌کند. همین ویژگی‌ها در فصل دوم به‌عنوان مفروضات اولیه مدل مالی به کار گرفته می‌شوند.

AEMWE در مقایسه با PEMWE سرمایه‌گذاری کمتری می‌طلبد و با طراحی فشرده سلول بدون فاصله و تولید پویای هیدروژن در فشار بالا، از برخی جهات بر الکترولیز قلیایی متعارف برتری دارد. بااین‌حال چهار مانع فنی اصلی، توسعه صنعتی فراگیر آن را محدود می‌کنند: [47، 65، 66، 79، 80، 81]

- رسانایی یونی پایین‌تر غشا: جابه‌جایی ذاتی یون هیدروکسید (OH^-) در غشاهای تبادل آنیونی هیدروکربنی از رسانش پروتون (H^+) در محیط اسیدی PEM کمتر است؛ بنابراین برای کاهش افت اهمی ولتاژ سلول به غشاهای تقویت‌شده بسیار نازک، در حدود ۲۰ تا ۵۰ میکرومتر، نیاز است.

- تجمع حباب و اضافه‌ولتاژ انتقال جرم: در چگالی جریان صنعتی بالاتر از ۱٫۵ آمپر بر سانتی‌متر مربع، لایه‌های متراکمی از حباب‌های اکسیژن و هیدروژن در الکترودهای متخلخل تشکیل می‌شود. این وضعیت قطبش انتقال جرم را افزایش می‌دهد و کنترل بهینه جریان الکترولیت مایع با KOH یک‌درصد وزنی را ضروری می‌کند.

- تخریب الکتروکاتالیست در چرخه‌های متغیر توان: کاتالیست‌های فلزات واسطه سه‌بعدی و فاقد فلزات گروه پلاتین، مانند Ni-Fe-Co-Mn، هنگام تغییر سریع توان تجدیدپذیر و روشن‌خاموش‌شدن مکرر در حالت سرد، دچار انحلال، اکسایش فازی و غیرفعال‌شدن جایگاه‌های فعال می‌شوند.

- خزش مکانیکی غشا زیر اختلاف فشار: تولید هیدروژن در اختلاف فشار ۳۰ تا ۳۵ بار، غشاهای نازک

هیدروکربنی را پیوسته در معرض تنش تراکمی قرار می‌دهد؛ فرسایش تدریجی سلول در عمر بهره‌برداری را تشدید می‌کند و تعمیرات زمان‌بندی‌شده استک را ضروری می‌سازد.

۱.۵. طرح‌های تجاری، پایلوت‌ها و سطح آمادگی فناوری

طرح‌های پایلوت و نمایشی در نقاط مختلف جهان پیش رفته‌اند. از نمونه‌های شاخص، پروژه سوئدی HYBRIT است که از سال ۲۰۲۰ تولید بدون سوخت فسیلی با هیدروژن سبز را به نمایش گذاشت و در سال ۲۰۲۱ نخستین محموله فولاد بدون سوخت فسیلی را به ولوو تحویل داد. در چین نیز پروژه نمایشی کوره شفت مبتنی بر گاز ککسازی گروه HBIS در سال ۲۰۲۲ راه‌اندازی شد و تا پایان ۲۰۲۳ کوره شفت هیدروژنی Baosteel ساخته و عملیاتی شده بود. [82، 83، 84، 85، 86، 87]

احیای مستقیم با هیدروژن کاملاً الکترولیتی اکنون در سطح آمادگی فناوری حدود TRL 6 قرار دارد. پیش‌بینی می‌شود نیاز جهانی به آهن احیای مستقیم تا ۲۰۵۰ به ۶۶۰ میلیون تن، معادل تقریباً ۳۵ درصد تولید کنونی فولاد، برسد؛ درحالی‌که تقاضای DRI سبز تا ۲۰۳۰ حدود ۳۵ میلیون تن پیش‌بینی شده است. این اعداد فاصله قابل‌توجه میان ظرفیت موجود و تقاضای آینده را نشان می‌دهند. [88، 89، 90، 91، 92، 93]

۱.۶. قیمت‌گذاری کربن و حمایت‌های مقرراتی

اقتصاد فولادسازی هیدروژنی به هزینه تولید هیدروژن، قیمت برق و نظام قیمت‌گذاری کربن بسیار حساس است. در سناریوهای پایه کارخانه‌های یکپارچه بزرگ، هزینه هم‌سطح فولاد هیدروژنی سبز حدود ۶۵۰ تا ۶۷۰ یورو بر تن و هزینه فولاد متعارف BF-BOF، بدون احتساب هزینه کربن، حدود ۵۵۰ تا ۵۸۰ یورو بر تن برآورد شده است. [6، 94]

افزایش بهای مجوزهای انتشار در سامانه تجارت انتشار اتحادیه اروپا (EU ETS) مزیت اقتصادی روش‌های کم‌کربن را بیشتر می‌کند. با فرض قیمت کربن حدود ۷۹ تا ۱۰۰ یورو بر تن CO_2، جایگزینی یک مجتمع بزرگ با مسیر H -DRI-EAF می‌تواند نزدیک به ۱٫۰۶ میلیارد یورو در سال از هزینه انطباق کربنی بکاهد و بخشی از هزینه عملیاتی بیشتر هیدروژن سبز را جبران کند. سازوکار تعدیل کربن در مرز اتحادیه اروپا (CBAM) نیز از ۲۰۲۶ فشار هزینه‌ای بر فولاد کربن‌بر در بازار جهانی، به‌ویژه اروپا، وارد می‌کند. [95، 96]

۱.۷. تجربه ایتالیا؛ پیچیدگی ساختاری، اقتصاد چرخشی و آسیب‌پذیری‌های گذار

آهن و فولاد برای اقتصاد کلان ایتالیا یک صنعت بالادستی بنیادی است و زنجیره‌هایی مانند خودروسازی،

زیرساخت عمرانی و ساخت ماشین‌آلات پیشرفته به آن وابسته‌اند. ایتالیا پس از آلمان دومین تولیدکننده بزرگ فولاد خام اتحادیه اروپا و در سطح جهان در رتبه یازدهم قرار دارد. این صنعت، پس از نوسان‌های اقتصاد کلان و بازتنظیم زنجیره‌های تأمین در دوره پس از همه‌گیری، تاب‌آوری ساختاری نشان داده و تولید سالانه آن در حدود ۲۰٫۷ میلیون تن تثبیت شده است. بااین‌حال ترکیب محصولات متوازن نیست: محصولات طویل در دوره‌های گذشته محرک رشد بوده‌اند، درحالی‌که محصولات تخت زیر تأثیر تغییرات تقاضای صنایع اروپایی قرار گرفته‌اند. [97]

ویژگی ممتاز فولاد ایتالیا نسبت به بیشتر کشورهای اروپایی، ناهمگنی ساختاری و اتکای بسیار زیاد به متالورژی ثانویه است. حدود ۸۰ تا ۸۵ درصد فولاد خام این کشور با کوره قوس الکتریکی و شارژ قراضه تولید می‌شود؛ بنابراین بخش زیادی از صنعت از چرخه زغال‌سنگ‌بر کوره‌بلند ـ کنورتور عبور کرده است. چنین ساختاری ایتالیا را از پیشگامان اقتصاد چرخشی فولاد اروپا کرده و شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای تولیدکنندگان آن را نسبت به مجتمع‌های سنتی یکپارچه پایین‌تر آورده است. [98، 99]

با وجود این، غالب‌بودن کوره قوس آسیب‌پذیری‌هایی نیز ایجاد می‌کند: وابستگی زیاد به نوسان قیمت جهانی قراضه، نبود تولید تجاری DRI در داخل کشور و هزینه بالای برق صنعتی. مجموعه این موانع، قدرت رقابت مینی‌میل‌ها و برنامه‌ریزی برای کربن‌زدایی عمیق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. [98]

برای اجرای تعهدات زمانی «توافق سبز اروپا» بدون ازدست‌دادن توان رقابت، فولادسازان بزرگ ایتالیا از مطالعات مقدماتی به آزمایش‌های صنعتی در مقیاس کارخانه حرکت کرده‌اند. هدف این آزمایش‌ها حذف انتشار مستقیم باقیمانده در حلقه‌های پایین‌دستی و جایگزینی مواد کربنی فسیلی در کوره است. در کارخانه Tenaris Dalmine در برگامو، همکاری Snam و Tenova به آزمون عملیاتی مشعل کاملاً آماده کار با هیدروژن در کوره بازگرمایش صنعتی انجامید. برق و خوراک لازم از الکترولیز قلیایی مستقر در سایت تأمین شد تا داده‌های واقعی برای نورد گرم هیدروژنی به دست آید. هم‌زمان، تولیدکنندگانی چون Duferco Travi e Profilati و گروه AFV Beltrame، با خودکارسازی کوره قوس، تزریق زغال زیستی به‌جای آنتراسیت برای سربارهٔ پفکی و توسعه قراردادهای خرید برق شرکتی، گواهی‌های مستقل اقلیمی شورای جهانی فولاد (GSCC) و اهداف انتشار مبتنی بر علم (SBT) را دنبال کرده‌اند. این قراردادهای برق، وابستگی مصرف صنعتی به برق پایه شبکه با منشأ فسیلی را کاهش می‌دهد.
ازآنجاکه نوسازی صنعت سخت‌کربن‌زدا به سرمایه‌گذاری بزرگی نیاز دارد، دولت ایتالیا و اتحادیه اروپا طرح‌های تأمین مالی هدفمند فراهم کرده‌اند. یکی از نمونه‌ها پروژه HYDRA، سکوی باز نوآوری صنعتی با راهبری RINA Consulting، در چارچوب طرح اروپایی «IPCEI High-2 Use» و با پشتیبانی NextGenerationEU و وزارت بنگاه‌ها و ساخت ایتالیا (MIMIT) است. این پروژه در Castel Romano یک کارخانه پایلوت با دسترسی باز، مجهز به برج احیای مستقیم آماده هیدروژن و بخش متصل کوره قوس الکتریکی، ایجاد می‌کند تا متالورژی کم‌کربن با هدف کاهش ۹۵ درصدی ردپای کربن آزمایش شود. پژوهش مشترک دانشگاه تریسته و WWF ایتالیا

نیز مسیرهای گذار را مدل‌سازی کرده و نشان داده است سناریوی مطلوب به جایگزینی کامل چرخه زغال‌سنگ‌محور با احیای مستقیم هیدروژنی نیاز دارد. مدل‌های دانشگاهی دیگر کاهش تا ۷۱ درصدی انتشار پایه را تا سال ۲۰۳۰ در صورت جایگزینی چرخه یکپارچه سنتی با احیای مستقیم و فولادسازی الکتریکی برآورد کرده‌اند. بااین‌حال Federacciai به هزینه بسیار بالای برق صنعتی ایتالیا اشاره می‌کند و از اقداماتی مانند سازوکار Energy Release و حمایت بی‌طرفانه نسبت به فناوری، شامل سوخت زیستی، جذب کربن، انرژی هسته‌ای و هیدروژن، دفاع می‌کند.

استثنای اصلی الگوی فولادسازی ثانویه در ایتالیا، مجتمع یکپارچه تارانتو است؛ مجموعه‌ای که پیش‌تر ILVA نام داشت و بعدها تحت عنوان Acciaierie d’Italia فعالیت کرد. این واحد از بزرگ‌ترین فولادسازی‌های یکپارچه تک‌سایت در اتحادیه اروپاست و سهم غالب ظرفیت باقی‌مانده محصولات تخت اولیه ایتالیا را با BF-BOF تأمین می‌کرد. بیش از یک دهه چالش حقوقی، زیست‌محیطی و مالی، تولید آن را به حدود ۲ میلیون تن کاهش داد؛ درحالی‌که ظرفیت نصب‌شده آن نزدیک به ۷٫۸ میلیون تن بود. ازاین‌رو حل بحران تارانتو و بازسازی دولتی زیر نظر مدیریت فوق‌العاده، برای استقلال صنعتی ایتالیا اهمیت یافته است.

برای حفظ جریان نقد و فراهم‌کردن امکان ادامه فعالیت و واگذاری در آینده، مدیران فوق‌العاده راهکاری موقت شامل تعمیرات سازه‌ای و راه‌اندازی راهبردی کوره‌بلندهای شماره ۲ و ۴ را در پیش گرفتند تا ظرفیت میانی به حدود ۴ تا ۵ میلیون تن در سال تثبیت شود؛ درعین‌حال کوره شماره ۱ پس از یک آتش‌سوزی محلی همچنان با توقیف قضایی روبه‌رو بود. پس از مداخله دولت در ۲۰۲۴، مجموع حدود ۹۹۷ میلیون یورو برای نگهداری صنعتی و نوسازی ایمنی برنامه‌ریزی شد و کمیسیون اروپا نیز وام نجات ۳۹۰ میلیون یورویی برای تداوم نقدینگی اختصاص داد. اما این پل عملیاتی تنها مرحله‌ای گذراست: شرکت دولتی DRI d’Italia S.p.A. تحت مدیریت Invitalia برنامه الزام‌آور احداث واحد DRI با ظرفیت ۲٫۵ میلیون تن را دنبال می‌کند تا در نهایت چرخه کوره‌بلند پرانتشار با برج‌های احیای مستقیم مبتنی بر گاز طبیعی و شبکه کوره‌های قوس جایگزین شود.

یک چالش مهندسی مهم در دوره گذار، تأمین متان تا زمان دسترسی گسترده به هیدروژن است. بهره‌برداری از این مجموعه DRI همراه با واحدهای جذب کربن، سالانه حدود ۴٫۷ تا ۵٫۱ میلیارد مترمکعب گاز طبیعی می‌طلبد؛ بنابراین زیرساخت محلی تبدیل گاز طبیعی مایع به گاز، پیش‌شرط پایداری خوراک شیمیایی است.

هم‌زمان تشدید الزامات CBAM و EU ETS، روش‌های اولیه وابسته به زغال را بیش از پیش از نظر اقتصادی ناموجه می‌سازد. به همین دلیل MIMIT در مناقصه بین‌المللی فروش دارایی‌ها، طبق سند اصلاحی «نامه رویه II»، کربن‌زدایی را شرطی الزامی کرد. در میان پیشنهادهای الزام‌آور، طرح حدود ۱٫۵ میلیارد یورویی گروه Jindal برای گذار کامل به قوس الکتریکی با استفاده از اسلب سبز وارداتی تا ۲۰۳۰، و برنامه سرمایه‌گذاری حدود ۵ میلیارد یورویی گروه Flacks مطرح شدند.

گذار به ساختار خودکار DRI-EAF همچنین تعداد کارکنان موردنیاز به ازای هر تن فولاد را نسبت به چرخه ذوب یکپارچه تغییر می‌دهد و می‌تواند شوک اجتماعی ایجاد کند. برای مهار این اثر، دولت ملی و منطقه پولیا

کمیسیون ویژه‌ای برای «رهایی از تک‌صنعتی بودن اقتصاد تارانتو» تشکیل داده‌اند. هدف، اختصاص منابع عمومی به صنعتی‌سازی دوباره زمین‌های بلااستفاده مجموعه، جذب کارکنان جابه‌جاشده در پروژه‌های اقتصاد چرخشی و ساخت اجزای انرژی پاک و ایجاد قطب منطقه‌ای آهن پیش‌احیاشده است. [100، 101، 102، 103، 104، 105، 98، 106، 107، 108، 109، 110، 111، 112، 113، 114]

این مقاله چهار دستاورد اصلی دارد: نخست، ارزیابی فنی‌ـاقتصادی و محیط‌زیستی الکترولیز AEMWE بدون فلزات گروه پلاتین و با طراحی بدون فاصله الکترودی در مقیاس گیگاوات، متصل به فولادسازی؛ دوم، چارچوب محاسباتی حلقه‌بسته که OpenMDAO ناسا، ProFAST آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر آمریکا (NREL) و الگوریتم‌های حل ریشه SciPy را به هم متصل می‌کند؛ سوم، شبیه‌سازی مونت‌کارلو در ۱۰ هزار تکرار برای سنجش عدم‌قطعیت برق، سرمایه و بازار کربن؛ و چهارم، مطالعه موردی اختصاصی یکی از بزرگ‌ترین مراکز متمرکز انتشار کربن صنعتی اروپا.

در دهه گذشته، ارزیابی‌های فنی‌ـاقتصادی منتشرشده در منابعی مانند ScienceDirect و Google Scholar، مبنای مهمی برای سنجش گذار از زیرساخت BF-BOF فسیلی به احیای مستقیم هیدروژنی کم‌انتشار بوده‌اند. مطالعات بنیادی Fischedick در ۲۰۱۴ و Vogl در ۲۰۱۸ خطوط مبنای ترمودینامیکی و مالی فولاد بدون سوخت فسیلی در اروپا را مشخص کردند. ووگل و همکاران، کوره شفت احیا همراه با کوره قوس را مدل‌سازی کردند و نشان دادند احیای کامل با هیدروژن به ۵۰ تا ۶۶ کیلوگرم H به ازای هر تن فولاد خام نیاز دارد. سپس مدل‌های فرایندی Wang در ۲۰۲۳ و Rosner در ۲۰۲۳ تأیید کردند که جایگزینی کامل سوخت فسیلی در احیای سنگ‌آهن و گرم‌کردن جانبی، شدت انتشار عملیاتی را ۸۵ تا ۹۵ درصد کاهش می‌دهد و امکان فنی فرایند را در مقیاس صنعتی نشان می‌دهد. [115، 43، 116، 42]

پس از اثبات امکان‌پذیری فرایند، مطالعات روی حساسیت هزینه هم‌سطح فولاد نسبت به بازار برق تجدیدپذیر و هزینه سرمایه‌ای الکترولایزر تمرکز کردند. بررسی‌های Bhaskar، Fan و Friedmann و Cao نشان دادند برق مصرفی ۶۰ تا ۸۰ درصد هزینه خالص هیدروژن را تعیین می‌کند. طبق این مطالعات، دستیابی فولاد سبز به برابری هزینه با فولاد سنتیِ ۵۵۰ تا ۶۵۰ یورو بر تن، به برق قرارداد خرید شرکتی در بازه ۳۰ تا ۵۰ یورو بر مگاوات‌ساعت یا کاهش هزینه سرمایه الکترولایزر به ۵۰۰ تا ۷۰۰ یورو بر کیلووات نیاز دارد. مدل‌سازی زنجیره تأمین Cao نیز نشان می‌دهد انتقال محل تأسیسات احیا به مناطق دارای انرژی و منابع فراوان، احتمال برابری هزینه را بیشتر می‌کند. [44، 6، 117]

در کنار قیمت برق، پیوند قیمت‌گذاری کربن ــ به‌ویژه نظام تجارت انتشار اتحادیه اروپا ــ و اقتصاد فولاد به‌طور گسترده بررسی شده است. مطالعات Material Economics در ۲۰۱۹ و ارزیابی‌های اختصاصی تارانتو نشان می‌دهند تأسیسات BF-BOF با شدت انتشار ۱٫۸۰ تا ۲٫۱۰ تن CO بر تن فولاد، جریمه عملیاتی سنگینی

می‌پردازند. قیمت مجوز انتشار بالاتر از ۶۰ تا ۸۰ یورو بر تن CO می‌تواند فاصله هزینه میان مسیر فسیلی و فولادسازی با هیدروژن الکترولیتی را کاهش دهد. [118، 119]

با وجود پیشرفت پژوهش‌ها، سه خلأ مهم باقی مانده است. اول، بسیاری از مدل‌های فنی‌ـاقتصادی هزینه هم‌سطح هیدروژن را عددی ثابت و برون‌زا فرض کرده یا بر مفروضات ساده الکترولیز قلیایی و PEM تکیه کرده‌اند؛ در نتیجه تقسیم پویای توان میان استک (۹۲٫۲ درصد) و تجهیزات جانبی (۷٫۸ درصد)، مصرف واقعی آب خام حدود ۱۱ کیلوگرم آب به ازای هر کیلوگرم H و نیاز جبران الکترولیت KOH یک‌درصد وزنی در سامانه گیگاواتی AEMWE را لحاظ نمی‌کنند. دوم، اعتبار درآمد اکسیژن خالص جانبی به مقدار ۷٫۹۵ کیلوگرم O به ازای هر کیلوگرم H ــ معادل ۰٫۴۰ یورو به ازای هر کیلوگرم هیدروژن ــ و نیز سرمایه لازم برای مخزن بافر فشاربالای ۳۵ بار برای کار پیوسته کوره احیا، اغلب نادیده گرفته می‌شود. سوم، مطالعات به مدل‌های قطعی تک‌نقطه‌ای یا نمودارهای حساسیت یک‌بعدی محدود می‌شوند و توزیع ریسک مشترک نوسان هم‌زمان قیمت برق، کربن، سرمایه و سایر ورودی‌ها را کمی‌سازی نمی‌کنند.

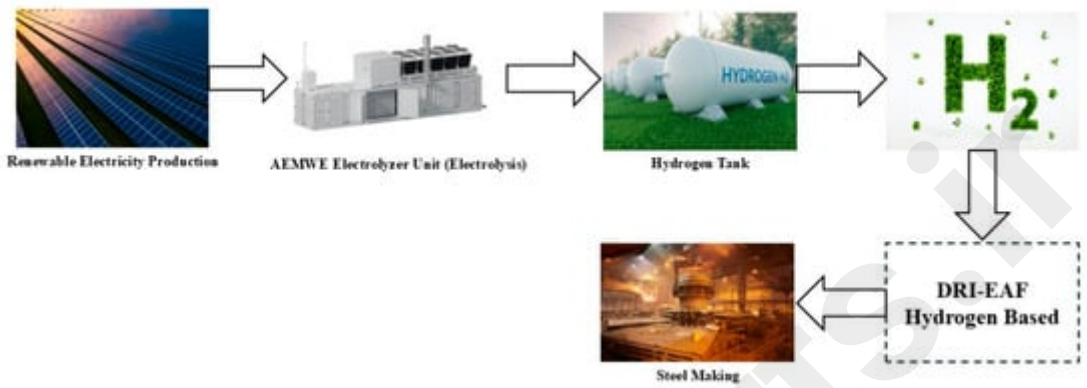
برای پرکردن این خلأها، پژوهش حاضر چارچوب محاسباتی یکپارچه H I-TEA را معرفی می‌کند؛ چارچوبی که مدل چندفیزیکی AEMWE با توان ۲٫۱۶ گیگاوات، مرزهای ارزیابی چرخه عمر مطابق ISO 14044:2006، درآمد حاصل از اکسیژن جانبی و موتور ریسک مونت‌کارلو با ۱۰ هزار اجرا را به هم پیوند می‌دهد. مورد کاربرد، مجتمع آهن‌سازی اولیه Acciaierie d’Italia در تارانتوی ایتالیاست. چهار هدف کمی عبارت‌اند از: مدل‌کردن موازنه جرم و انرژی الکتروشیمیایی برای سامانه موردنیاز تولید سالانه ۶ میلیون تن فولاد پیشنهادی، در مقایسه با ظرفیت قبلی ۸ میلیون تن؛ محاسبه سهم ۰٫۴۰ یورویی درآمد اکسیژن در هر کیلوگرم هیدروژن و تفکیک هزینه ناخالص ۲٫۹۲ از خالص ۲٫۵۲ یورو بر کیلوگرم؛ تعیین سطح‌های غیرخطی برابری هزینه، از جمله قیمت کربن سربه‌سر ۶۸٫۵۴ یورو بر تن CO و سقف قابل‌تحمل قیمت برق ۵۲٫۴۰ یورو بر مگاوات‌ساعت؛ و اجرای تحلیل احتمال‌محور پایداری اقتصادی در برابر عدم‌قطعیت‌های چندمتغیره بازار و عملیات. [120]

ساختار ادامه مقاله با همین اهداف هماهنگ است. بخش دوم، معماری محاسباتی چهارلایه H I-TEA، فرمول‌های LCOH و LCOS، مرز سامانه و روش نمونه‌گیری مونت‌کارلو را توضیح می‌دهد. بخش سوم، نتایج عددی، شاخص‌های حساسیت و توزیع احتمال ریسک را ارائه می‌کند. بخش چهارم نیز جمع‌بندی، پیامدهای سیاست‌گذاری و مسیرهای توسعه مدل را مطرح می‌کند.

۲. مواد و روش‌ها

در این بخش تولید هیدروژن با الکترولیز AEMWE و برق تجدیدپذیر و استفاده از آن در فرایند فولادسازی اولیه

DRI-EAF شبیه‌سازی می‌شود. مطابق شکل ۳، مرز تحلیل از محاسبه تقاضای هیدروژن و تولید هیدروژن سبز آغاز می‌شود، احیای سنگ‌آهن را دربرمی‌گیرد و تا فولادسازی پایین‌دستی ادامه پیدا می‌کند تا کاهش انتشار CO و توجیه اقتصادی هم‌زمان سنجیده شوند.



شکل 3. دیاگرام جریان روش پژوهش از تولید انرژی تجدیدپذیر تا فولادسازی. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

۲.۱. محدوده مطالعه و مرزهای سامانه

مطالعه موردی به تغییر کاربری صنعتی مجتمع تارانتو، معروف به ILVA و سپس Acciaierie d’Italia، اختصاص دارد. این واحد در ناحیه صنعتی ساحلی تارانتو در منطقه پولیای جنوب ایتالیا، در موقعیت ۴۰ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ۱۷ درجه و ۱۲ دقیقه شرقی واقع است. زنجیره کامل ارزش فولاد اولیه در مرز سامانه قرار دارد. برای تفکیک اقتصاد تولید سوخت از مصرف صنعتی پایین‌دستی، تحلیل فنی‌ـاقتصادی دو محدوده مجزا تعریف می‌کند:

شکل 4. نمای هوایی مجتمع فولاد تارانتو «Acciaierie d’Italia». تصویر به‌دلیل نامشخص بودن مجوز بازنشر ماده اقتباس‌شده یا متعلق به شخص ثالث، درج نشده است؛ برای مشاهده به نسخه اصلی مقاله مراجعه کنید.

دسته	پارامتر سامانه	مقدار پایه	دامنه عدم‌قطعیت	واحد	مبنای تعیین / مرجع
ظرفیت کارخانه	تولید اسمی فولاد خام	موجود 8، پیشنهادی 6	ثابت	Mt/yr	مقایسه ظرفیت سایت [108]
الکترولایزر	توان کل سامانه AEMWE	2.16	3.0–1.5	GW	محاسبه ظرفیت [57]
الکترولایزر	تعداد اسکید MW 20	108	مدولار	واحد	استاندارد صنعتی [57,58]
الکترولایزر	مصرف ویژه انرژی استک	48	56–42	kWh/kg H	[61,121,122]

دسته	پارامتر سامانه	مقدار پایه	دامنه عدم‌قطعیت	واحد	مبنای تعیین / مرجع
الکترولایزر	ساعات کار سالانه	8000	8760–4000	h/yr	ضریب ظرفیت 91.3% [59]
نرخ خوراک	شاخص مصرف ویژه هیدروژن	60	75–50	kg H /t steel	کوره شفت [43]
نرخ خوراک	ضریب آب خام	11	13.0–9.9	kg H O/kg H	شامل بلودان [123]
بازار اقتصادی	قیمت برق قرارداد cPPA	50	80–30	EUR/MWh	[124]
بازار اقتصادی	CAPEX الکترولایزر	750	1200–400	EUR/kW	منحنی یادگیری [125]
بازار اقتصادی	ارزش فروش اکسیژن	50	100–0	EUR/t O	[126]
بازار اقتصادی	قیمت کربن EU ETS	79	100–50	EUR/tCO	[96]
بازار اقتصادی	هزینه موزون سرمایه WACC	8	14–4	%	نرخ تنزیل اسمی [6,44]
بازار اقتصادی	عمر اقتصادی دارایی	20	30–10	سال	استهلاک مرسوم [6,43]

- محدوده بالادستی هزینه هم‌سطح هیدروژن (LCOH): تمام هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی تولید و تحویل کوتاه‌مدت هیدروژن را شامل می‌شود؛ از جمله مجموعه الکترولایزرهای AEMWE با توان ۲٫۱۶ گیگاوات، تأسیسات تصفیه و نمک‌زدایی آب خام با ورودی ۴۴۲٫۳۳۲ کیلوگرم در ساعت، ذخیره‌ساز فشاربالا با ظرفیت ۵۴۰ تن هیدروژن در فشار ۳۵ بار برای ۱۲ ساعت کار، و سامانه بازیافت و تراکم اکسیژن با تولید ۳۵۷٫۶۰۰ کیلوگرم در ساعت. نیروگاه‌های خورشیدی و بادی متعلق به شرکت‌های تأمین‌کننده مستقل هستند و در سرمایه ثابت کارخانه منظور نمی‌شوند؛ برق موردنیاز از قرارداد خرید فیزیکی بلندمدت شرکتی (cPPA) با پشتوانه شبکه تهیه شده و هزینه‌ای عملیاتی و متغیر محسوب می‌شود.
- محدوده پایین‌دستی هزینه هم‌سطح فولاد (LCOS): زیرساخت‌های تبدیل گندله سنگ‌آهن به فولاد مذاب، شامل کوره شفت احیای مستقیم هیدروژنی با خروجی سالانه ۶ میلیون تن آهن اسفنجی و کوره قوس الکتریکی متصل به آن است. این محدوده هزینه مستقیم فرآوری، مصرف ۶۰ کیلوگرم هیدروژن در هر تن فولاد و انتشار مستقیم و غیرمستقیم دامنه‌های ۱ و ۲ در چارچوب «دروازه تا دروازه» به میزان ۰٫۲۰ تن CO به ازای هر تن فولاد را دربرمی‌گیرد.

برای کار پیوسته واحد AEMWE طی ۸۰۰۰ ساعت در سال، متناظر با ضریب ظرفیت سالانه ۹۱٫۳ درصد، قرارداد cPPA باید سالانه ۱۷٫۲۸ تراوات‌ساعت برق با نرخ پایه ۵۰ یورو بر مگاوات‌ساعت فراهم کند. تأمین برق از

ترکیبی از باد فراساحلی، باد خشکی و نیروگاه‌های خورشیدی مقیاس بزرگ انجام می‌شود و خدمات متعادل‌سازی و تضمین توان شبکه، وقفه‌های تجدیدپذیر را جبران می‌کنند. بر پایه معیارهای دستورالعمل انرژی تجدیدپذیر اتحادیه اروپا RED II/III برای سوخت‌های تجدیدپذیر با منشأ غیرزیستی (RFNBO)، برق قراردادی باید با گواهی مبدأ (GoO) و انطباق زمانی پشتیبانی شود تا تولید هیدروژن الکترولیتی در محاسبات، شدت کربن صفر گرم معادل CO بر کیلووات‌ساعت داشته باشد. بااین‌حال انتشار باقیمانده ناشی از پشتیبانی شبکه، برق کمکی فولادسازی و تلفات انتقال، در دامنه ۲ به مقدار ۰٫۱۲ تن CO بر تن فولاد لحاظ شده است. با افزودن انتشار مستقیم دامنه ۱ به مقدار ۰٫۰۸ تن، شدت انتشار «دروازه تا دروازه» مسیر سبز به ۰٫۲۰ تن CO بر تن فولاد می‌رسد.

جدول ۵ ظرفیت زیرسامانه‌ها، نرخ تولید، پارامترهای عملیاتی مهم و جایگاه هر جزء در مرز تحلیل فنی‌ـاقتصادی را به‌تفصیل ارائه می‌کند.

زیرسامانه	ظرفیت / ابعاد	تولید یا مصرف	شاخص‌های کلیدی عملکرد	مرز سامانه	منابع
خرید برق تجدیدپذیر با cPPA و تثبیت شبکه	توان اوج 2.16 GW	برداشت برق 17.28 TWh/yr	ترکیب خورشید و باد؛ 50 EUR/MWh؛ ضریب ظرفیت 91.3% و 8000 h/yr	بالادست LCOH؛ OPEX، نیروگاه متعلق به طرف ثالث	[127,128]
الکترولایزر AEMWE	2.16 GW؛ تعداد 108 اسکید 20 MW	45,000 kg H₂/h؛ 360,000 t/yr	SEC برابر 48 kWh/kg H₂؛ HHV برابر 82.1%؛ فشار 35 bar؛ CAPEX برابر 750 EUR/kW	بالادست LCOH؛ دارایی و هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی	[128]
تصفیه و املاح‌زدایی آب خام	ظرفیت تصفیه 3.96 Mt/yr	دریافت 495,000 kg H₂O/h	ضریب آب 11 kg/kg H₂؛ هزینه آب 1.50 EUR/m³	بالادست LCOH؛ OPEX	[129,130]
ذخیره بافر پرفشار هیدروژن	ظرفیت ذخیره 540 t H₂	ذخیره احتیاطی 12 ساعت کوره	فشار 35 bar؛ CAPEX برابر 500 EUR/kg H₂ ذخیره	بالادست LCOH؛ دارایی و CAPEX/OPEX	[43,115,131]
بازیابی و فروش اکسیژن جانبی	2.86 Mt O₂/yr	357,600 kg O₂/h	نسبت استوکیومتری 7.94 kg O₂/kg H₂؛ قیمت عمده‌فروشی 50 EUR/t	بالادست LCOH؛ اعتبار درآمدی	[132–134]
کوره شفت H₂ - DRI	6 Mt/yr آهن اسفنجی	750,000 kg DRI/h	60 kg H₂/t DRI؛ درجه متالیزاسیون 94%؛ راندمان حرارتی 85%	پایین‌دست LCOS؛ دارایی فرایندی	[43,135]
کوره قوس الکتریکی و ریخته‌گری	6 Mt/yr فولاد خام مذاب	750,000 kg steel/h	هزینه پایه 436.40 EUR/t؛ برق EAF برابر 520 kWh/t؛ مصرف الکترود 1.8 kg/t	پایین‌دست LCOS؛ دارایی فرایندی	[136]
هزینه کربن مقرراتی	انتشار باقیمانده 1.20 Mt CO₂/yr	شدت 0.20 tCO₂/t steel	قیمت EU ETS برابر 79 EUR/tCO₂؛ دامنه 1 برابر 0.08 و دامنه 2 برابر 0.12 t/t	پایین‌دست LCOS؛ OPEX مالیات	[44]

برای ایجاد مبنایی فراگیر در مقایسه، شش مسیر اصلی تولید متالورژیکی بررسی می‌شوند:

- BF-BOF: کوره‌بلند و کنورتور اکسیژنی متعارف؛ شدت انتشار ۱٫۸۰ تن CO بر تن فولاد. [6، 137]
- Coal-DRI: احیای مستقیم با زغال‌سنگ؛ شدت انتشار ۲٫۱۰ تن CO بر تن فولاد. [125، 138]
- NG-DRI: احیای مستقیم با گاز طبیعی بدون جذب کربن؛ شدت انتشار ۱٫۰۰ تن CO بر تن فولاد. [9، 41]
- NG-DRI+CCS: احیای مستقیم گازطبیعی همراه جذب ۹۰ درصد کربن؛ شدت انتشار ۰٫۴۰ تن CO بر تن فولاد. [6، 127]
- Scrap-EAF: بازیافت قراضه در کوره قوس؛ شدت انتشار ۰٫۳۰ تن CO بر تن فولاد. [9، 100، 139]
- Green H -DRI-EAF: احیای مستقیم با هیدروژن سبز حاصل از AEMWE و کوره قوس؛ شدت انتشار ۰٫۲۰ تن CO بر تن فولاد. [43، 127]

برای مقایسه عملکرد کلان اقتصادی، فنی و محیط‌زیستی سامانه پیشنهادی AEMWE با توان ۲٫۱۶ گیگاوات با وضعیت واقعی صنعت، شش مسیر مستقل فولادسازی به‌صورت صریح در چارچوب محاسباتی H I-TEA تعریف و مبنای مقایسه قرار گرفته‌اند:

- کوره‌بلند ـ کنورتور اکسیژنی (BF-BOF): مسیر یکپارچه غالب جهان که در آن کک متالورژی و زغال تزریقی هم عامل احیا و هم منبع حرارت در کوره‌بلند هستند و پس از تولید چدن مذاب، دمش اکسیژن در کنورتور انجام می‌شود. این مسیر مبنای مرجع فسیلی است؛ هزینه پایه فرآوری آن ۴۷۷٫۸۰ یورو بر تن و شدت انتشار مستقیمش ۱٫۸۰ تن CO بر تن فولاد فرض شده است.
- احیای مستقیم زغال‌سنگ‌محور (Coal-DRI): در این مسیر با زغال حرارتی غیرککشو در کوره دوار یا واحد گازسازی، آهن اسفنجی تولید و سپس در کوره قوس ذوب می‌شود. اتکا به مواد کربنی، بالاترین شدت انتشار میان مسیرهای مقایسه‌شده، یعنی ۲٫۱۰ تن CO بر تن فولاد، را ایجاد می‌کند؛ هزینه پایه ۵۰۰ یورو بر تن است.

- احیای مستقیم با گاز طبیعی (NG-DRI): از گاز سنتزِ حاصل از ریفرمینگ گاز طبیعی، شامل CO و H، در کوره شفت از نوع MIDREX یا Energiron برای احیای گندله مناسب DRI استفاده می‌شود و آهن اسفنجی داغ به کوره قوس می‌رود. این گزینه مرحله‌ای گذار به سمت کاهش کربن است؛ انتشار آن ۱ تن CO بر تن و هزینه پایه ۴۵۰ یورو بر تن در نظر گرفته شده است.

- احیای مستقیم گازطبیعی با جذب کربن (NG-DRI+CCS): سامانه جذب شیمیایی CO از گاز بالاسری کوره شفت با بازده جذب ۹۰ درصد به مدار احیا افزوده می‌شود. این کار هزینه استهلاک سرمایه و فرآوری پایه را به ۵۲۰ یورو بر تن افزایش می‌دهد، اما شدت انتشار را تا ۰٫۴۰ تن CO بر تن فولاد پایین می‌آورد.

- بازیافت قراضه در کوره قوس (Scrap-EAF): مرحله احیای سنگ‌آهن حذف می‌شود و قراضه آهنی با برق شبکه کم‌کربن در کوره قوس ذوب می‌شود. هزینه پایه ۴۶۰ یورو بر تن و شدت انتشار ۰٫۳۰ تن CO بر تن است؛ اما گسترش جهانی این روش به محدودیت دسترسی به قراضه مرغوب وابسته است.

- مسیر هیدروژن سبز پیشنهادی (Green H -DRI-EAF): خوراک پیوسته ۶۰ کیلوگرم هیدروژن سبز به ازای هر تن فولاد با واحد AEMWE بدون فلزات گروه پلاتین و ظرفیت ۲٫۱۶ گیگاوات تولید می‌شود و به کوره شفت و سپس کوره قوس می‌رود. هزینه پایه فرآوریِ غیرمرتبط با هیدروژن، در بین مسیرهای مبتنی بر سنگ‌آهن، کمترین مقدار یعنی ۴۳۶٫۴۰ یورو بر تن را دارد و شدت انتشار به ۰٫۲۰ تن CO بر تن کاهش می‌یابد.

مقایسه پیکربندی فنی، احیاکننده اصلی، هزینه فرآوری پایه و شدت انتشار هر شش مسیر در جدول ۶ درج شده است.

مسیر فولادسازی	سوخت و عامل احیا	خوراک فلزی	هزینه پایه بدون سوخت (EUR/t)	شدت انتشار (tCO /t)	مرز ارزیابی چرخه‌عمر	منابع
BF-BOF متداول	کک متالورژی و زغال تزریقی	زینتر و گندله سنگ‌آهن	477.80	1.80	دروازه تا دروازه؛ دامنه 1 و 2	[40,137]
Coal-DRI	زغال حرارتی غیرکک‌شو	سنگ‌آهن درشت و گندله	500	2.10	دروازه تا دروازه؛ دامنه 1 و 2	[17,18]

مسیر فولادسازی	سوخت و عامل احیا	خوراک فلزی	هزینه پایه بدون سوخت (EUR/t)	شدت انتشار (tCO /t)	مرز ارزیابی چرخه‌عمر	منابع
NG-DRI	گاز سنتز حاصل از متان (CO + H)	گندله با عیار مناسب احیای مستقیم	450	1.00	دروازه تا دروازه؛ دامنه 1 و 2	[6,43]
NG-DRI + CCS با جذب 90%	گاز سنتز متان همراه جذب آمینی CO	گندله احیای مستقیم	520	0.40	دروازه تا دروازه؛ دامنه 1 و 2	[6,42]
Scrap-EAF	برق و الکترود کربنی	100% قراضه آهنی	460	0.30	دروازه تا دروازه؛ دامنه 1 و 2	[100,114]
سبز H -DRI-EAF	فولاد kg H /t 60 و برق cPPA	گندله احیای مستقیم	436.40	0.20	ISO 14044؛ دامنه 1 برابر 0.08 و دامنه 2 برابر 0.12	[43,44]

یادداشت مربوط به مرزهای چرخه عمر جدول‌های ۶ و ۷: مسیرهای فسیلی و بازیافت قراضه، یعنی BF-BOF، NG-DRI+CCS، NG-DRI، Coal-DRI و Scrap-EAF، با حسابداری انتشار «دروازه تا دروازه» در دامنه‌های ۱ و ۲ و با توجه به استوکیومتری احتراق و ضریب انتشار برق شبکه ملی سنجیده شده‌اند. در مقابل، برای مسیر سبز H -DRI-EAF دستورالعمل مرزبندی ارزیابی چرخه عمر ISO 14044 و الزامات افزونگی، هم‌بستگی زمانی و جغرافیایی RED II/III اتحادیه اروپا در قراردادهای خرید برق گواهی‌شده اعمال می‌شود. بدین ترتیب منشأ تجدیدپذیر هیدروژن با گواهی‌های مبدأ اثبات و انتشار محدود ناشی از پشتیبانی کوتاه‌مدت شبکه نیز منظور می‌شود.

ماژول	نوع مؤلفه	ورودی‌های اصلی	معادلات حاکم در مقاله	خروجی‌ها
1. الکترولایزر AEMWE	صریح (Explicit)	Pelec، CAPEX_AEMWE، SEC_AEMWE، f_BOP	H = Pelec × (1 - fBOP) / SEC_AEMWE؛ O = 7.9467 × H ؛ water = 11.0 × H	H ، O ، water (kg/h)؛ توان جانبی (P_BOP (MW
2. ذخیره‌ساز بافر	صریح	H ، مدت ذخیره tbuffer، قیمت ذخیره Pstorage	Vbuffer = H × tbuffer؛ رابطه توان تراکم با P ، P ، T ، R، Z و بازده comp	CAPEX_storage (EUR)؛ توان کمپرسور (MW)
3. متالورژی H - DRI-EAF	صریح	H ، شاخص I_H و ظرفیت فولاد	steel = (H × 8000) / I_H	steel (t/yr)؛ SEC_EAF (kWh/t))؛ انتشار دامنه 1 (tCO /t)
4. موتور مالی ProFAST	ضمنی (Implicit)	CAPEX_total، OPEX_total، درآمد اکسیژن WACC ، R_O، قیمت کربن	NPV = [t=0..N] (Cin,t - Cout,t)/(1+rWACC)^t = 0	LCOH_gross و LCOH_net (EUR/kg)؛ LCOS_green (EUR/t)

مجتمع تارانتو در کرانه دریای یونی قرار دارد و از بزرگ‌ترین مراکز یکپارچه تولید فولاد اولیه اروپاست. بندر

آب‌عمیق این مجموعه، ورود دریایی گندله و سایر مواد اولیه حجیم و ارسال بین‌المللی محصولات فولادی تخت و طویل را ممکن می‌سازد؛ ازاین‌رو برای آزمون گذار کربن‌زدایی در مقیاس بزرگ اهمیت راهبردی دارد.

مجتمع تارانتو به‌طور تاریخی تنها فولادسازی اولیه یکپارچه باقی‌مانده ایتالیا با مسیر BF-BOF بوده و برای احیای اکسیدهای آهن به کک و زغال تزریقی متکی است. شدت انتشار مستقیم در الگوی تاریخی آن حدود ۱٫۸۰ تن CO به ازای هر تن فولاد خام است. طی دهه‌های اخیر، ذرات معلق، فلزات سنگین و گازهای گلخانه‌ای منشأ دعاوی حقوقی و نگرانی‌های جدی اجتماعی، اقتصادی و سلامت عمومی بوده‌اند. مجموعه این فشارها به مدیریت فوق‌العاده دولتی و تدوین نقشه راه کربن‌زدایی الزام‌آور با محوریت سازمان‌هایی مانند DRI d’Italia و پروژه متالورژی هیدروژنی HYDRA انجامیده است. به همین دلیل این سایت نمونه‌ای واقعی و مهم برای تبدیل کارخانه موجود به تولید اولیه کم‌کربن است.

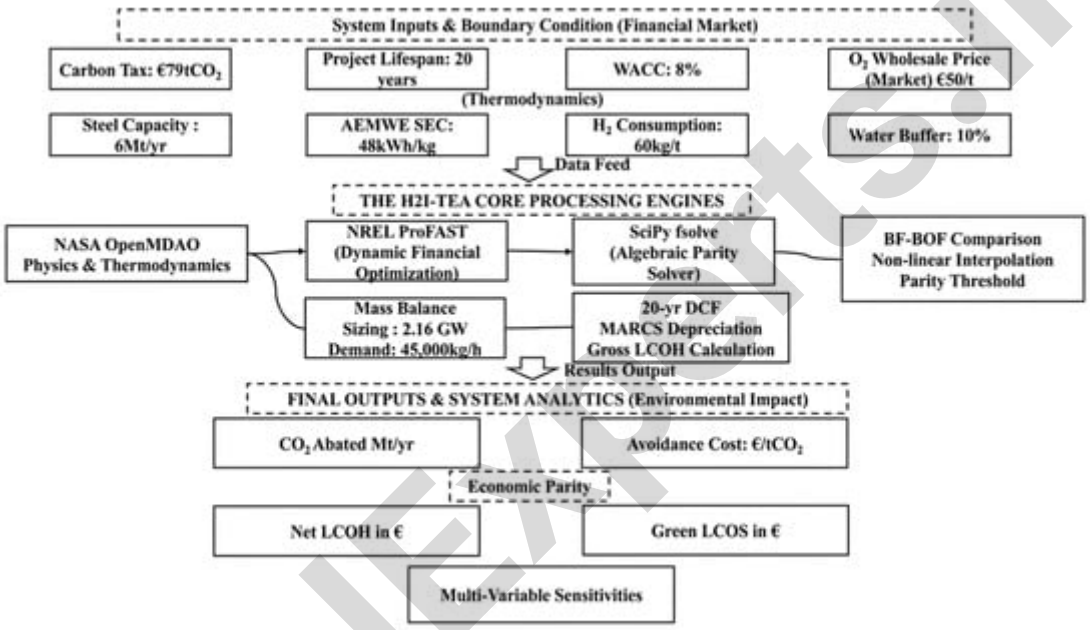
برای تعیین مرزی مشخص در پلتفرم شبیه‌سازی، ظرفیت اسمی پایدار تولید فولاد خام اولیه برابر ۶ میلیون تن در سال فرض می‌شود؛ مقداری متناظر با نیاز تاریخی دارایی‌های عملیاتی مانند کوره‌بلندهای شماره ۱، ۲ و ۴. این مقدار، مبنای ریاضی گذار فناورانه است. مدل، جایگزینی کوره‌بلند زغال‌سنگ‌محور با بلوک متمرکز الکترولیز AEMWE به ظرفیت ۲٫۱۶ گیگاوات و کوره شفت احیای هیدروژنی و کوره قوس را می‌سنجد. بر این اساس، سرمایه‌گذاری لازم، مقیاس تجهیزات جانبی، مشخصات مصرف انرژی و ظرفیت واقعی حذف انتشار برای تبدیل یک مرکز بزرگ انتشار کربن به قطب تولید فولاد سبز تعیین می‌شود.

برای حفظ کار پایدار کوره شفت و جلوگیری از چرخه‌های حرارتی، تأمین برق از قرارداد خرید فیزیکی شرکتی با تضمین شبکه انجام می‌شود. برق اصلی از نیروگاه‌های بادی و خورشیدی قراردادی با تعرفه پایه ۵۰ یورو بر مگاوات‌ساعت می‌آید و نوسان کوتاه‌مدت با خدمات موازنه شبکه جبران می‌شود. در پایین‌دست الکترولایزر، ذخیره‌ساز بافر ۵۴۰ تنی در فشار ۳۵ بار و زمان پشتیبانی ۱۲ ساعت قرار دارد تا تغییرات کوتاه عرضه از تزریق پیوسته هیدروژن به کوره مستقل شود.

۲.۲. مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی فرایند

برای تحلیل نظام‌مند رفتار چندبعدی فولاد سبز در مقیاس گیگاوات، پژوهش معماری یکپارچه فنی‌ـاقتصادی احیای مستقیم هیدروژنی با نام H2I-TEA را توسعه می‌دهد. این چارچوب اختصاصی، شبیه‌سازی ترمودینامیکی پایدار را با پیش‌بینی مالی چندساله و پویا پیوند می‌زند. اتصال کتابخانه بهینه‌سازی چندرشته‌ای OpenMDAO به موتور مالی ProFAST متعلق به NREL اجازه می‌دهد موازنه‌های صریح جرم و انرژی، مصرف ویژه برق و تولید محصولات جانبی به‌صورت هم‌زمان با استهلاک سرمایه، مالیات، تأمین مالی و شوک‌های بازار محاسبه شوند. بنابراین نتیجه صرفاً یک قیمت ثابت پایه نیست، بلکه سامانه‌ای شیءگرا برای شناسایی دقیق

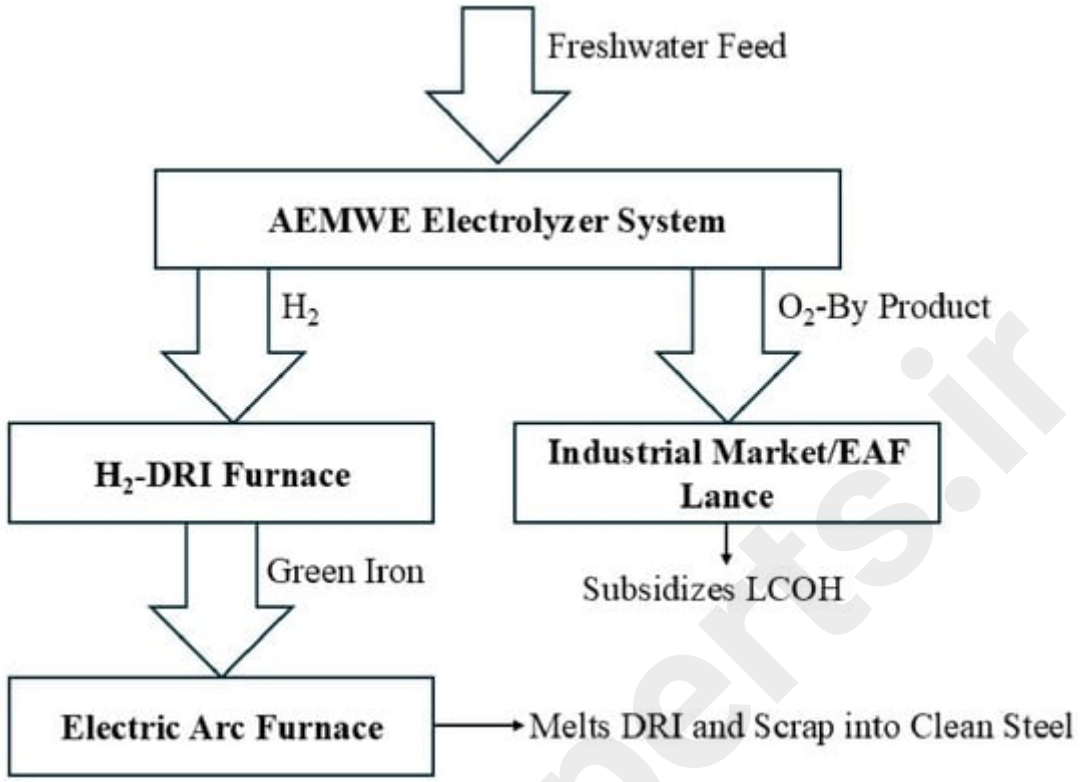
شرایط برابری فنی‌ـاقتصادی و میزان کاهش انتشار است. آرایش شبکه پیوسته جرم و انرژی در شکل ۵ ارائه شده است. شرط مرزی مدل، تولید ۶ میلیون تن فولاد مذاب در سال است. برق ترکیبی تجدیدپذیر به سامانه AEMWE می‌رسد؛ آب تصفیه‌شده به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌شود؛ هیدروژن از مسیر ذخیره‌سازی و تزریق به کوره شفت، سنگ‌آهن را احیا می‌کند و آهن اسفنجی در کوره قوس به فولاد مذاب تبدیل می‌شود.
جریان‌های آب، حرارت، اکسیژن، برق و هزینه در مدل با یکدیگر مرتبط‌اند و بازگشت هر جریان جانبی در موازنه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی لحاظ می‌شود. [140، 141]



شکل 5. معماری سامانه ارزیابی فنی ـ اقتصادی یکپارچه هیدروژن (H2I-TEA). منبع: Soomro، Gambelli و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

در کنار نمایش فیزیکی، مسیرهای تبدیل جرم به ارزش اقتصادی در نمودار بلوکی پژوهش آمده‌اند. پس از الکترولیز آب شیرین، جریان هیدروژن به کوره H2-DRI و سپس آهن سبز حاصل به کوره قوس منتقل می‌شود. اکسیژن جانبی نیز یا در بازار صنعتی فروخته می‌شود یا به‌صورت مستقیم برای دمش در کوره قوس مصرف می‌شود. درآمدزایی فعال از این جریان دوم، هزینه هم‌سطح خالص هیدروژن را کاهش می‌دهد و اهرم مهمی در رساندن هزینه نهایی فولاد به سطح رقابت با روش‌های فسیلی است.

برای نمایش رفتار غیرخطی سامانه تولید هیدروژن در ظرفیت گیگاوات، زنجیره H2I-TEA شبیه‌سازی فیزیکی را در سه مرحله به تنزیل مالی چندساله متصل می‌کند؛ ترتیب اجرای آن در شکل ۶ نشان داده شده است:



شکل 6. طرح شماتیک فرایند پیشنهادی یکپارچه فولادسازی هیدروژنی با الکترولیز AEMWE. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

- مرحله اول ـ مقیاس‌دهی ترمودینامیکی چندفیزیکی و غیرخطی با OpenMDAO ناسا: ولتاژ الکتروشیمیایی استک، افت‌های اهمی و برق تجهیزات جانبی به‌صورت تابع‌های غیرخطی از نرخ تولید محاسبه می‌شوند. مصرف ویژه استک، با مقدار پایه ۴۸ کیلووات‌ساعت به ازای هر کیلوگرم هیدروژن، و آب خام ورودی، ۱۱ کیلوگرم آب بر کیلوگرم H، در هر تکرار دوباره محاسبه می‌شوند تا اثر کنترل دما، تخلیه شورابه نمک‌زدایی و انرژی تراکم ۳۵ بار، به‌جای یک رابطه خطی ثابت، در مدل حضور داشته باشند.

- مرحله دوم ـ استهلاک، مالیات و جریان نقدی تنزیل‌شده با ProFAST از NREL: نرخ‌های جرم و نیازهای تأسیساتی مرحله اول وارد موتور جریان نقدی ProFAST می‌شوند. مدل، بردارهای مالی غیرخطی پروژه ۲۰ساله را با استهلاک شتاب‌یافته هفت‌ساله MACRS، بهره دوران ساخت، بازپرداخت بدهی با هزینه موزون سرمایه ۸ درصد و تورم سالانه بهره‌برداری در نظر می‌گیرد. فروش اکسیژن جانبی به مقدار ۳۵۷,۶۰۰ کیلوگرم در ساعت و نرخ ۵۰ یورو بر تن، به‌صورت هزینه عملیاتی منفی وارد می‌شود و هزینه خالص هیدروژن را تنظیم می‌کند.

- مرحله سوم ـ حل ریشه غیرخطی و برابری هزینه با SciPy: تابع `fsolve` مسیر عددی یافتن ریشه

را اجرا می‌کند و اقتصاد پایین‌دستی احیای مستقیم و کوره قوس را می‌سنجد. حل‌گر، LCOS فولاد سبز را با تغییر تعرفه برق و بهای مجوز کربن مجدداً محاسبه می‌کند تا نقطه تلاقی غیرخطی هزینه فولاد سبز و فولاد BF-BOF، یعنی شرایط سربه‌سر، شناسایی شود.

این اتصال پویا سبب می‌شود جست‌وجوهای حساسیت و ۱۰ هزار تکرار مونت‌کارلو، بازخوردهای غیرخطی را از اضافه‌ولتاژ الکتروشیمیایی تک‌سلول تا آستانه رقابت‌پذیری فولاد در بازار نهایی منتقل کنند.

۲.۳. مدل‌سازی ریاضی فرایند الکترولیز AEMWE

ماژول تولید هیدروژن، الکترولایزر آب با غشای تبادل آنیونی (AEMWE) را شبیه‌سازی می‌کند. این ماژول به‌صورت مؤلفه‌ای محاسباتی صریح تعریف شده و موازنه پایدار جرم و انرژی آن با مصرف ویژه برق استک (SEC) کنترل می‌شود.

توان الکتریکی کل موردنیاز سامانه در حالت پایدار، برحسب مگاوات، از نرخ جرمی هدف هیدروژن و بازده سامانه محاسبه می‌شود؛ رابطه شماره ۱ در متن اصلی همین موازنه را نشان می‌دهد. در این رابطه P_sys بار کل برق مجموعه الکترولایزر برحسب مگاوات، H_ جریان جرمی هیدروژن برحسب کیلوگرم در ساعت و SEC مصرف ویژه انرژی استک AEMWE برحسب کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم است. [122، 142] P s y s = m · H 2 · S E C
(1000 P_{sys}=(ṁ_{H_{2}}·SEC)/(1000

برای ارزیابی درآمد اکسیژن جانبی، نرخ تولید استوکیومتری O از جرم مولی گازها به دست می‌آید. جرم مولی هیدروژن ۲٫۰۱۶ و جرم مولی اکسیژن ۳۱٫۹۹۹ کیلوگرم بر کیلومول است؛ رابطه شماره ۲ نسبت جریان جرمی اکسیژن به هیدروژن را تعریف می‌کند. [64، 121] m · O 2 = 1 2 m · H 2 M W H 2 M W O 2
{{ṁ_{O_{2}}=(1)/(2)((ṁ_{H_{2}})/(MW_{H_{2}}))MW_{O_{2

برای بازتاب‌دادن محدودیت‌های عملیاتی، میزان آب خام ورودی صرفاً برابر مقدار استوکیومتری فرض نمی‌شود. نرخ خوراک آب باید تلفات تخلیه واحد نمک‌زدایی و تبخیر برج خنک‌کن را جبران کند. در رابطه ۳، ضریب تجربی f_water برابر ۱۱ کیلوگرم آب خام به ازای هر کیلوگرم هیدروژن تعریف شده است. با تولید ۴۵ هزار کیلوگرم هیدروژن در ساعت، این ضریب اتلاف آب حدود ۱۰ درصد، تبخیر خنک‌کاری و رقیق‌سازی الکترولیت KOH یک‌درصد وزنی را پوشش می‌دهد. [64، 121، 122] m · H 2 O , f e e d = m · H 2 · f w a t e r
{ṁ_{H_{2}O,feed}=ṁ_{H_{2}}·f_{water

۲.۴. مدل‌سازی فرایند با OpenMDAO و یکپارچه‌سازی DRI-H

برای شبیه‌سازی برهم‌کنش پویای سنتز الکتروشیمیایی هیدروژن در بالادست، ذخیره بافر، متالورژی احیای مستقیم در پایین‌دست و جریان‌های نقدی، چارچوب H I-TEA در بستر بهینه‌سازی پایتونی OpenMDAO ساخته شده است. در این فرایند چندرشته‌ای، قوانین بقای جرم و انرژی با معادلات جریان نقدی تنزیل‌شده در یک حلقه بهینه‌سازی مبتنی بر مشتق به هم متصل‌اند.

۲.۴.۱. معماری اجزا و معادلات فیزیکی حاکم

معماری OpenMDAO از چهار مؤلفه صریحِ مرتبط با یکدیگر و اجزای ضمنی تشکیل شده است که در جدول ۷ معرفی می‌شوند:

- ماژول الکتروشیمیایی بالادستی ـ الکترولایزر AEMWE:

این مؤلفه دبی جرمی هیدروژن، تولید اکسیژن جانبی و نیاز به آب نمک‌زدایی‌شده را به‌صورت تابع‌های صریح توان الکتریکی و SEC محاسبه می‌کند؛ روابط ۴ تا ۶ به‌ترتیب جریان‌های هیدروژن، اکسیژن و آب را تعریف می‌کنند. سهم توان تجهیزات جانبی f_BOP برابر ۰٫۰۷۸ یا ۷٫۸ درصد، مصرف ویژه انرژی ۴۸ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم H، بازده استوکیومتری اکسیژن ۷٫۹۳۶ کیلوگرم O بر کیلوگرم H و ضریب مصرف کل آب خام ۱۱ کیلوگرم بر کیلوگرم هیدروژن فرض شده است. H 2 = P e l e c · (1 - f B O P) S E C A E M W E O 2 = y O 2 · H 2 = 7.936 · H 2

$$\dot{m}_{H_{2}}=(P_{elec}\cdot(1-f_{BOP}))/(SEC_{AEMWE})$$

w a t e r = f w a t e r · H 2 = 11 · H 2

$$\dot{m}_{O_{2}}=y_{O_{2}}\cdot\dot{m}_{H_{2}}=7.936\cdot\dot{m}_{H_{2}}$$

$$\{\{\dot{m}_{water}=f_{water}\cdot\dot{m}_{H_{2}}=11\cdot\dot{m}_{H_{2}$$

.2

ماژول ذخیره‌سازی و تراکم ـ سامانه بافر:

این بخش ظرفیت مخزن گاز فشاربالای ۳۵ بار و توان کمکی کمپرسور را برای حفظ کار پیوسته کوره شفت هنگام نوسان کوتاه تأمین محاسبه می‌کند. رابطه ۷ حجم ذخیره را از دبی هیدروژن و زمان پشتیبانی به دست می‌دهد و رابطه ۸ توان تراکم را از خواص گاز، نسبت فشار و بازده کمپرسور محاسبه می‌کند. زمان ذخیره ۱۲ ساعت، فشار ورودی ۱ بار، فشار خروجی ۳۵ بار، نسبت گرمای ویژه ۱٫۴۱ و بازده تراکم ۷۵ درصد است. V b u f f e r = H 2 · t b u f f e r P c o m p r e s s o r = H 2 · Z R T 1 - 1 P 2 P 1 - 1 - 1 · 1 c o m p

$$V_{buffer}=\dot{m}_{H_{2}}\cdot t_{buffer}$$

$$(\{P_{compressor}=\dot{m}_{H_{2}}\cdot((\gamma ZRT_{1})/(\gamma-1))[((P_{2})/(P_{1}))^{(\gamma-1)/(\gamma)}-1]\cdot(1)/(\eta_{comp}$$

.3

ماژول متالورژی پایین‌دستی ـ H -DRI-EAF:

نرخ تولید هیدروژن از طریق سینتیک احیای مستقیم در کوره شفت و ذوب در کوره قوس با نرخ فولاد مذاب مرتبط می‌شود. رابطه ۹، تولید فولاد سالانه را از دبی هیدروژن، ۸۰۰۰ ساعت کار در سال و شاخص مصرف ویژه ۶۰ کیلوگرم H در هر تن فولاد محاسبه می‌کند. s t e e l = H 2 · 8000 I H 2 ({{ṁ_{steel}=(ṁ_{H_{2}}·8000)/(I_{H_{2}

.4

ماژول مالی و جریان نقدی ـ موتور ProFAST:

این مؤلفه با محاسبه جریان نقدی تنزیل‌شده طی ۲۰ سال، هزینه هم‌سطح ناخالص هیدروژن، خالص هیدروژن و فولاد را به دست می‌دهد؛ روابط ۱۰ تا ۱۲ به‌ترتیب بازیافت سرمایه و هزینه سالانه، کسر درآمد اکسیژن و افزودن هزینه فرآوری و کربن را نشان می‌دهند. ضریب بازیافت سرمایه CRF برابر ۰٫۱۰۱۸۵ برای نرخ هزینه موزون سرمایه ۸ درصد و عمر ۲۰ سال، اعتبار اکسیژن ۰٫۴۰ یورو بر کیلوگرم H، هزینه پایه فرآوری ۴۳۶٫۴۰ یورو بر تن فولاد و شدت انتشار مسیر سبز ۰٫۲۰ تن CO بر تن است. L C O H g r o s s = C R F · C A P E X t o t a l + O P E X a n n u a l H 2 · 8000 LCOH_{gross}=(CRF·CAPEX_{total}+OPEX_{annual})/(ṁ_{H_{2}}·8000) L C O H n e t = L C O H g r o s s - R O 2 LCOH_{net}=LCOH_{gross}−R_{O_{2}} L C O S = C b a s e + I H 2 · L C O H n e t + (G r e e n · P c a r b o n) LCOS=C_{base}+(I_{H_{2}}·LCOH_{net})+(ε_{Green}·P_{carbon}) r (1 + r) N (1 + r) N - 1 (r(1+r)^{N})/((1+r)^{N}−1)

۲.۴.۲. صورت‌بندی مسئله بهینه‌سازی ریاضی

در بهینه‌سازی یکپارچه، هدف کمینه‌کردن تابع غیرخطی هزینه هم‌سطح فولاد نسبت به بردار متغیرهای طراحی است؛ رابطه شماره ۱۳ تابع هدف را تعریف می‌کند. m i n x f x = L C O S (x) [min; x]f(x)=LCOS(x)

این کمینه‌سازی تحت قیود موازنه جرم هیدروژن تولیدی و مصرف‌شده، بقای توان الکتریکی بین استک و تجهیزات جانبی، سقف اقتصادی تعرفه برق حداکثر ۵۲٫۴۰ یورو بر مگاوات‌ساعت و استقلال ذخیره هیدروژن حداقل ۱۲ ساعت انجام می‌شود. روابط شماره ۱۴ تا ۱۷ قیدهای تساوی و نامساوی را ارائه می‌کنند. g 1 x = H 2 , p r o d u c e d - s t e e l · I H 2 8000 = 0 (M a s s C o n t i n u i t y) g_{1}(x)=ṁ_{H_{2,produced}}−((ṁ_{steel}·I_{H_{2}})/(8000))=0(MassContinuity) g 2 x = P e l e c - P s t a c k + P B O P + P c o m p r e s s o r = 0 (E n e r g y C o n s e r v a t i o n)

$g_{2}(x)=P_{elec}-(P_{stack}+P_{BOP}+P_{compressor})=0(EnergyConservation)$ $h 1 x = P e l e c , t a r i f f$ $\leq 52.40 \quad E U R / M W h \quad (E c o n o m i c \quad P a r i t y \quad L i m i t)$ $h_{1}(x)=P_{elec,tariff}\leq 52.40EUR/MWh(EconomicParityLimit)$ $h 2 x = t b u f f e r \geq 12 \quad h \quad (A u t o n o m y$ $(\quad C o n s t r a i n t)$ $h_{2}(x)=t_{buffer}\geq 12h(AutonomyConstraint$

بردار متغیرهای طراحی در رابطه ۱۸ شامل ظرفیت سرمایه‌ای، توان ذخیره، اعتبار اکسیژن، مصرف ویژه هیدروژن، تعرفه برق و بهای کربن است. $x = [W c a p , P s t o r a g e , R O 2 , I H 2 , P e l e c , t a r i f f , P c a r$ $b o n] T$ $x=[W_{cap},P_{storage},R_{O_{2}},I_{H_{2}},P_{elec,tariff},P_{carbon}]^{T}$

۲.۴.۳. محاسبه تحلیلی گرادیان و حل‌گر همگرایی

برای پرهیز از خطای برش و گردکردن در مشتق‌گیری عددی معادلات غیرخطی، OpenMDAO مشتقات جزئی را با روش گام مختلط (Complex-Step) محاسبه می‌کند؛ رابطه ۱۹ مقدار قسمت موهومی تابع را بر گام بسیار کوچک h برابر ۱۰ به توان منفی ۲۰ تقسیم می‌کند. حل مجموعه قیود با روش بهینه‌سازی گرادیانی SLSQP انجام شده و آستانه همگرایی کمتر از ۱۰ به توان منفی ۸ تعریف شده است. $f \partial x \approx I m [f x + i \cdot h] h \partial$ $((\partial f)/(\partial x)\approx(Im[f(x+i\cdot h)])/(h$

۲.۵. موتور مالی ProFAST و پارامتردهی

مدل مالی واحد AEMWE با ابزار ProFAST نسخه ۱٫۰٫۶ از آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر آمریکا و موتور جریان نقدی تنزیل‌شده اجرا می‌شود. عمر بهره‌برداری پروژه ۲۰ سال در نظر گرفته شده و نرم‌افزار حداقل قیمت هم‌سطح محصول را طوری محاسبه می‌کند که ارزش فعلی خالص جریان‌های نقدی (NPV) صفر شود؛ معادله ۲۰ این شرط را بیان می‌کند. $N P V = \sum t = 0 N C i n , t - C o u t , t 1 + r W A C C t = 0$ $NPV=\sum_{t=0}^{N}(C_{in,t}-C_{out,t})/((1+r_{WACC})^{t})=0$

در محاسبه جبری ساده‌شده می‌توان از ضریب بازیافت سرمایه ثابت ۰٫۱۰۱۸۵ برای نرخ تنزیل ۸ درصد و دوره ۲۰ساله استفاده کرد؛ اما نتایج اصلی LCOH با ProFAST محاسبه می‌شوند تا ساختار مالیاتی و مالی پویا لحاظ شود. فرمول ضریب بازیافت سرمایه در معادله ۲۱ آمده است. $C R F = r W A C C (1 + r W A C C)$ $(N (1 + r W A C C) N - 1$ $CRF=(r_{WACC}(1+r_{WACC})^{N})/((1+r_{WACC})^{N}-1$

- سپر مالیاتی ناشی از استهلاک شتاب‌یافته: سرمایه نصب‌شده الکترولایزر AEMWE با ظرفیت ۲٫۱۶ گیگاوات برابر ۱٫۶۲ میلیارد یوروست و با برنامه هفت‌ساله MACRS مستهلک می‌شود؛ درصدهای سالانه به‌ترتیب ۳۲، ۱۹٫۲، ۱۱٫۵۲، ۱۱٫۵۲، ۸٫۹۳، ۸٫۹۳، ۸٫۹۳ و ۳٫۹۷ درصد گزارش شده‌اند. تجمیع کسرهای مالیاتی در سال‌های نخست، هزینه خالص سالانه سرمایه را به معادل ۱۵۲٫۱ میلیون یورو

کاهش می‌دهد، درحالی‌که مدل خطی ثابت آن را حدود ۱۶۵ میلیون یورو در سال برآورد می‌کند.

- ساختار سرمایه و WACC: نرخ تنزیل ۸ درصد با فرض ترکیب ۶۰ درصد بدهی و ۴۰ درصد سرمایه سهام‌داران، هزینه بدهی ۵ درصد طی دوره ۲۰ساله و نرخ بازده داخلی هدف سرمایه سهام‌داران ۱۲٫۵ درصد تعیین شده است.

- مالیات و تورم: مدل، مالیات سود شرکت ۲۴ درصد مطابق معیار IRES ایتالیا، دو سال دوره ساخت همراه بهره انباشته، و تورم سالانه ۲ درصد برای هزینه‌های ثابت و متغیر بهره‌برداری و نگهداری را لحاظ می‌کند. درآمد اکسیژن جانبی به شکل خروج وجه نقد منفی محاسبه می‌شود.

- سرمایه نگهدارنده استک: هزینه تعویض استک معادل ۴۰ درصد سرمایه اولیه الکترولایزر، یا ۳۰۰ یورو بر کیلووات، فرض شده است. متن منبع هزینه تجمعی هر رویداد تعویض را «۶۴۸ یورو» ذکر می‌کند؛ با توجه به مقیاس ۲٫۱۶ گیگاوات، این واحد نیازمند بررسی در متن اصلی است. در سناریوی پایه، استک پس از ۱۰ سال یا ۸۰ هزار ساعت کار تعویض می‌شود و هزینه آن در جریان نقدی سال دهم تنزیل شده است.

روابط هزینه هم‌سطح هیدروژن، ناخالص و خالص

برای سنجش کارایی فنی‌ـاقتصادی واحد AEMWE با توان ۲٫۱۶ گیگاوات، دو شاخص مستقل تعریف شده است: هزینه هم‌سطح ناخالص هیدروژن (LCOH gross) و هزینه هم‌سطح خالص هیدروژن (LCOH net).

هزینه هم‌سطح ناخالص هیدروژن، هزینه کل چرخه عمر را به ازای هر کیلوگرم هیدروژن بدون کسر درآمدهای جانبی نشان می‌دهد. رابطه ۲۲ صورت توسعه‌یافته رابطه ۱۰ است و بازیافت سالانه سرمایه، ارزش فعلی تعویض استک، برق مصرفی، آب خام و هزینه ثابت تعمیر و نگهداری را وارد می‌کند. ورودی‌ها عبارت‌اند از: هزینه نصب ۷۵۰ یورو بر کیلووات یا ۱٫۶۲ میلیارد یورو در ظرفیت ۲٫۱۶ گیگاوات، ضریب بازیافت سرمایه ۰٫۱۰۱۸۵، هزینه ثابت بهره‌برداری و نگهداری با رقم مندرج در مقاله «۲۹٫۱۶ یورو در سال» که واحد آن باید با صورت اصلی بررسی شود، تولید سالانه ۳۶۰ میلیون کیلوگرم H_2، مصرف ویژه ۴۸ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم، قیمت برق ۰٫۰۵۰ یورو بر کیلووات‌ساعت، آب ورودی ۱۱ کیلوگرم بر کیلوگرم H_2 و قیمت آب تصفیه‌شده ۰٫۰۰۱۵ یورو بر کیلوگرم یا ۱٫۵ یورو بر مترمکعب در واحد اسمز معکوس آب دریا و تصفیه نهایی فوق‌خالص. $LCOH_{gross} = CAPEX_{unit} \cdot P_{inst} \cdot CRF + OPEX_{fixed} + PV_{stack} \cdot CRF \; H_2 + SEC_{AEMWE} \cdot P_{elec} + (spec \cdot P_{water})$

LCOH_{gross}=(CAPEX_{unit}·P_{inst}·CRF+OPEX_{fixed}+PV_{stack}·CRF)/(ṁ_{H_{2}})+(SEC_{AEMWE}·P_{elec}

({)+(ω_{spec}·P_{water

اعتبار درآمد اکسیژن جانبی: در الکترولیز آب به ازای هر کیلوگرم هیدروژن، حدود ۷٫۹۴۶۷ کیلوگرم اکسیژن تولید می‌شود. رابطه ۲۳ درآمد اکسیژن به ازای هر کیلوگرم H را برابر حاصل‌ضرب این بازده در قیمت فروش واحد اکسیژن تعریف می‌کند. {{R O 2 = y O 2 · P O 2 R_{O_{2}}=y_{O_{2}}·P_{O_{2

هزینه هم‌سطح خالص هیدروژن، درآمد ناشی از فروش اکسیژن را به موازنه اضافه می‌کند. در رابطه ۲۴، هزینه بازیافت سرمایه، هزینه ثابت، برق ویژه و آب مصرفی جمع و اعتبار حاصل از تولید استوکیومتری اکسیژن در قیمت بازار از آن کسر می‌شود. این شاخص، هزینه اقتصادی مؤثر هیدروژن موردنیاز فولادسازی را نشان می‌دهد. L C O H n e t = C A P E X u n i t · P i n s t · C R F + O P E X f i x e d H 2 + S E C A E M W E · P e l e c + s p e c · P w a t e r - (y O 2 · P O 2)

LCOH_{net}=((CAPEX_{unit}·P_{inst}·CRF+OPEX_{fixed})/(ṁ_{H_{2}}))+(SEC_{AEMWE}·P_{elec})+(ω_{spec}·P_{w
({{ater})−(y_{O_{2}}·P_{O_{2

تفکیک LCOH ناخالص و خالص باعث می‌شود سهم کاهش هزینه ۱۳٫۷ درصدی ناشی از استفاده اقتصادی از محصول جانبی، در چارچوب H I-TEA شفاف باشد.

برای حفظ شفافیت روش، پژوهش توضیح می‌دهد معادلات بسته ۲۲ و ۲۴ صرفاً نمایش سالانه و ثابت هزینه هستند و برای راستی‌آزمایی مشتقات تحلیلی، مانند حساسیت LCOH به قیمت برق، به کار می‌روند. تمام ارقام پایه LCOH و LCOS در نتایج با موتور جریان نقدی پویای ProFAST حل شده‌اند تا هزینه‌ها دو بار تنزیل نشوند.

۲.۶. به‌کارگیری SciPy در محاسبات نقطه سربه‌سر و کاهش انتشار

برای سنجش برابری فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی با کوره‌بلند فسیلی، هزینه هم‌سطح فولاد سبز تعریف می‌شود. رابطه ۲۵، هزینه فرآوری پایه را با هزینه خوراک هیدروژن و بدهی مالیات کربن جمع می‌کند و هزینه تولید یک تن فولاد سبز را به دست می‌دهد. L C O S G r e e n = C b a s e , G r e e n + I H 2 · L C O H + (G r e e n · P c a r b o n)

LCOS_{Green}=C_{base,Green}+(I_{H_{2}}·LCOH)+(ε_{Green}·P_{carbon ({+

پارامتر هزینه پایه فرآوری غیرسوختی C_base,Green برابر ۴۳۶٫۴۰ یورو بر تن بر مبنای موازنه صنعتی پایین‌به‌بالای جرم و انرژی و مطالعات معتبر فولاد اروپا تعیین شده است. مصرف ۱٫۴۰ تن گندله مناسب احیای مستقیم برای هر تن فولاد و ۵۲۰ کیلووات‌ساعت برق کوره قوس بر تن، از داده‌های عملیاتی DRI-EAF گرفته شده‌اند. مصرف الکترود فوق‌توان ۱٫۸۰ کیلوگرم بر تن و سایش نسوز نیز با دستورالعمل‌های بهترین فناوری‌های موجود مرکز پژوهشی اتحادیه اروپا سازگارند. استهلاک سرمایه ۱۰۴ یورو بر تن مطابق ساختار سرمایه‌گذاری

طرح‌های صنعتی لحاظ شده است. جدول ۸ ریز هزینه‌ها را ارائه می‌کند. برای لحاظ‌کردن نوسان قیمت گندله و قراضه، هزینه پایه در مونت‌کارلو توزیع نرمال بریده با میانگین ۴۳۶٫۴، انحراف معیار ۱۵ و دامنه ۳۹۰ تا ۴۸۰ یورو بر تن دارد. [6، 43، 44، 143، 144، 40، 115]

جزء هزینه	مصرف ویژه	قیمت واحد	سهم هزینه (steel) EUR/t)	مبنای صنعتی
گندله سنگ‌آهن مناسب DRI [145]]	1.40 t	124.29 EUR/t	174	شاخص گندله DR شرکت S&P Global Platts
قراضه باکیفیت فولادی [146]	0.15 t	360 EUR/t	54	شاخص بازار قراضه آلمان BDSV
برق ذوب EAF [147]	520 kWh	0.050 EUR/kWh	26	تعرفه برق cPPA معادل 50 EUR/MWh
الکترود گرافیتی [6]	1.8 kg	8 EUR/kg	14.40	شاخص الکترود گرافیتی UHP
فرسودگی نسوز [143]	مبلغ تجمیعی	نرخ فرسایش	12	نقشه راه فناوری فولاد ESTEP
افزودنی سرباره و آهک [148]	65 kg	0.15 EUR/kg	10	میانگین بازار آهک و دولومیت EAF
نیروی انسانی و هزینه عملیاتی ثابت [6,40,115,143]	مستقیم و غیرمستقیم	هزینه عمومی کارخانه	42	شاخص‌های دستمزد صنعتی اروپا
سرمایه کوره شفت و قوس الکتریکی [42,43,115,143]	استهلاک CAPEX	WACC برابر 8% طی 20 سال	104	CAPEX ساخت کلیددردست DRI-EAF
جمع کل هزینه پایه (Cbase,Green)	—	—	436.40	مقدار مبنای محاسبه

در این معادلات، P_carbon قیمت مجوز انتشار در EU ETS با مقدار پایه ۷۹ یورو بر تن CO و Green_ شدت انتشار باقیمانده برابر ۰٫۲۰ تن CO بر تن فولاد است. هزینه انطباق مقرراتی هر مسیر در رابطه ۲۶ از ضرب شدت انتشار ویژه مسیر تولید در قیمت روز مجوزهای کربن محاسبه می‌شود و به شکل هزینه عملیاتی متغیر بر فولادسازی اثر می‌گذارد. $\mathrm{Regulatory\ Carbon\ Liability} = \mathrm{route} \cdot \mathrm{Pcar}\mathrm{bon\ (EUR/t\ steel)}$ $\mathrm{RegulatoryCarbonLiability} = \varepsilon_{\mathrm{route}} \cdot P_{\mathrm{carbon}} (\mathrm{EUR/tsteel})$

در سناریوی قطعی، قیمت پایه کربن ۷۹ یورو بر تن CO انتخاب شده و در ۱۰ هزار تکرار مونت‌کارلو با توزیع نرمال بریده دارای میانگین ۷۹ و انحراف معیار ۱۵ تغییر می‌کند. در این سطح قیمت، جریمه کربن برای BF-BOF با انتشار ۱٫۸۰ تن، ۱۴۲٫۲۰ یورو بر تن فولاد و برای احیای مستقیم زغال‌سنگی با انتشار ۲٫۱۰ تن، ۱۶۵٫۹۰ یورو است. در مقابل، مسیر هیدروژنی سبز با انتشار ۰٫۲۰ تن تنها ۱۵٫۸۰ یورو هزینه کربن می‌پردازد. در مجتمع ۶ میلیون تنی تارانتو، کاهش ۸۸٫۹ درصدی انتشار معادل جلوگیری از ۹٫۶۰ میلیون تن CO در سال و

صرفه‌جویی تقریبی ۷۵۸٫۴۰ میلیون یورو در پرداخت کربن است. آستانه برابری هزینه نیز با قیمت کربن بیش از ۶۸٫۵۴ یورو بر تن حاصل می‌شود.

طبق ISO 14044، مرز ارزیابی «دروازه تا دروازه» از دریافت گندله سنگ‌آهن و آب تا تخلیه فولاد مذاب و پوسته ریخته‌گری پیوسته گسترده است. واحد کارکردی، یک تن فولاد خام مذاب تعریف می‌شود. شدت انتشار مسیر سبز به دو بخش انتشار مستقیم شیمیایی دامنه ۱ و انتشار غیرمستقیم برق و انرژی دامنه ۲ تفکیک می‌شود؛ مطابق رابطه ۲۷ حاصل جمع ۰٫۰۸ و ۰٫۱۲ برابر ۰٫۲۰ تن CO بر تن فولاد است. $Green = Scope1 + Scope2 = 0.08 + 0.12 = 0.20\ t\ CO_2 / t\ steel$

$$\varepsilon_{Green}=\varepsilon_{Scope1}+\varepsilon_{Scope2}=0.08+0.12=0.20 tCO_{2}/tsteel$$

در این مرز، انتشار مستقیم ۰٫۰۸ تن CO بر تن عمدتاً از مصرف الکترود گرافیتی کوره قوس و فلاکس‌های سرباره ناشی می‌شود. انتشار غیرمستقیم ۰٫۱۲ تن نیز به متعادل‌سازی برق شبکه، مصرف کمکی کارخانه، مایع‌سازی اکسیژن، پمپاژ نمک‌زدایی و تلفات انتقال نسبت داده می‌شود. قرارداد cPPA سازگار با RED II و متکی به گواهی مبدأ، اثر کربنی ترکیب باقیمانده برق شبکه ایتالیا با ضریب ۰٫۲۳۰ کیلوگرم معادل CO بر کیلووات‌ساعت را کاهش می‌دهد. در نتیجه ردپای نهایی فولاد سبز ۰٫۲۰ تن است، درحالی‌که مقدار متناظر چرخه مرسوم BF-BOF در مقایسه مورد اشاره حدود ۱٫۸۵ تن CO بر تن است.

.1

ردپای مستقیم دامنه ۱ با مقدار ۰٫۰۸ تن CO بر تن فولاد، از استوکیومتری سه مسیر واکنشی اصلی درون کوره برآورد شده است:

- اکسایش الکترود: مصرف ۱٫۸۰ کیلوگرم الکترود فوق‌توان در هر تن فولاد، ضربدر ضریب ۳٫۶۶۷ تن CO بر تن کربن، برابر ۰٫۰۰۶۶ تن CO بر تن فولاد.
- بازکربوره‌سازی حمام و کربن سرباره پفکی: ۱۵ کیلوگرم کربن در هر تن فولاد با ضریب ۳٫۶۶۷ تن CO بر تن کربن، برابر ۰٫۰۵۵۰ تن CO بر تن فولاد.
- کلسیناسیون آهک و دولومیت: تجزیه حرارتی ۶۵ کیلوگرم فلاکس در هر تن فولاد، معادل انتشار ۰٫۰۱۸۴ تن CO بر تن فولاد.

.2

ردپای غیرمستقیم دامنه ۲ با مقدار ۰٫۱۲ تن CO بر تن، اثر متعادل‌سازی تولید برق بیرون کارخانه را طبق

الزامات RED II/III نشان می‌دهد. اگرچه برق اصلی AEMWE از قرارداد تجدیدپذیر تأمین می‌شود، جبران نوسان برق کوره قوس با مصرف ۵۲۰ کیلووات‌ساعت بر تن و تجهیزات کمکی، با ضریب انتشار مؤثر ۰٫۲۳۰ کیلوگرم CO بر کیلووات‌ساعت، این مقدار انتشار را ایجاد می‌کند.

با جمع دامنه‌های ۱ و ۲، شدت انتشار مسیر سبز ۰٫۲۰ تن CO بر تن تأیید می‌شود. بر پایه نرخ EU ETS مورد استفاده در پژوهش، هزینه کربن از ۱۴۲٫۲۰ یورو بر تن فولاد برای BF-BOF با شدت ۱٫۸۰ تن انتشار، به تنها ۱۵٫۸۰ یورو در مسیر سبز کاهش می‌یابد.

هزینه پایه ۴۳۶٫۴۰ یورو بر تن برای مسیر DRI-EAF شامل گندله ۱۷۴ یورو، قراضه ۵۴ یورو، برق کوره قوس ۲۰ یورو و هزینه‌های الکترود گرافیتی، نسوز، فلاکس، نیروی انسانی و تعمیر و نگهداری در مجموع ۱۸۸٫۴۰ یورو است. LCOH خالص از ProFAST برحسب یورو بر کیلوگرم و Green_ از شدت انتشار باقی‌مانده برق و فرآوری به دست می‌آیند.

برای شناسایی حد دقیق امکان رقابت در بازار، الگوریتم `fsolve` از SciPy نرخ برق را پیوسته تغییر می‌دهد تا هزینه هم‌سطح فولاد سبز با هزینه مسیر BF-BOF پس از مالیات کربن برابر شود. در گام بعد، هزینه خالص اجتناب از هر تن CO با حذف اثر مالیات کربن از هزینه‌های فرآوری محاسبه می‌شود؛ بنابراین اضافه‌هزینه فیزیکی فولاد سبز نسبت به کوره‌بلند مستقل از ابزار مقرراتی به دست می‌آید. رابطه ۲۸ این هزینه را از اختلاف هزینه فرآوری و خوراک هیدروژن نسبت به BF-BOF، تقسیم بر اختلاف شدت انتشار دو مسیر، محاسبه می‌کند. $$C_{abate} = (C_{base,Green} + Cost_{H_2} - C_{base,BF}) / (\epsilon_{BF} - \epsilon_{Green})$$

۲.۷. چارچوب احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو

برای کمی‌سازی نظام‌مند ریسک مالی در بازار متلاطم و ارزیابی عدم‌قطعیت مدل قطعی، یک موتور شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰ هزار تکرار به H I-TEA افزوده شده است. به‌جای اتکا به مقادیر پایه تک‌نقطه‌ای، پارامترهای عملیاتی، فنی، ترمودینامیکی و بازار به‌صورت متغیرهای احتمالی نرمال با کران‌های منطبق بر شرایط واقعی صنعت نمونه‌گیری می‌شوند.

بردار ورودی تصادفی شامل هفت پارامتر مستقل مدل است:

- تعرفه عمده‌فروشی برق: توزیع نرمال با میانگین ۵۰ و انحراف معیار ۱۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، محدود به ۳۰ تا ۸۰ یورو، برای نمایش نوسان قرارداد خرید برق بلندمدت.

- هزینه سرمایه‌ای الکترولایزر: توزیع نرمال با میانگین ۷۵۰ و انحراف معیار ۱۲۵ یورو بر کیلووات،

محدود به ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ یورو، برای نمایش منحنی یادگیری فناوری.

- مصرف ویژه انرژی استک: توزیع نرمال با میانگین ۴۸ و انحراف معیار ۲ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم H، محدود به ۴۲ تا ۵۶، برای لحاظ‌کردن تفاوت بازده سلول‌های AEMWE.

- مصرف ویژه هیدروژن در احیا: توزیع نرمال با میانگین ۶۰ و انحراف معیار ۳ کیلوگرم H بر تن فولاد، محدود به ۵۰ تا ۷۵، برای بررسی بازده مصرف شیمیایی در کوره شفت.

- قیمت مجوز کربن EU ETS: توزیع نرمال با میانگین ۷۹ و انحراف معیار ۱۵ یورو بر تن CO، محدود به ۴۰ تا ۱۳۰ یورو، برای بازتاب نوسان سیاست و بازار کربن.

- قیمت عمده‌فروشی اکسیژن صنعتی: توزیع نرمال با میانگین ۵۰ و انحراف معیار ۱۵ یورو بر تن O، محدود به صفر تا ۱۰۰ یورو، برای شبیه‌سازی خطر اشباع بازار محصولات جانبی.

- هزینه پایه فرآوری در کوره قوس: توزیع نرمال با میانگین ۴۳۶٫۴ و انحراف معیار ۱۵ یورو بر تن فولاد، محدود به ۳۹۰ تا ۴۸۰ یورو، برای اثر تغییر قیمت قراضه و گندله.

در هر تکرار مونت‌کارلو از ۱ تا ۱۰ هزار، موتور برداری هزینه خالص هیدروژن، هزینه فولاد سبز و هزینه متناظر فولاد سنتی BF-BOF با مالیات کربن را محاسبه می‌کند. شاخص نرخ پیروزی رقابت بازاری (W) احتمال تجربی ارزان‌ترشدن فولاد سبز از مسیر فسیلی است و در رابطه ۲۹ به‌صورت نسبت دفعات پیروزی به کل ۱۰ هزار اجرا تعریف شده است. تابع شاخص برای هر اجرای ارزان‌ترشدن سبز مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌گیرد. برای تعیین سهم هر ورودی در پراکندگی کل هزینه، ضریب هم‌بستگی خطی پیرسون نیز در همه تکرارها محاسبه می‌شود. $$w = \frac{1}{10{,}000} \sum_{k=1}^{10{,}000} I\left(LCOS_{Green,k} < LCOS_{BF-BOF,k}\right) \times 100\%$$

$$w=[(1)/(10{,}000)\sum_{k=1}^{10{,}000} I(LCOS_{Green,k}<LCOS_{BF-BOF,k})]\times 100\%$$

پلتفرم H I-TEA صرفاً یک ماشین‌حساب مالی مستقل نیست، بلکه مجموعه‌ای یکپارچه برای مدل‌سازی فرایند، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی تصادفی است. درحالی‌که ابزارهایی مثل ProFAST به‌تنهایی جریان نقدی تنزیل‌شده را با ورودی‌های دستی کاربر محاسبه می‌کنند، این پژوهش ProFAST را زیرروال مالی در معماری محاسباتی گسترده‌تر چهارلایه قرار می‌دهد تا متغیرهای مهندسی و مالی بازخورد متقابل داشته باشند.

- لایه ۱ ـ موتور فرایند الکتروشیمیایی و موازنه جرم: موازنه‌های غیرخطی انرژی و جرم واحد AEMWE در مقیاس گیگاوات را حل می‌کند. تقسیم توان ۲٫۱۶ گیگاوات به ۱٫۹۹ گیگاوات برای استک و ۰٫۱۷

گیگاوات برای تجهیزات جانبی، مصرف ویژه ۴۸ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم هیدروژن، ورود آب خام به مقدار ۴۹۵ هزار کیلوگرم در ساعت با ضریب ۱۱، جبران محلول KOH یک‌درصد وزنی به مقدار ۹۹۰۰ کیلوگرم در ساعت و تولید اکسیژن استوکیومتری ۳۵۷,۶۰۰ کیلوگرم در ساعت به‌صورت پویا مدل می‌شوند.

- لایه ۲ ـ اتصال متالورژی بالادست و پایین‌دست: تولید سوخت را مستقیماً به فلوشیت فولادسازی اولیه مرتبط می‌کند. هیدروژن در مخزن بافر فشاربالای ۳۵ بار با ظرفیت ۵۴۰ تن و پشتیبانی ۱۲ ساعت ذخیره می‌شود تا تغذیه پیوسته ۴۵ هزار کیلوگرم بر ساعتِ مجتمع H -DRI-EAF با تولید سالانه ۶ میلیون تن فولاد تارانتو حفظ شود.

- لایه ۳ ـ موتور بهینه‌سازی و برابری هزینه SciPy: با حل عددی، شرایط برابری اقتصادی مسیرهای سنتی BF-BOF و کم‌انتشار H -DRI-EAF را تعیین می‌کند. خروجی این لایه، سطوح سربه‌سر چندمتغیره و آستانه‌های کلیدی، از جمله قیمت کربن ۶۸٫۵۴ یورو بر تن CO و حداکثر تعرفه برق ۵۲٫۴۰ یورو بر مگاوات‌ساعت است.

- لایه ۴ ـ موتور مونت‌کارلو با ۱۰ هزار اجرا: توزیع‌های نرمال بریده هفت متغیر کلیدی اقتصاد کلان و عملیات، شامل قیمت برق و کربن، CAPEX، هزینه پایه فولاد سبز، آب، WACC و قیمت اکسیژن را هم‌زمان نمونه‌گیری می‌کند. این لایه تابع‌های توزیع تجمعی و احتمال‌های رقابت را تولید می‌کند. در توصیف این قسمت از منبع، احتمال ارزان‌ترشدن فولاد سبز از کوره‌بلند تحت وضعیت EU ETS برابر ۸۲٫۴ درصد گزارش شده است؛ این رقم با ۶۱٫۹ درصد درج‌شده در چکیده و نتایج اصلی یکسان نیست و هنگام استفاده از داده‌ها باید تفاوت سناریوها بررسی شود.

در نتیجه H I-TEA، یک هسته مالی جریان نقدی تنزیل‌شده را درون مدل‌سازی چندفیزیکی فرایند، پیوند متالورژیکی، بهینه‌سازی نقطه سربه‌سر و تحلیل ریسک تصادفی قرار می‌دهد تا ارزیابی کربن‌زدایی صنعتی از ابتدا تا انتها یکپارچه باشد.

۲.۸. مرزبندی ارزیابی و بررسی شاخص‌های محیط‌زیستی

اگرچه مدل اصلی انتشار معادل CO بر تن فولاد را بر مبنای پتانسیل گرمایش جهانی صدساله (GWP100) و مرز دروازه تا دروازه بهینه می‌کند، ارزیابی فولادسازی هیدروژنی گیگاواتی مستلزم توجه به پیامدهای زیست‌محیطی دیگر است. جدول ۹ ماتریس چندشاخصی ردپای محیط‌زیستی مجتمع تارانتو را ارائه می‌کند.

شاخص محیط‌زیستی	واحد به‌ازای هر تن فولاد مذاب	مبنای H I-TEA	مبنای BF-BOF	علت / راهکار کاهش اثر
شدت انتشار مستقیم دامنه 1	tCO /t steel	0.08	1.80	کف‌سازی سرباره با زیست‌کربن و احیای 100% هیدروژنی
شدت انتشار غیرمستقیم دامنه 2	tCO /t steel	0.12	0.25	برق cPPA تثبیت‌شده؛ هدف انتشار 20 gCO /kWh اتحادیه اروپا 2030
مصرف خالص آب عملیاتی	m³ H O/t steel	0.66 با SWRO یا 0.10 با ZLD	1.80	اسمز معکوس ساحلی؛ بازیابی 85% آب بلودان با ZLD
مساحت اشغال کارخانه	m²/t steel	0.12	0.45	جانمایی فشرده استک AEMWE و سالن EAF
مساحت زمین برق تجدیدپذیر بالادست	m²/t steel	18.50	0.05	خورشیدی 12 m² و بادی 6.5 m² در بیرون سایت
تقاضای ویژه کل برق	kWh/t steel	3400	450	الکترولیز 2880 و ذوب EAF برابر 520 kWh
مصرف فلزات گروه پلاتین	g Ir/t steel	0.00	0.00	کاتالیزور فراوان Ni/Fe و بی‌نیازی از PGM

طبق این غربالگری، گذار از BF-BOF به مسیر سبز H -DRI-EAF شدت کربن «دروازه تا دروازه» را از ۲٫۱۰ به ۰٫۲۰ تن CO بر تن، یعنی ۸۹٫۸ درصد، و برداشت مستقیم آب فرایندی را از ۱٫۸۰ به ۰٫۶۶ مترمکعب بر تن، یعنی ۶۳٫۳ درصد، کاهش می‌دهد. در مقابل تقاضای برق بالادست از ۴۵۰ به ۳۴۰۰ کیلووات‌ساعت بر تن می‌رسد، یعنی ۶۵۵٫۶ درصد افزایش؛ به‌این‌ترتیب بخشی از بار محیط‌زیستی به اشغال زمین نیروگاه‌های تجدیدپذیر، حدود ۱۸٫۵۰ مترمربع بر تن، منتقل می‌شود. نویسندگان تأکید می‌کنند مقایسه سناریوهای اقتصادی ادامه مقاله صرفاً بر هزینه جلوگیری از گرمایش جهانی (GWP100) متمرکز است.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. تولید هیدروژن با AEMWE برای فولاد سبز

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند تأمین ۳۶۰ هزار تن هیدروژن در سال برای مجموعه فولاد تارانتو به زیرساختی بسیار بزرگ نیاز دارد. سامانه با ۸۰۰۰ ساعت کار سالانه و ضریب ظرفیت ۹۱٫۳ درصد، ۴۵ هزار کیلوگرم هیدروژن در ساعت تولید می‌کند و هم‌زمان طبق این مجموعه محاسبات، حدود ۳۵۷٫۱۵۱ کیلوگرم اکسیژن در ساعت یا ۲٫۸۵۷٫۲۰۶ تن در سال محصول جانبی به دست می‌آید. برق موردنیاز ۲٫۱۶ گیگاوات، شامل ۱٫۹۹ گیگاوات توان الکتروشیمیایی و ۰٫۱۷ گیگاوات تجهیزات جانبی است. با مصرف ویژه ۴۸ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم هیدروژن، بازده بر اساس ارزش حرارتی بالای سوخت (HHV) به ۸۲٫۱ درصد می‌رسد. در این گزارش از نتایج، مصرف آب

پایدار ۴۴۲٫۳ تن در ساعت محاسبه شده که حدود ۱۰ درصد بیش از حداقل ترمودینامیکی ۴۰۲٫۱ تن در ساعت است و برای حفظ محلول KOH یک‌درصد وزنی، ۹۹۰۰ کیلوگرم در ساعت آب رقیق‌سازی نیز ذکر شده است. این ارقام در سایر بخش‌های مقاله با مفروضات دیگری از تلفات آب ارائه شده‌اند؛ بنابراین کاربرد مهندسی آن‌ها نیازمند تطبیق سناریوست.

در بیان دوم نتایج، توان ثابت ۲٫۱۶ گیگاوات بین استک (۱٫۹۹ گیگاوات، ۹۲٫۲ درصد) و تجهیزات جانبی (۰٫۱۷ گیگاوات، ۷٫۸ درصد)، شامل تلفات ترانسفورماتور، گردش الکترولیت، پمپاژ آب خالص و تراکم مخزن ۳۵ بار، تقسیم می‌شود. با SEC برابر ۴۸ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم هیدروژن، بازده HHV استک ۸۲٫۱ درصد و ۸۰۰۰ ساعت کار سالانه، تولید پیوسته ۴۵ هزار کیلوگرم هیدروژن در ساعت یا ۳۶۰ هزار تن در سال حاصل می‌شود. محصول جانبی این محاسبه ۳۵۷,۶۰۰ کیلوگرم اکسیژن در ساعت یا ۲,۸۶۰,۸۰۰ تن در سال است. برای حفظ غلظت KOH یک‌درصد، آب خام ورودی ۴۹۵ هزار کیلوگرم در ساعت، معادل ۴۹۵ مترمکعب در ساعت یا ۳٫۹۶ میلیون تن در سال، فرض شده است؛ یعنی ۱۱ کیلوگرم آب به ازای هر کیلوگرم هیدروژن، شامل ۸٫۹۴ کیلوگرم نیاز استوکیومتری و حدود ۲۳ درصد افزوده عملیاتی برای تخلیه آب نمک‌زدایی و تبخیر خنک‌کن. جدول ۱۰ ورودی‌ها و بازده‌های عملیات را بیان می‌کند.

پارامتر	مقدار / توضیح
توان الکتریکی کل سامانه	2.16 GW؛ استک 1.99 GW (92.2%) و تجهیزات جانبی 0.17 GW (7.8%)
بازده کل استک بر پایه HHV	82.1%؛ بر اساس HHV هیدروژن برابر 39.41 kWh/kg
مصرف ویژه انرژی SEC	48 kWh/kg H
نرخ تولید هیدروژن	45,000 kg H /h؛ در متن جدول منبع رابطه «21,600,000 kWh/kg = 48 kW / 45,000 t/h» آمده است که مقدار و واحدهایش ناسازگار است
تولید سالانه هیدروژن	360,000 t/yr
ساعات کار سالانه	8000 h
ضریب ظرفیت مؤثر	91.3%
مصرف استوکیومتری آب	402,120 kg/h
آب رقیق‌سازی الکترولیت KOH با غلظت وزنی 1%	9900 kg/h
آب خام ورودی	495,000 kg/h؛ ضریب آب 11 (8.94 kg/kg H استوکیومتری و 23% مازاد برای بلودان/خنک‌کاری)
اکسیژن جانبی در ساعت	357,600 kg/h؛ نسبت استوکیومتری 7.9467 kg O /kg H
اکسیژن جانبی در سال	2,860,800 t/yr؛ حاصل 357,600 kg/h × 8000 h/yr

۳.۲. تحلیل حساسیت هزینه هم‌سطح هیدروژن و فولاد سبز

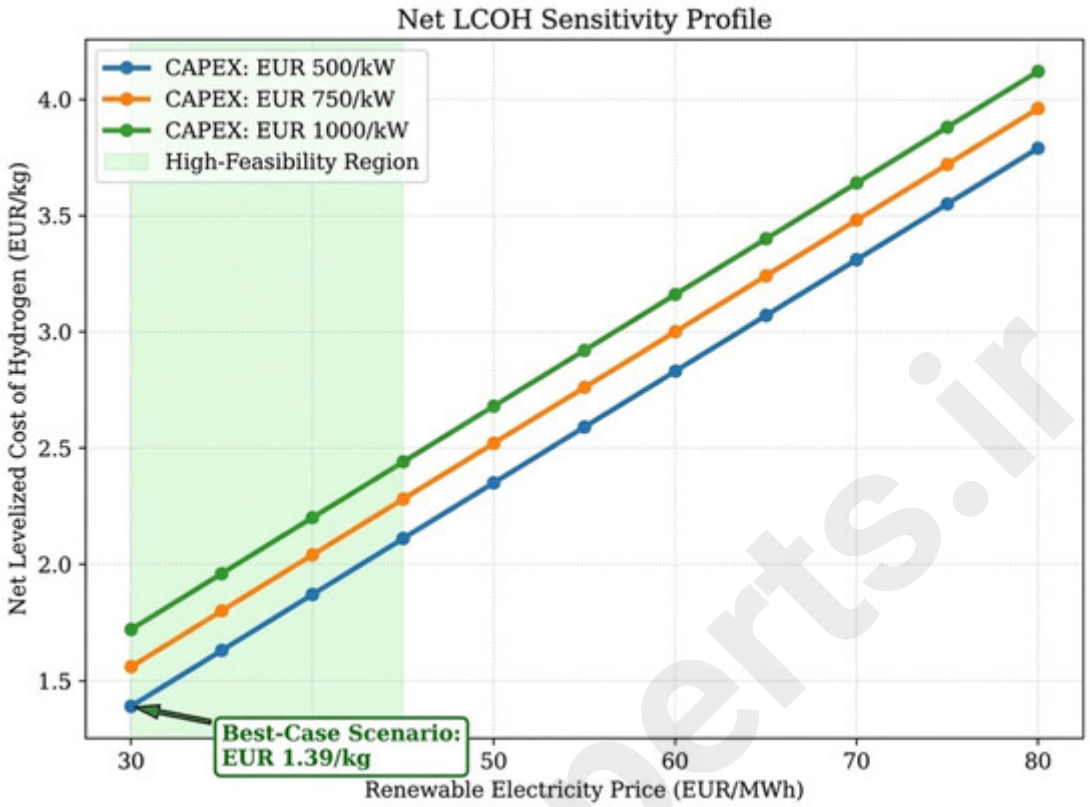
دو متغیر حساسیت اصلی، هزینه سرمایه‌ای سامانه AEMWE و تعرفه برق تجدیدپذیر انتخاب شده‌اند؛ زیرا بیش از ۹۰ درصد تغییرات هزینه تولید هیدروژن سبز را کنترل می‌کنند. در قیمت برق ۵۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، برق مصرفی حدود ۸۶٫۹ درصد هزینه خالص هیدروژن را شکل می‌دهد و در مقابل سرمایه استک و تجهیزات جانبی سهم استهلاک دارایی ثابت را تعیین می‌کند. دامنه‌های تحلیل بر اساس قراردادهای صنعتی واقعی و روند بلوغ فناوری تنظیم شده‌اند:

- دامنه تعرفه برق ۳۰ تا ۸۰ یورو بر مگاوات‌ساعت: کران پایین ۳۰ یورو، نیروگاه‌های اختصاصی بادی و خورشیدی ارزان و خارج از شبکه را نمایندگی می‌کند؛ مقدار پایه ۵۰ یورو با متوسط قراردادهای صنعتی مورد استفاده مقاله سازگار است و کران بالای ۸۰ یورو، نوسان قیمت لحظه‌ای و هزینه موازنه شبکه را پوشش می‌دهد.

- دامنه CAPEX الکترولایزر ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ یورو بر کیلووات: سقف ۱۲۰۰ یورو هزینه استقرار تجاری اولیه فناوری AEMWE و کف ۴۰۰ یورو مزیت تولید انبوه پس از بلوغ را نمایش می‌دهد؛ مقدار مرجع برای آرایه‌های استک گیگاواتی ۷۵۰ یورو بر کیلووات تعیین شده است. در یک تیتر از متن انگلیسی واحد MWh آمده، اما پارامتر سرمایه‌ای در محاسبات با kW سنجیده می‌شود.

آرایش قرارداد تأمین برق: برای کار پایدار سالانه ۸۰۰۰ ساعت، با ضریب ظرفیت ۹۱٫۳ درصد، و جلوگیری از چرخه حرارتی کوره احیا، برق از قرارداد خرید فیزیکی شرکتی با پشتوانه شبکه و نرخ پایه ۵۰ یورو بر مگاوات‌ساعت تهیه می‌شود. منابع اصلی برق نیروگاه‌های خورشیدی بزرگ و بادی هستند و افت کوتاه‌مدت تولید از موازنه توان شبکه جبران می‌شود.

شکل ۷ نشان می‌دهد هزینه خالص هم‌سطح هیدروژن در برابر تغییر قیمت برق بین ۳۰ تا ۸۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، برای سه سناریوی سرمایه‌گذاری ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ یورو بر کیلووات چگونه تغییر می‌کند. رابطه‌ای تقریباً خطی به دست آمده است که از عملکرد استک AEMWE ناشی می‌شود. مشتق مرتبه اول LCOH نسبت به قیمت برق، ثابت ۰٫۰۴۸ یورو بر کیلوگرم هیدروژن به ازای تغییر یک یورو بر مگاوات‌ساعت است. این شیب مستقیماً از SEC برابر ۴۸ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم حاصل می‌شود و در معادله ۳۰ با تقسیم SEC بر هزار بیان شده است. [140] $\partial \mathrm{LCOH}/\partial P_{\mathrm{elec}} = \mathrm{SEC} \cdot 10^{-3} = 48 \cdot 10^{-3} = 0.048 \ \mathrm{EUR/kg} \,/\, (\mathrm{EUR/MWh})$



شکل 7. حساسیت هزینه هم‌سطح خالص هیدروژن به قیمت برق در سه سناریوی CAPEX الکترولایزر AEMWE. منبع: Soomro، Gambelli و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

بنابراین هر تغییر ۵ یورویی در قیمت یک مگاوات‌ساعت برق پاک، در هر سه سناریوی سرمایه‌گذاری، هزینه خالص هیدروژن را به‌اندازه ۰٫۲۴ یورو بر کیلوگرم جابه‌جا می‌کند.

۳.۲.۱. هزینه سرمایه‌گذاری و مرزهای بهینه‌سازی

اگرچه هزینه عملیاتی وابسته به برق، عامل غالب در اقتصاد بلندمدت است، سرمایه اولیه احداث واحد ۲٫۱۶ گیگاواتی AEMWE کف مهمی برای استهلاک سالانه و حداقل هزینه تولید ایجاد می‌کند.

- سناریوی پایه: با CAPEX برابر ۷۵۰ یورو بر کیلووات و برق ۵۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، مدل H2I-TEA هزینه خالص هیدروژن را ۲٫۵۲ یورو بر کیلوگرم محاسبه می‌کند. در این نقطه، بازیافت سرمایه سالانه و تعمیرات ثابت تا حدی با درآمد گزارش‌شده حدود ۱۴۲٫۸۵ میلیون یورو در سال از اکسیژن جانبی به قیمت ۵۰ یورو بر تن جبران می‌شوند.

- سناریوی بهینه: در پایین‌ترین محدوده بررسی‌شده، یعنی سرمایه‌گذاری ۵۰۰ یورو بر کیلووات و برق ۳۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، LCOH به ۱٫۳۹ یورو بر کیلوگرم و LCOS فولاد سبز به حداقل ۵۳۵٫۸۱ یورو بر تن می‌رسند.

- مرز پرریسک: افزایش سرمایه تا ۱۰۰۰ یورو بر کیلووات همراه برق گران ۸۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، LCOH را به ۴٫۱۲ یورو بر کیلوگرم می‌رساند و حساسیت شدید پروژه به زنجیره تأمین انرژی را نشان می‌دهد.

- پیوند اصلی پایین‌دستی این است که کوره شفت برای هر تن فولاد، ۶۰ کیلوگرم هیدروژن نیاز دارد. در نتیجه هر تغییر یک یورویی در قیمت یک کیلوگرم هیدروژن، مستقیماً هزینه نهایی فولاد را دقیقاً ۶۰ یورو بر تن تغییر می‌دهد. این رابطه، نوسان‌های شکل ۷ را به قیمت محصول فولادی منتقل می‌کند.

۳.۲.۲. مقایسه حساسیت پارامترهای فنی و اقتصادی

برای قرار دادن نمودارهای ۸ و ۹ در زمینه کامل فلوشیت، جدول ۱۱ حدهای مرزی محاسبه‌شده و آثار اقتصادی پایین‌دستی آن‌ها را خلاصه می‌کند.

سناریوی عملکرد	فرض مستقل	LCOH خالص (EUR/kg H)	LCOS سبز (EUR/t)	ارزیابی ساختار هزینه
سناریوی بهینه مطلوب	CAPEX برابر EUR/kW 500 و برق EUR/MWh 30	1.39	535.81	کمترین هزینه در مرز فرضیات
بدون درآمد اکسیژن	قیمت اکسیژن EUR/t 0	2.91	627.07	هزینه حذف اعتبار محصول جانبی
سناریوی پایه	CAPEX برابر EUR/kW 750 و برق EUR/MWh 50	2.52	603.26	نقطه مرجع پایه
فروش اکسیژن با قیمت بالا	قیمت اکسیژن EUR/t 100	2.12	579.46	بیشترین اعتبار هم‌افزایی صنعتی
سرمایه‌گذاری و انرژی پرهزینه	CAPEX برابر EUR/kW 1000 و برق EUR/MWh 80	4.12	699.51	سقف بالایی ریسک مالی

همان‌طور که شکل ۷ نشان می‌دهد، CAPEX و قیمت برق بیش از ۹۰ درصد تغییرات LCOH را تعیین می‌کنند. دامنه ۳۰ تا ۸۰ یورو بر مگاوات‌ساعت انواع قراردادهای خرید برق صنعتی اروپا را پوشش می‌دهد و دامنه سرمایه‌گذاری ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ یورو بر کیلووات در شکل ۹، هزینه‌های پایلوت فعلی و چشم‌انداز کاهش هزینه فناوری را دربرمی‌گیرد. برق پشتیبان شبکه در قرارداد cPPA با نرخ پایه ۵۰ یورو، تداوم کار ۸۰۰۰ ساعته کوره احیا را تأمین می‌کند.

شکل ۸ پویایی برابری هزینه فولاد سبز H -DRI-EAF و کوره‌بلند متعارف را در برابر قیمت برق نشان می‌دهد.

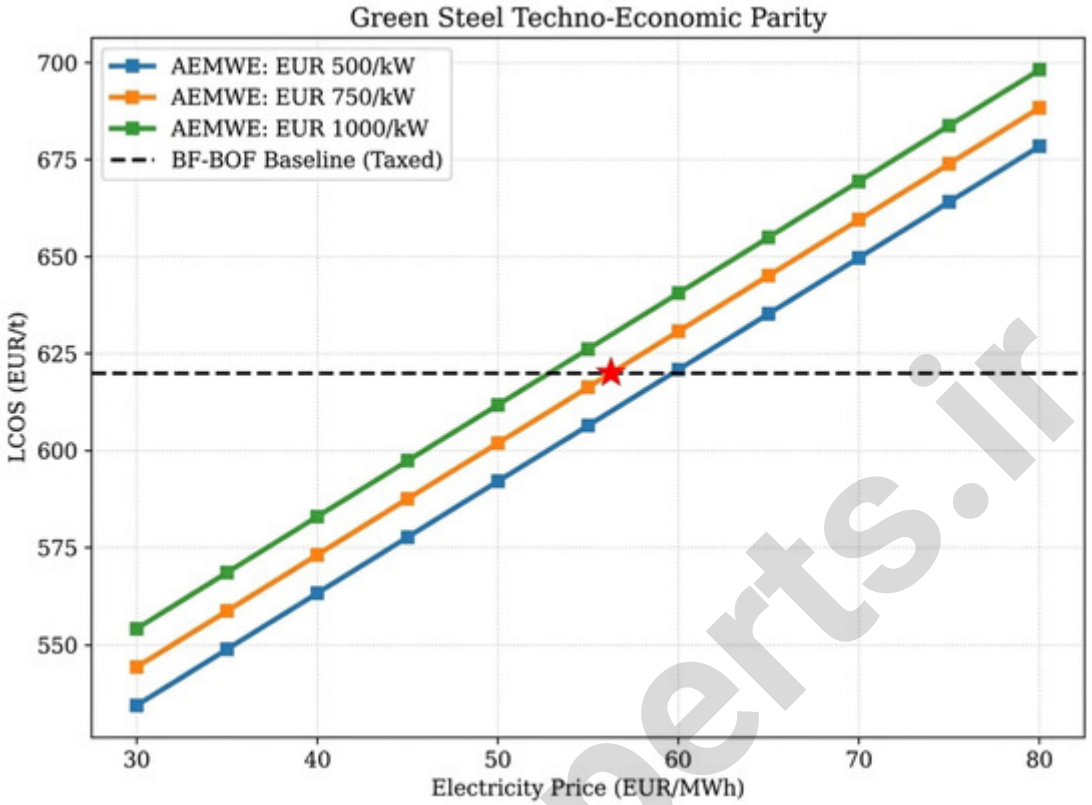
هزینه فولاد در دامنه تعرفه ۳۰ تا ۸۰ یورو برای CAPEX سه‌گانه ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ یورو بر کیلووات ترسیم شده و با هزینه مرجع BF-BOF پس از مالیات کربن، یعنی ۶۲۰ یورو بر تن، مقایسه می‌شود. نقطه تقاطع سناریوی اصلی با ستاره قرمز در نزدیکی تعرفه ۵۵٫۸۱ یورو نشان داده شده است.

شیب تقریباً یکنواخت شکل ۸ نشان می‌دهد هر افزایش یک یورو در قیمت برق بر مگاوات‌ساعت، هزینه فولاد سبز را حدود ۲٫۸۸ یورو بر تن بالا می‌برد. ستاره قرمز نقطه‌ای را مشخص می‌کند که با سرمایه ۷۵۰ یورو بر کیلووات و قیمت برق کمتر از ۵۵٫۸۱ یورو، فولاد سبز از کوره‌بلند ارزان‌تر می‌شود. کاهش CAPEX به ۵۰۰ یورو، سقف رقابت‌پذیری قیمت برق را به ۵۹٫۲۳ یورو می‌رساند؛ اما در CAPEX برابر ۱۰۰۰ یورو، برای رقابت با مسیر فسیلی به برق ۵۲٫۳۹ یورو بر مگاوات‌ساعت یا ارزان‌تر نیاز است.

شکل ۹ نقشه حرارتی حساسیت دو متغیر قیمت برق و هزینه سرمایه AEMWE را در گستره ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ یورو بر کیلووات نمایش می‌دهد. گرادیان عددی نشان می‌دهد اثر برق بسیار بیشتر از سرمایه است: هر افزایش ۵ یورو بر مگاوات‌ساعت در تعرفه، هزینه فولاد را حدود ۱۴ یورو بر تن افزایش می‌دهد، درحالی‌که کاهش قابل‌توجه ۱۰۰ یورو بر کیلووات در CAPEX تنها حدود ۴ یورو بر تن صرفه‌جویی دارد. بنابراین راهبرد تأمین برق پایدار و بهبود بازده عملیاتی از قیمت اولیه تجهیزات مهم‌تر است.

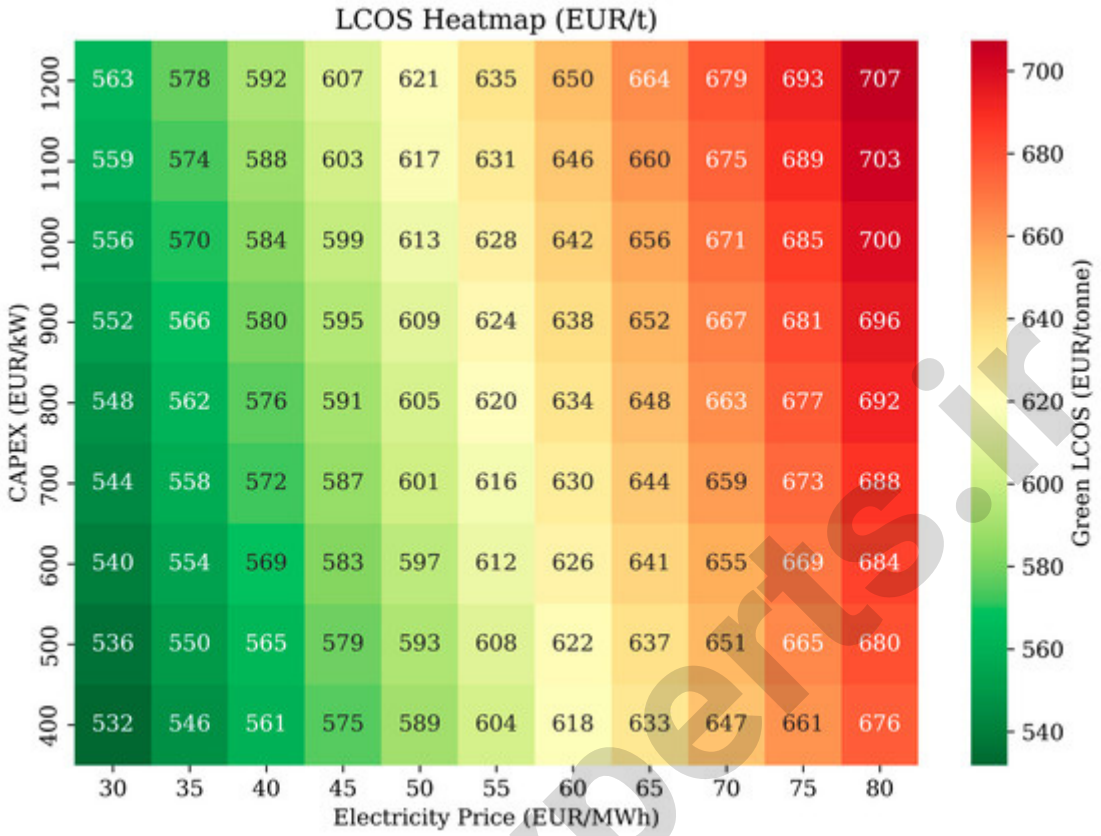
تغییر رنگ نقشه حرارتی، ناحیه اقتصادی لازم برای رقابت با هزینه مرجع کوره‌بلندِ پس از مالیات، یعنی ۶۲۰ یورو بر تن، را مشخص می‌کند. مرز برابری به‌صورت مورب از ماتریس می‌گذرد: حتی CAPEX بالای ۱۲۰۰ یورو بر کیلووات در صورت برق ۵۰ یورو یا کمتر قابل‌تحمل است و LCOS نزدیک ۶۲۱ یورو حاصل می‌شود. در CAPEX برابر ۸۰۰ یورو، نقطه سربه‌سر در برق ۵۵ یورو بر مگاوات‌ساعت و LCOS برابر ۶۲۰ یوروست. با افت CAPEX به ۴۰۰ یورو، دامنه رقابتی تا برق ۶۰ یورو نیز گسترش می‌یابد و LCOS حدود ۶۱۸ یورو می‌شود.

SteelExperts.ir



شکل 8. هزینه هم‌سطح فولاد سبز در تعرفه‌های مختلف برق و هزینه‌های سرمایه‌ای AEMWE. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

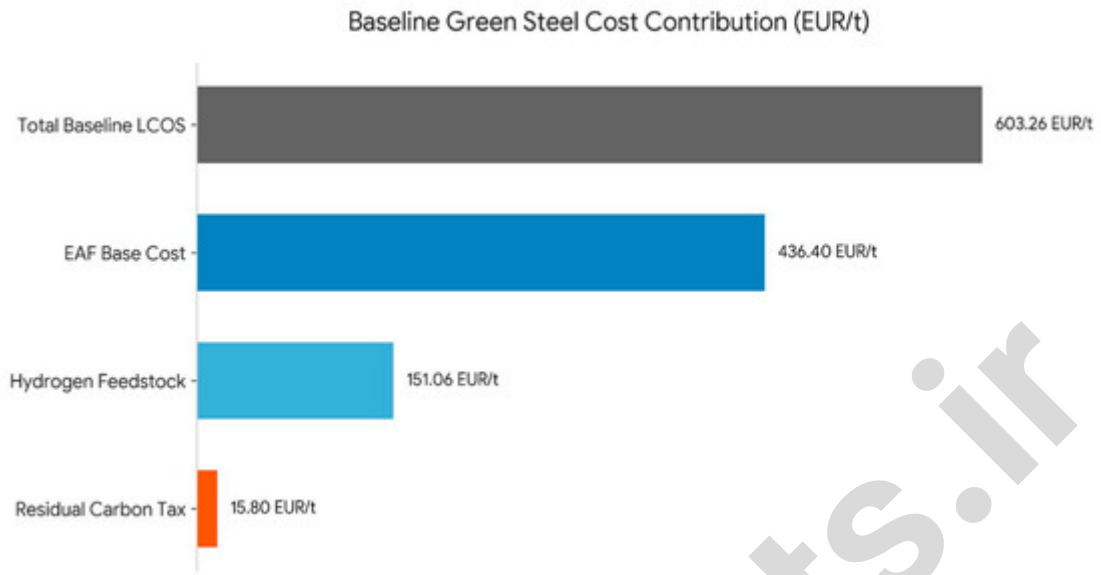
SteelExperts.ir



شکل 9. نقشه حرارتی LCOS برحسب CAPEX و قیمت برق. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

اقتصاد فولاد اولیه سبز در اصل از هزینه هم‌سطح هیدروژن خوراک پیروی می‌کند. در سناریوی پایه، سرمایه کل زیرساخت ۱٫۶۲ میلیارد یورو است؛ هزینه سالانه سرمایه ۱۶۵ میلیون یورو و تعمیرات و نگهداری ثابت و متغیر ۲۹٫۱۶ میلیون یورو محاسبه شده است. بزرگ‌ترین هزینه، برق مصرفی با ۸۶۴ میلیون یورو در سال است که اعتبار اکسیژن فشاربالای جانبی در حدود ۱۴۲٫۸۵ میلیون یورو بخشی از آن را جبران می‌کند. خروج خالص سالانه ۹۱۵٫۳۱ میلیون یورو برای تولید ۳۶۰ هزار تن هیدروژن سبز، LCOH پایه ۲٫۵۲ یورو بر کیلوگرم ایجاد می‌کند. در احیای مستقیم، این عدد سهم خوراک هیدروژن را به ۱۵۱٫۰۶ یورو بر تن فولاد می‌رساند. با افزودن ۴۳۶٫۴۰ یورو هزینه پایه ذوب و ۱۵٫۸۰ یورو هزینه کربن، LCOS نهایی ۶۰۳٫۲۶ یورو بر تن است؛ این محاسبه به مصرف ۶۰ کیلوگرم هیدروژن به ازای هر تن فولاد وابسته است. شکل ۱۰ سهم اجزای هزینه را نمایش می‌دهد.

SteelExperts.ir

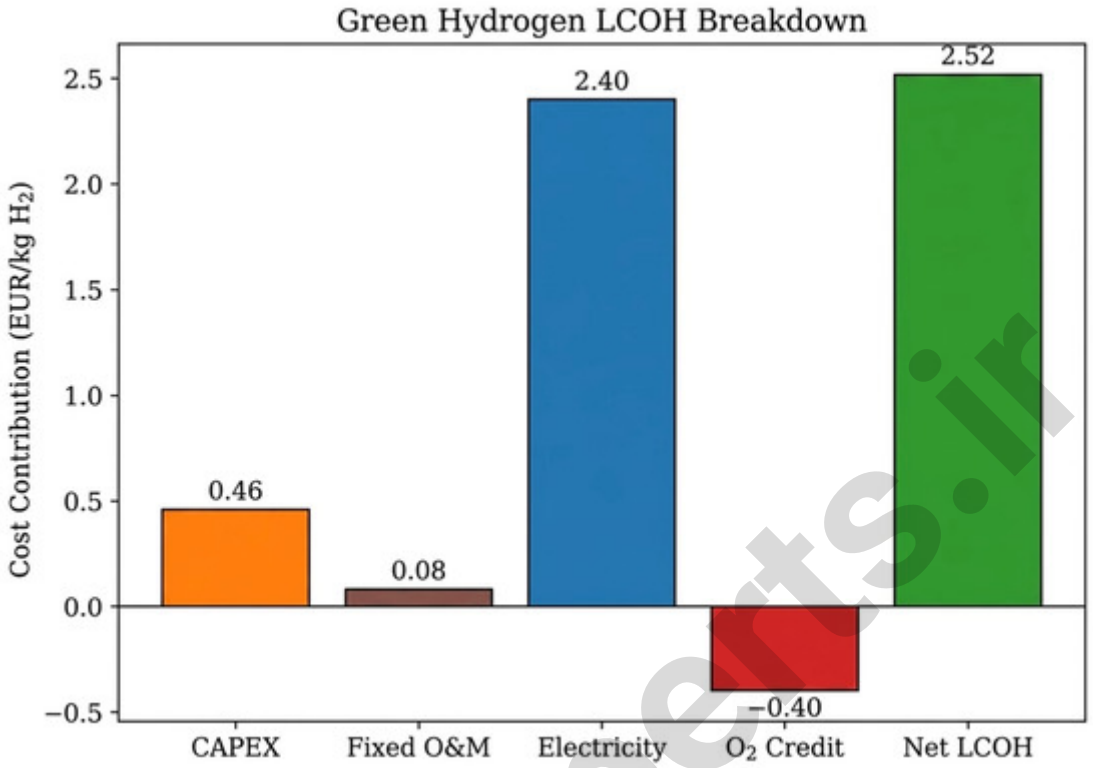


شکل 10. تفکیک هزینه پایه تولید فولاد سبز. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

ساختار هزینه به نرخ یادگیری فناوری، قیمت برق و بازار محصول جانبی حساس است. در حالت بهینه با CAPEX برابر ۵۰۰ یورو بر کیلووات و برق ۳۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، LCOH خالص به ۱٫۳۹ یورو بر کیلوگرم و LCOS به ۵۳۵٫۸۱ یورو بر تن کاهش می‌یابد. در حالت نامساعد با CAPEX برابر ۱۰۰۰ یورو و برق ۸۰ یورو، LCOH به ۴٫۱۲ و LCOS به ۶۹۹٫۵۱ یورو می‌رسند. اگر اکسیژن فروش نرود و ارزش آن صفر باشد، LCOH به ۲٫۹۱ و LCOS به ۶۲۷٫۰۷ یورو افزایش می‌یابد؛ در مقابل قراردادهای صنعتی با قیمت اکسیژن ۱۰۰ یورو بر تن، LCOH را به ۲٫۱۲ و LCOS را به ۵۷۹٫۴۶ یورو می‌رسانند و رقابت‌پذیری فولاد سبز را تقویت می‌کنند.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد سهم غالب در LCOH خالص پایه ۲٫۵۲ یورو بر کیلوگرم، مربوط به برق است. در تعرفه ۵۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، هزینه برق ۲٫۴۰ یورو به ازای هر کیلوگرم، بازیافت سرمایه ثابت ۰٫۴۶ و تعمیرات و نگهداری ۰٫۰۸ یورو سهم دارند. اعتبار فروش اکسیژن با قیمت ۵۰ یورو بر تن، ۰٫۴۰ یورو در هر کیلوگرم هیدروژن از هزینه ناخالص کم می‌کند. در متن نمودار، مقادیر سالانه برق ۸۶۴، سرمایه ۱۶۵، نگهداری ۲۹٫۱۶ و اعتبار اکسیژن منفی ۱۴۲٫۸۵ نیز گزارش شده‌اند که بر حسب میلیون یورو در سال تفسیر می‌شوند.

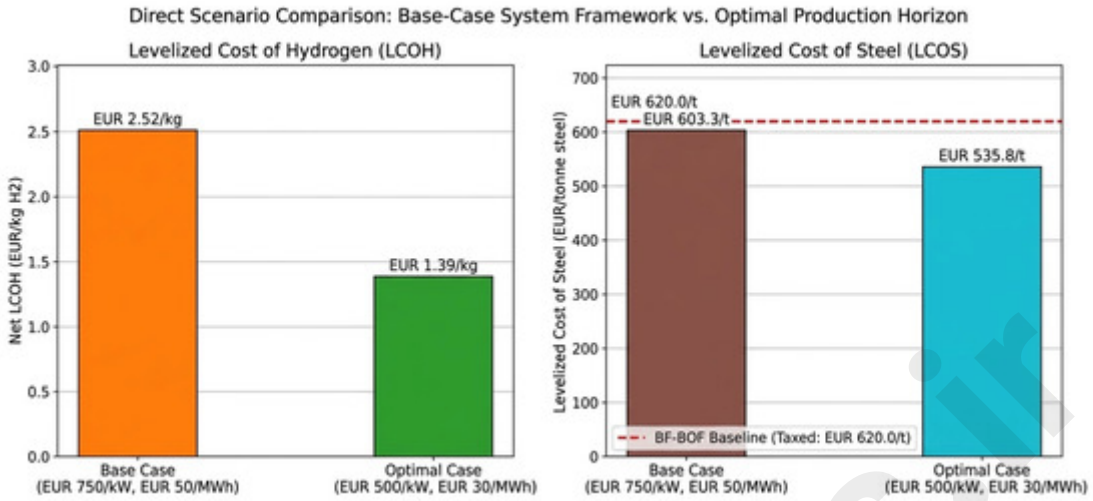
SteelExperts.ir



شکل 11. اجزای تشکیل‌دهنده LCOH سامانه AEMWE در حالت پایه. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

شکل ۱۲ دو محدوده بهره‌برداری زنجیره فولاد سبز را مقایسه می‌کند. در حالت پایه، CAPEX برابر ۷۵۰ یورو بر کیلووات و برق ۵۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، LCOH خالص ۲٫۵۲ یورو بر کیلوگرم و LCOS برابر ۶۰۳٫۲۶ یورو بر تن است. در حالت ایده‌آل با ۵۰۰ یورو سرمایه و برق ۳۰ یورو، LCOH حدود ۴۴٫۸ درصد کاهش یافته و به ۱٫۳۹ یورو می‌رسد؛ این افت هزینه سوخت در کل فلوشیت منتشر می‌شود و LCOS را به ۵۳۵٫۸۱ یورو می‌رساند، یعنی ۶۷٫۴۵ یورو صرفه‌جویی ساختاری برای هر تن فولاد.

SteelExperts.ir



شکل 12. مقایسه LCOH و LCOS در سناریوی پایه و بهینه. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

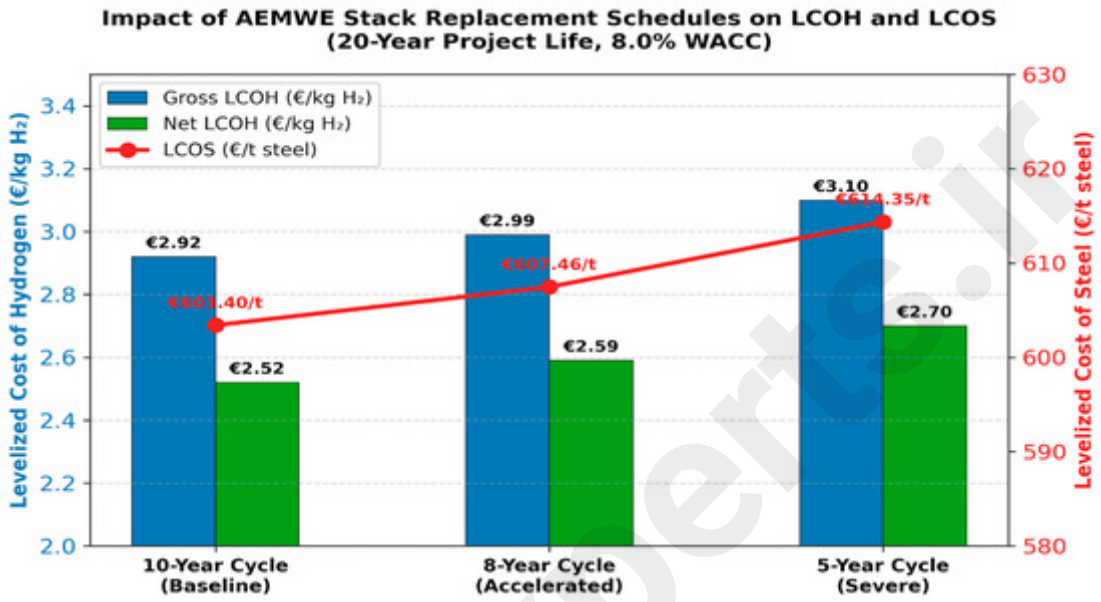
۳.۲.۳. تأثیر زمان‌بندی تعویض استک AEMWE بر LCOH و LCOS

به‌دلیل تنش شیمیایی و مکانیکی مداوم استک‌های AEMWE در جریان بالا، اثر مالی تخریب سریع‌تر با سه دوره تعویض پنج‌ساله (۴۰ هزار ساعت)، هشت‌ساله (۶۴ هزار ساعت) و ده‌ساله (۸۰ هزار ساعت) ارزیابی شده است.

طبق جدول ۱۲ و شکل ۱۳، کوتاه‌شدن فاصله تعویض استک از ده به هشت سال، LCOH خالص را ۰٫۰۹ یورو بر کیلوگرم و LCOS را ۵٫۴۰ یورو بر تن فولاد افزایش می‌دهد. در سناریوی سخت‌گیرانه تعویض هر پنج سال، ارزش فعلی تنزیل‌شده سه تعمیر اساسی که در متن منبع با عدد ۹۴۵٫۴ گزارش شده، LCOH را به ۲٫۷۴ یورو بر کیلوگرم، یعنی ۸٫۷ درصد بیشتر، و LCOS را به ۶۱۶٫۶۰ یورو بر تن، یعنی ۲٫۲ درصد بیشتر، می‌رساند. چون هیدروژن حدود یک‌چهارم هزینه مستقیم فولاد سبز است، هر ۰٫۱ یورو تغییر در LCOH تقریباً ۶ یورو بر تن بر LCOS اثر دارد. حتی در تخریب شدید نیز فولاد سبز با فرض قیمت کربن ۷۹ یورو، نزدیک به ۵۹٫۹۰ یورو بر تن از BF-BOF ارزان‌تر باقی می‌ماند.

پارامتر	چرخه پایه 10ساله	چرخه شتاب‌یافته 8ساله	چرخه شدید 5ساله
فاصله تعویض استک	80,000 h	64,000 h	40,000 h
زمان سرمایه‌گذاری مجدد در افق 20 سال	سال 10؛ یک نوبت	سال‌های 8 و 16؛ دو نوبت	سال‌های 5 و 10 و 15؛ سه نوبت
ارزش فعلی CAPEX تعویض استک	300.1 میلیون EUR	539.2 میلیون EUR	945.4 میلیون EUR
LCOH ناخالص	2.92 EUR/kg H	2.99 EUR/kg H	3.10 EUR/kg H
LCOH خالص	2.52 EUR/kg H	2.59 EUR/kg H	2.70 EUR/kg H
افزایش LCOH نسبت به مبنا	—	0.09 EUR/kg H (3.6%)	0.22 EUR/kg H (8.7%)

پارامتر	چرخه پایه 10ساله	چرخه شتاب‌یافته 8ساله	چرخه شدید 5ساله
هزینه هم‌سطح فولاد LCOS	EUR/t 603.40	EUR/t 608.46	EUR/t 616.35
افزایش LCOS نسبت به مبنا	—	(EUR/t (0.9% 5.40	(EUR/t (2.2% 13.20



شکل 13. اثر دوره‌های تعویض استک AEMWE بر LCOH و LCOS. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

۳.۲.۴. امنیت تأمین آب؛ هزینه نمک‌زدایی و بازچرخانی پساب صنعتی

فولادسازی تارانتو در منطقه نیمه‌خشک پولیا در جنوب ایتالیاست و با خشکسالی فصلی و تنش آب منطقه‌ای روبه‌روست. برداشت آب شیرین سفره‌های زیرزمینی برای الکترولیز ریسک محیط‌زیستی جدی دارد. در مدل H I- TEA، اسمز معکوس آب دریا (SWRO) در ساحل مسیر اصلی تأمین آب فرض شده و امکان افزودن مدار بازیافت پساب صنعتی نیز وجود دارد. با ضریب مصرف ۱۱ کیلوگرم آب بر کیلوگرم هیدروژن، شامل ۸٫۹۴ کیلوگرم مقدار استوکیومتری و ۲٫۰۶ کیلوگرم تلفات تصفیه و خنک‌کاری، سالانه ۳٫۹۶ میلیون تن آب یا ۴۹۵ هزار کیلوگرم در ساعت نیاز است. این مقدار با مصرف هیدروژن ۶۰ کیلوگرم بر تن فولاد معادل ۰٫۶۶ مترمکعب آب به ازای هر تن فولاد خام است.

جدول ۱۳ نشان می‌دهد بهای آب خام کمتر از یک‌دهم درصد هزینه کل فولاد سبز است. حتی در فرض افزایش بسیار شدید ۴۰۰ درصدی هزینه آب تا ۴ یورو بر مترمکعب، ناشی از پیش‌تصفیه گران یا عوارض دفع شورابه، LCOS تنها ۱٫۹۸ یورو بر تن افزایش پیدا می‌کند: از ۶۰۳٫۴۰ به ۶۰۵٫۳۸ یورو بر تن.

روش تأمین آب	قیمت نمک‌زدایی (EUR/m³)	هزینه سالانه آب	سهم در LCOH خالص (EUR/kg H)	سهم در LCOS (EUR/t)	تفاوت با مبنا (EUR/t)
اسمز معکوس آب دریا با هزینه پایین	0.50	1.98 میلیون EUR/yr	0.0055	0.33	0.33-
SWRO ساحلی مبنا	1.00	3.96 میلیون EUR/yr	0.0110	0.66	مبنای مقایسه
آب پرهزینه و گرفتگی شدید	2.50	9.90 میلیون EUR/yr	0.0275	1.65	0.99+
شرایط بسیار پرهزینه و جریمه شورابه	4.00	15.84 میلیون EUR/yr	0.0440	2.64	1.98+

برای کاهش تخلیه شورابه به ساحل و حذف وابستگی به آب شیرین بیرونی، می‌توان سامانه بازیافت با تخلیه مایع صفر (ZLD) را با پساب تصفیه‌خانه شهری تارانتو با ظرفیت حدود ۳۰ میلیون لیتر در روز پیوند داد. بازیافت ۸۵ درصد آب تخلیه فرایندی و خنک‌کاری، نیاز آب دریای خام را از ۱۱ به ۱٫۶۵ کیلوگرم بر کیلوگرم هیدروژن کاهش می‌دهد. سرمایه اولیه بیشتر این سامانه حدود ۱۲٫۵ میلیون یوروست، اما مجموعه را در برابر محدودیت‌های خشکسالی مقاوم و چرخه بسته مصرف آب صنعتی ایجاد می‌کند.

۳.۲.۵. مقایسه اقتصادی هیدروژن سبز و آبی در نوسانات بازار

برای مقایسه رقابت‌پذیری AEMWE سبز با گزینه فسیلی کم‌انتشار، مسیر تولید «هیدروژن آبی» از ریفرمینگ اتوترمال گاز طبیعی همراه جذب و ذخیره کربن (ATR+CCS) وارد مدل شده است. برای آن بازده جذب کربن ۹۰ درصد، هزینه غیرسوختی به‌همراه CCS برابر ۰٫۸۰ یورو بر کیلوگرم، مصرف گاز طبیعی ۳۸ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم هیدروژن و ردپای باقیمانده ۱٫۵ کیلوگرم CO بر کیلوگرم H فرض می‌شود.

رابطه ۳۱ هزینه هم‌سطح هیدروژن آبی را به شکل مجموع هزینه ثابت ۰٫۸۰ یورو، هزینه گاز طبیعی با ضریب ۰٫۰۳۸ برابر قیمت گاز و هزینه کربن با ضریب ۰٫۰۰۱۵ برابر قیمت مجوز انتشار تعریف می‌کند. $$LCOH_{Blue} = 0.80 + 0.038 \cdot P_{NG} + (0.0015 \cdot P_{carbon})$$

({LCOH_{Blue}=0.80+(0.038·P_{NG})+(0.0015·P_{carbon}

هیدروژن آبی در قیمت پایه گاز طبیعی برتری اندکی دارد: هزینه فولاد آن ۵۹۴٫۳۱ یورو بر تن در برابر ۶۰۳٫۴۰ یورو برای مسیر سبز است. بااین‌حال افزایش تنها ۲۰٫۴ درصدی قیمت گاز اروپا تا ۴۲٫۱۴ یورو بر مگاوات‌ساعت، این مزیت را از بین می‌برد. با نزدیک‌شدن قیمت کربن به ۱۲۵ یورو بر تن CO در سناریوی ۲۰۳۰، آستانه برابری قیمت گاز به ۴۰٫۳۳ یورو بر مگاوات‌ساعت افت می‌کند؛ جدول ۱۴ نشان می‌دهد هیدروژن سبز در برابر نوسان بلندمدت بازار سوخت فسیلی پوشش ریسک مؤثری است.

سناریو	گاز (EUR/MWh)	کربن (EUR/tCO)	LCOH آبی (EUR/kg)	LCOH سبز خالص (EUR/kg)	LCOS آبی (EUR/t)	LCOS سبز (EUR/t)	برنده و میزان اختلاف
گاز ارزان	25.00	79.00	1.87	2.52	571.41	603.40	آبی؛ 31.99 EUR/t
بازار مبنا	35.00	79.00	2.25	2.52	594.31	603.40	آبی؛ 9.09 EUR/t
برابری قیمت گاز	42.14	79.00	2.52	2.52	603.40	603.40	برابری؛ 0 EUR/t
گاز گران	50.00	79.00	2.82	2.52	628.41	603.40	سبز؛ 25.01 EUR/t
برابری با ETS سال 2030	40.33	125.00	2.52	2.52	612.60	612.60	برابری؛ 0 EUR/t
برابری تحت قیمت کربن	35.00	260.00	2.52	2.52	648.70	639.60	سبز؛ 9.10 EUR/t

۳.۲.۶. ریسک آمادگی فناوری، افت عملکرد و سناریوهای محافظه‌کارانه CAPEX

با آنکه استفاده از کاتالیست‌های فاقد فلز نجیب و غشاهای ارزان، CAPEX فناوری AEMWE را پایین نگه می‌دارد، سطح آمادگی فناوری آن در حدود TRL 6–7 است و از الکترولیز قلیایی تجاری با TRL 8–9 و PEMWE با TRL 8 عقب‌تر قرار دارد. برای ارزیابی ریسک دوام اولیه کمتر سلول و فرض خوش‌بینانه کاهش هزینه، مدل LCOH تخریب مجموعه غشاالکترود (MEA) و برنامه تعویض استک را صریحاً وارد می‌کند.

فرسایش ولتاژ سلول با ضریب افت بازده ۱٫۵ درصد در هر ۱۰ هزار ساعت بهره‌برداری مدل‌سازی می‌شود؛ در نتیجه مصرف ویژه انرژی با گذشت زمان افزایش می‌یابد. رابطه ۳۲ SEC متغیر با زمان را از مقدار پایه و ضریب فرسایش محاسبه می‌کند. $SEC_{AEMWE}(t) = SEC_{baseline} \cdot 1 + \cdot \ deg \cdot t \ 10{,}000$

((SEC_{AEMWE}(t)=SEC_{baseline}·(1+·δ_{deg}·(t)/(10,000

هنگامی که فرسایش تجمعی بازده استک را به کمتر از ۹۰ درصد مقدار اسمی برساند، تعویض کامل استک فعال می‌شود. هزینه این کار ۳۰۰ یورو بر کیلووات یا ۴۰ درصد سرمایه اولیه سامانه در نظر گرفته شده است.

طبق جدول ۱۵، در سناریوی محافظه‌کارانه نزدیک‌مدت با عمر MEA فقط ۴۰ هزار ساعت و سرمایه اولیه ۱۱۰۰ یورو بر کیلووات، LCOH خالص ۰٫۶۶ یورو بر کیلوگرم افزایش می‌یابد و LCOS نهایی به ۶۴۳ یورو بر تن فولاد می‌رسد.

فناوری الکترولیز	TRL	CAPEX اولیه (EUR/kW)	SEC (kWh/kg)	عمر استک	نوبت‌های تعویض	LCOH خالص (EUR/kg)	LCOS (EUR/t)	تفاوت با AEMWE مبنا
AEMWE؛ هدف مبنا	7–6	750	48.0	80,000 h	سال 10؛ یک نوبت	2.52	603.40	مبنا
AEMWE؛ سناریوی محافظه‌کارانه	7–6	1100	52.0	40,000 h	سال‌های 5 و 10 و 15؛ سه نوبت	3.18	643.00	+39.60 EUR/t (6.5%)
ALK تجاری؛ معیار	9–8	900	51.0	90,000 h	سال 11؛ یک نوبت	2.81	620.80	+17.40 EUR/t (2.9%)
PEMWE تجاری؛ معیار	8	1200	55.0	60,000 h	سال‌های 7 و 14؛ دو نوبت	3.38	655.00	+51.60 EUR/t (8.6%)

حتی با این عملکرد محتاطانه، AEMWE به‌دلیل استفاده از کاتالیست‌های نیکل و آهن فراوان به‌جای سخت‌افزار کمیاب ایریدیوم و تیتانیوم، در مقایسه با PEMWE تجاری با LCOH برابر ۳٫۳۸ یورو بر کیلوگرم رقابتی باقی می‌ماند. بنابراین خطر استهلاک فناوری در استقرار کوتاه‌مدت بالاتر است، اما مسیر کاهش هزینه آن می‌تواند مبنای بلندمدت کربن‌زدایی فولاد در مقیاس گیگاوات باشد.

۳.۲.۷. اثر ناپیوستگی انرژی تجدیدپذیر، سیکل حرارتی و اندازه ذخیره‌ساز

سناریوی پایه H I-TEA قرارداد خرید برق شرکتی با پشتیبانی شبکه را فرض می‌کند که در ۸۰۰۰ ساعت سالانه، ۲٫۱۶ گیگاوات برق مطابق RED III تحویل می‌دهد. این تأمین پایدار، تنش حرارتی استک AEMWE را کم و خوراک هیدروژن پیوسته کوره شفت DRI را تضمین می‌کند. برای محاسبه هزینه مهندسی و اقتصادی اتصال مستقیم به تجدیدپذیر بدون تضمین شبکه، پروفایل وقفه‌های زمانی بررسی شده است. با تأمین مستقیم ترکیبی خورشید و باد، ساعات بهره‌برداری به ۴۵۰۰ ساعت در سال، معادل ضریب ظرفیت ۵۱٫۳ درصد، کاهش می‌یابد. سامانه هر سال حدود ۳۵۰ چرخه کامل روشن و خاموش‌شدن و تغییرات سریع بار را تجربه می‌کند. برای جلوگیری از انجماد سلول و تأخیر حرارتی در راه‌اندازی دوباره، حالت آماده‌به‌کار گرم به برق پیوسته ۱٫۸ درصد ظرفیت اسمی، معادل ۳۸٫۸۸ مگاوات از باتری محلی نیاز دارد؛ رابطه ۳۳ این توان را نشان می‌دهد. P s t a n d b y = 0.018 · P i n s t P_{standby}=0.018·P_{inst

گذارهای پتانسیل هنگام خاموش و روشن‌شدن نیز تخریب شیمیایی و افت ولتاژ سلول را تشدید می‌کنند. رابطه ۳۴ ضریب سایش اضافی معادل ۰٫۰۴ درصد در هر راه‌اندازی سرد را به فرسایش پایه اضافه می‌کند. t o t a l δ_{total}=δ_{baseline}+(N_{cycle}·Δδ_{cycle ({= b a s e l i n e + (N c y c l e · Δ c y c l e)

این تخریب سریع‌تر، عمر مورد انتظار استک را از ۸۰ هزار به ۴۵ هزار ساعت می‌رساند؛ در نتیجه در دوره ۲۰ساله

پروژه دو نوبت تعویض کامل استک لازم می‌شود.

کوره شفت احیای مستقیم یک راکتور گرماشیمیایی پیوسته است؛ نوسان گاز احیاکننده پروفایل دما را برهم می‌زند و موجب خوشه‌ای‌شدن گندله سنگ‌آهن می‌شود. برای تأمین جریان ثابت ۴۱,۴۹۰ کیلوگرم هیدروژن در ساعت طی وقفه طولانی تجدیدپذیر، ذخیره‌ساز گازی ۳۵ بار باید از پشتیبانی ۱۲ ساعت با ظرفیت ۴۹۷٫۸۸ تن به پشتیبانی ۴۸ ساعت با ظرفیت ۱۹۹۱٫۵۲ تن افزایش یابد.

طبق جدول ۱۶، تأمین مستقیم برق تجدیدپذیرِ بدون تضمین شبکه، LCOH خالص را ۳۶٫۹ درصد افزایش داده و به ۳٫۴۵ یورو بر کیلوگرم می‌رساند؛ هزینه نهایی فولاد نیز به ۶۵۹٫۲۰ یورو بر تن می‌رسد. علت عمده، افت ضریب بهره‌برداری از دارایی ۱٫۶۲ میلیارد یورویی الکترولایزر و هزینه توسعه مخزن بافر است. ازاین‌رو قراردادهای برق با پشتوانه شبکه یا ذخیره باتری محلی برای سلامت استک و حفظ برابری اقتصادی فولاد سبز ضروری‌اند.

شاخص عملیاتی	مبنای برق تجدیدپذیر با cPPA و تثبیت شبکه	منابع تجدیدپذیر با پشتیبانی BESS	منابع تجدیدپذیر مستقل از شبکه و بدون تثبیت
ساعات کار سالانه	h/yr 8000	h/yr 6500	h/yr 4500
ضریب ظرفیت الکترولایزر	0.913	0.742	0.513
چرخه‌های شروع و توقف سالانه	<10	50	350
عمر مؤثر استک	h 80,000؛ یک بار تعویض	h 65,000؛ یک بار تعویض	h 45,000؛ دو بار تعویض
زمان خودمختاری ذخیره بافر	h 12	h 24	h 48
CAPEX ذخیره بافر	12.0 میلیون EUR	24.0 میلیون EUR	48.0 میلیون EUR
LCOH خالص	EUR/kg H 2.52	EUR/kg H 2.94	EUR/kg H 3.45
LCOS نهایی	EUR/t steel 603.40	EUR/t steel 628.60	EUR/t steel 659.20

۳.۲.۸. مازاد اکسیژن، مصرف داخلی و احتمال نبود درآمد فروش

مجموعه AEMWE با توان ۲٫۱۶ گیگاوات در هر ساعت ۳۵۷,۶۰۰ کیلوگرم و در سال حدود ۲٫۸۶ میلیون تن اکسیژن تولید می‌کند. عرضه بدون برنامه این مقدار به بازار محدود محلی می‌تواند بازار اکسیژن صنعتی را اشباع و بهای فروش را حتی تا صفر کاهش دهد. تحلیل حساسیت آن در جدول ۱۷ آمده است.

مسیر استفاده / فروش اکسیژن	قیمت بازار (EUR/t)	اعتبار اکسیژن (EUR/kg) (H	LCOH خالص (EUR/kg)	LCOS نهایی (EUR/t)	تغییر در برابر مبنا (EUR/t)	فرض بازار و امکان‌پذیری
اشباع کامل بازار	0.00	0.000	2.92	627.40	+24.00	تخلیه بدون فروش بیرونی

مسیر استفاده / فروش اکسیژن	قیمت بازار (EUR/t)	اعتبار اکسیژن (H (EUR/kg	LCOH خالص (EUR/kg)	LCOS نهایی (EUR/t)	تغییر در برابر مبنا (EUR/t)	فرض بازار و امکان‌پذیری
مصرف جایگزین در داخل کارخانه	18.50	0.147	2.77	617.60	+14.20	استفاده داخلی 29% در EAF و مشعل اکسیژن‌سوخت
فروش عمده مبنا	50.00	0.397	2.52	603.40	مبنا	فروش منطقه‌ای اکسیژن صنعتی
مصرف ویژه با ارزش زیاد	100.00	0.795	2.12	579.40	-24.00	خط مشترک صنایع شیمیایی و پزشکی

برای کاهش وابستگی به بازار بیرونی، طرح یکپارچه تارانتو بخشی از اکسیژن را در سه کاربرد داخل فولادسازی مصرف می‌کند. بر اساس رابطه ۳۵، مجموع مصرف اکسیژن کوره قوس، مشعل‌های اکسی‌سوختی و تصفیه آب ZLD حدود ۰٫۸۳ میلیون تن در سال یا ۲۹ درصد تولید کل است. $\dot{m}_{O_{2,internal}} = \dot{m}_{EAF} + \dot{m}_{oxy-fuel} + \dot{m}_{ZLD} = 0.83\,MtO_2/yr\ (29\%\ total\ yield)$

- دمش انرژی شیمیایی در کوره قوس ـ ۰٫۳۰ میلیون تن در سال: تزریق فراصوتی اکسیژن به میزان ۵۰ کیلوگرم بر تن فولاد، ذوب قراضه و تشکیل سرباره را تسریع می‌کند و مصرف برق را حدود ۱۵ کیلووات‌ساعت بر تن کاهش می‌دهد.

- بازگرمایش اکسی‌سوختی و پیش‌گرمایش پاتیل ـ ۰٫۴۸ میلیون تن در سال: جایگزینی مشعل هوا‌ـسوخت با مشعل اکسی‌سوختی با مصرف ۸۰ کیلوگرم اکسیژن بر تن فولاد، اتلاف حرارتی نیتروژن دودکش را حذف می‌کند و مصرف گاز طبیعی کوره بازگرمایش را ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. با قیمت گاز ۳۵ یورو بر مگاوات‌ساعت، ارزش داخلی ضمنی اکسیژن حداقل ۱۸٫۵۰ یورو بر تن برآورد می‌شود.

- تصفیه آب با تخلیه مایع صفر ـ ۰٫۰۵ میلیون تن در سال: اکسیژن خالص برای تولید ازن در محل و اکسایش پیشرفته پساب صنعتی استفاده می‌شود.

حتی اگر بازار بیرونی اکسیژن کاملاً اشباع شود و قیمت آن صفر باشد، هزینه تولید فولاد تنها ۳٫۹۸ درصد، از ۶۰۳٫۴۰ به ۶۲۷٫۴۰ یورو بر تن، افزایش می‌یابد. ادغام مصرف داخلی اکسیژن در مشعل‌ها و کوره قوس، ارزش حداقلی ۱۸٫۵۰ یورو بر تن اکسیژن فراهم می‌کند و بدون خریدار صنعتی خارجی، سقف هزینه فولاد را به حدود ۶۱۷٫۶۰ یورو محدود می‌سازد.

۳.۲.۹. حساسیت مشترک افزایش تعرفه برق و اشباع بازار اکسیژن

برای سنجش پایداری پروژه در شرایط نامساعد بازار، ماتریس حساسیت مشترکی از تعرفه برق در بازه ۳۰ تا ۹۰ یورو بر مگاوات‌ساعت و قیمت فروش اکسیژن در بازه صفر تا ۵۰ یورو بر تن در مدل به کار گرفته شده است.

طبق جدول ۱۸، افزایش تعرفه برق اصلی‌ترین محرک هزینه فولاد سبز است. در برق ۷۰ یورو بر مگاوات‌ساعت و سقوط کامل بازار اکسیژن تا قیمت صفر، LCOS به ۶۹۵٫۴۰ یورو بر تن، یعنی ۱۵٫۲ درصد بالاتر از پایه، می‌رسد. در این حالت رقابت با احیای مستقیم گازطبیعیِ فاقد جذب کربن، به قیمت مجوز کربن حداقل ۲۷۴ یورو بر تن CO نیاز دارد.

تعرفه برق (EUR/MWh)	قیمت اکسیژن (EUR/t)	LCOH خالص (EUR/kg)	LCOS فولاد سبز (EUR/t)	اختلاف با NG-DRI ((EUR/t	قیمت کربن سربه‌سر (EUR/tCO)	توضیح سناریو
30.00	50.00	1.56	535.40	22.60	33.80	PPA ارزان و تثبیت‌شده
50.00؛ مبنا	50.00؛ مبنا	2.52	603.40	مبنا	171.83	مدل پایه H I- TEA
50.00	0.00	2.92	627.40	+24.00	198.50	اشباع بازار اکسیژن
70.00	50.00	3.48	671.40	+68.00	247.30	افزایش قیمت برق
70.00	0.00	3.88	695.40	+92.00	274.00	افزایش هم‌زمان ریسک برق و اکسیژن
90.00	0.00	4.84	763.40	+160.00	349.50	مرز بحران شدید انرژی

۳.۳. حساسیت LCOH و LCOS به مقدار فروش اکسیژن صنعتی

ازآنجاکه واحد ۲٫۱۶ گیگاواتی سالانه ۲٫۸۶ میلیون تن اکسیژن تولید می‌کند، اشباع بازار منطقه‌ای ریسک واقعی فروش این محصول جانبی است. برای سنجش اثر آن بر هزینه هیدروژن و فولاد، سه حالت جذب اکسیژن در بازار بررسی شده است.

جدول ۱۹ نشان می‌دهد کاهش فروش اکسیژن از ۱۰۰ درصد تولید به فقط ۲۵ درصد، درآمد سالانه آن را از ۱۴۳٫۰۴ به ۳۵٫۷۶ میلیون یورو می‌رساند. بر پایه بخش عددی متن، LCOH خالص به ۲٫۸۲ یورو بر کیلوگرم و LCOS به ۶۲۱٫۴۰ یورو بر تن افزایش می‌یابد. در صورت فروش صفر، LCOH به سقف ناخالص ۲٫۹۲ یورو و LCOS به ۶۲۷٫۴۰ یورو می‌رسد. بعضی اعداد تغییر در متن انگلیسی این بند به شکل ناسازگار آمده‌اند و در

استفاده از آن‌ها باید داده‌های جدول اصلی ملاک تطبیق قرار گیرند.

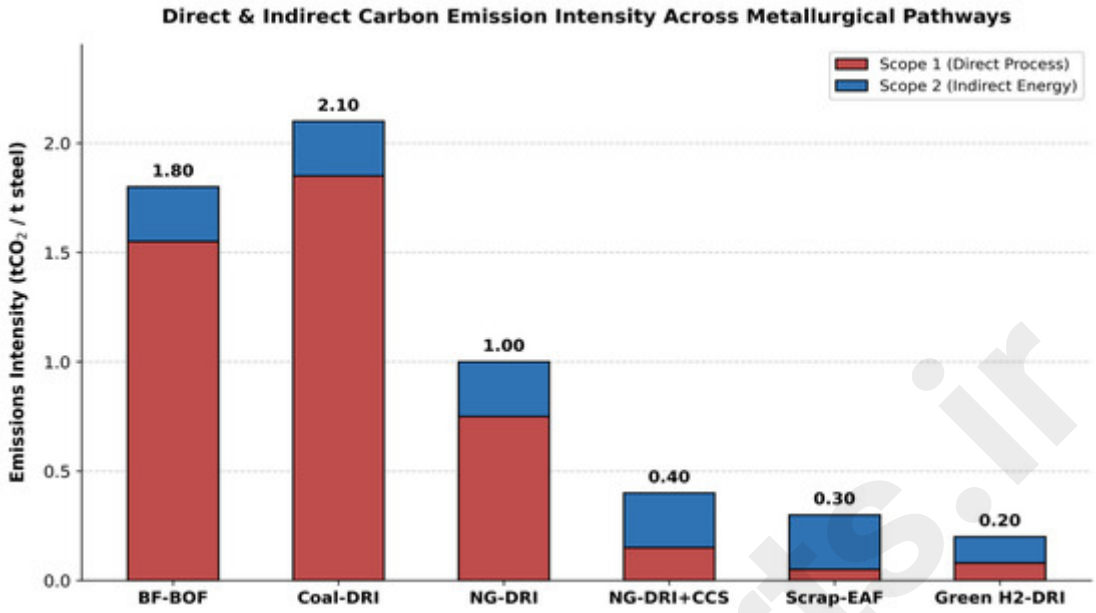
سناریوی جذب اکسیژن	مبنای جذب و درآمد	اعتبار مؤثر اکسیژن (EUR/kg H)	LCOH خالص (EUR/kg H)	LCOS ((EUR/t	مزیت نسبت به مبنا BF-BOF
فروش 100%؛ سناریوی پایه	فروش کامل منطقه‌ای؛ 2.86 Mt/yr با 50 EUR/t	0.40	2.52	603.40	73.10 EUR/t ارزان‌تر
فروش 25%؛ محافظه‌کارانه	مصرف EAF داخلی 7.5% و فروش منطقه‌ای 17.5%	0.10	2.82	621.40	55.10 EUR/t ارزان‌تر
فروش 0%؛ شکست بازار	عدم فروش، تخلیه 100% اکسیژن	0.00	2.92	627.40	49.10 EUR/t ارزان‌تر

با وجود جریمه هزینه‌ای حدود ۱۸ یورو بر تن در صورت شکست کامل بازار اکسیژن، LCOS فولاد سبز همچنان پایین‌تر از هزینه مرجع کوره‌بلند ۶۷۶٫۵۰ یورو بر تن با قیمت کربن ۷۹ یورو است. بنابراین فروش اکسیژن یک سپر مالی ارزشمند است، اما توجیه اصلی پروژه بر بازده الکترولایزر و شرایط برابری قیمت کربن استوار است.

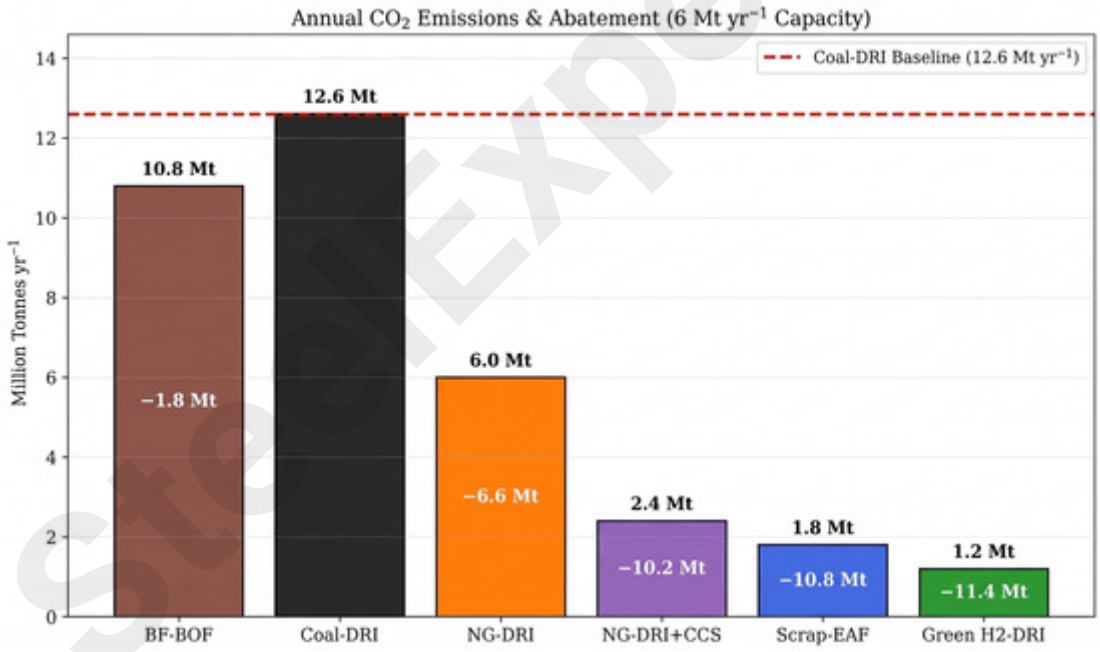
۳.۴. ارزیابی محیط‌زیستی چرخه‌عمر و ظرفیت کاهش انتشار

عملکرد محیط‌زیستی مسیرهای فولادسازی در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مقایسه شده است. مسیر H -DRI-EAF سبز کمترین شدت انتشار را دارد: ۰٫۲۰ تن CO به ازای هر تن فولاد خام. این مقدار در مقایسه با مسیر BF-BOF کک‌محور با انتشار ۱٫۸۰ تن، کاهشی ۸۸٫۹ درصدی است. بیشترین اثر اقلیمی به احیای مستقیم زغال‌سنگی با ۲٫۱۰ تن تعلق دارد. احیای مستقیم گاز طبیعی بدون CCS حدود ۱٫۰۰ تن و با جذب کربن حدود ۰٫۴۰ تن CO بر تن منتشر می‌کند. ذوب قراضه در کوره قوس نیز انتشار کم ۰٫۳۰ تن دارد، اما دسترسی به قراضه آهنی محدودیت ساختاری آن است. با نرخ مرجع ۷۹ یورو مجوز کربن، کاهش شدت انتشار از ۱٫۸۰ به ۰٫۲۰ تن، هزینه انطباق مقرراتی را از ۱۴۲٫۲۰ به ۱۵٫۸۰ یورو بر تن فولاد کاهش می‌دهد.

SteelExperts.ir



شکل 14. شدت انتشار هر مسیر فولادسازی به‌ازای هر تن فولاد. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

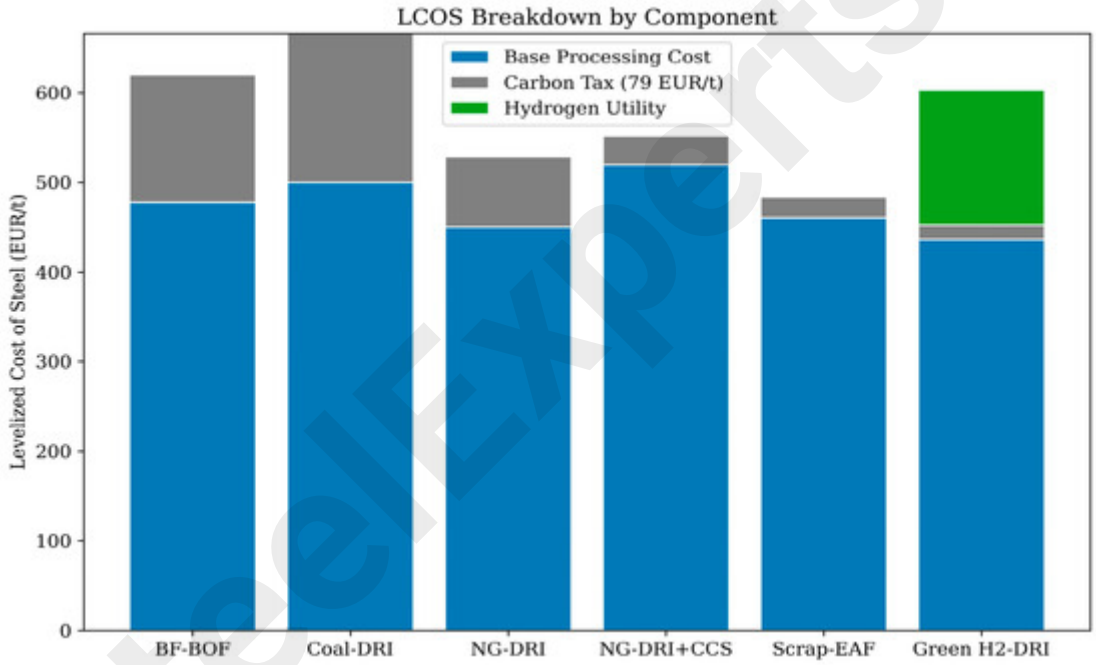


شکل 15. انتشار سالانه CO در مسیرهای تولید و ظرفیت کاهش انتشار آن‌ها. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

کار مجتمع ۶ میلیون تنی با فناوری سنتی BF-BOF سالانه حدود ۱۰٫۸۰ میلیون تن CO منتشر می‌کند. گذار به معماری احیای مستقیم هیدروژنی با برق تجدیدپذیر و AEMWE، انتشار سالانه را به ۱٫۲۰ میلیون تن می‌رساند؛ بنابراین کاهش مطلق حدود ۹٫۶۰ میلیون تن CO در سال است. این مزیت نشان می‌دهد ترکیب کاتالیست‌های فلزات واسطه فراوان، تولید هیدروژن فشاربالا و غشای تبادل آنیونی بدون فاصله می‌تواند مسیر کربن‌زدایی عمیق صنایع انرژی‌بر را هموار کند.

۳.۵. مقایسه اجزای هزینه در مسیرهای مختلف فناوری

شکل ۱۶ هزینه هم‌سطح فولاد در مسیرهای مختلف را به هزینه فرآوری پایه، تأمین هیدروژن و هزینه انطباق زیست‌محیطی تفکیک می‌کند. با نرخ کربن ۷۹ یورو بر تن CO، روش‌های پرانتشار با جریمه مالی سنگین روبه‌رو هستند. هزینه کل BF-BOF برابر ۶۲۰ یورو بر تن است؛ شامل ۴۷۷٫۸۰ یورو هزینه پایه و ۱۴۲٫۲۰ یورو هزینه کربن. احیای مستقیم زغال‌سنگی با ۶۶۵٫۹۰ یورو گران‌ترین گزینه است که ۱۶۵٫۹۰ یورو آن مالیات انتشار است. مسیر NG-DRI بدون جذب کربن، ۴۵۰ یورو هزینه پایه و ۷۹ یورو هزینه کربن، در مجموع ۵۲۹ یورو دارد. افزودن CCS هزینه پایه را به ۵۲۰ یورو افزایش می‌دهد، اما هزینه کربن را به ۳۱٫۶۰ یورو کاهش می‌دهد و جمع هزینه به ۵۵۱٫۶۰ یورو بر تن می‌رسد.

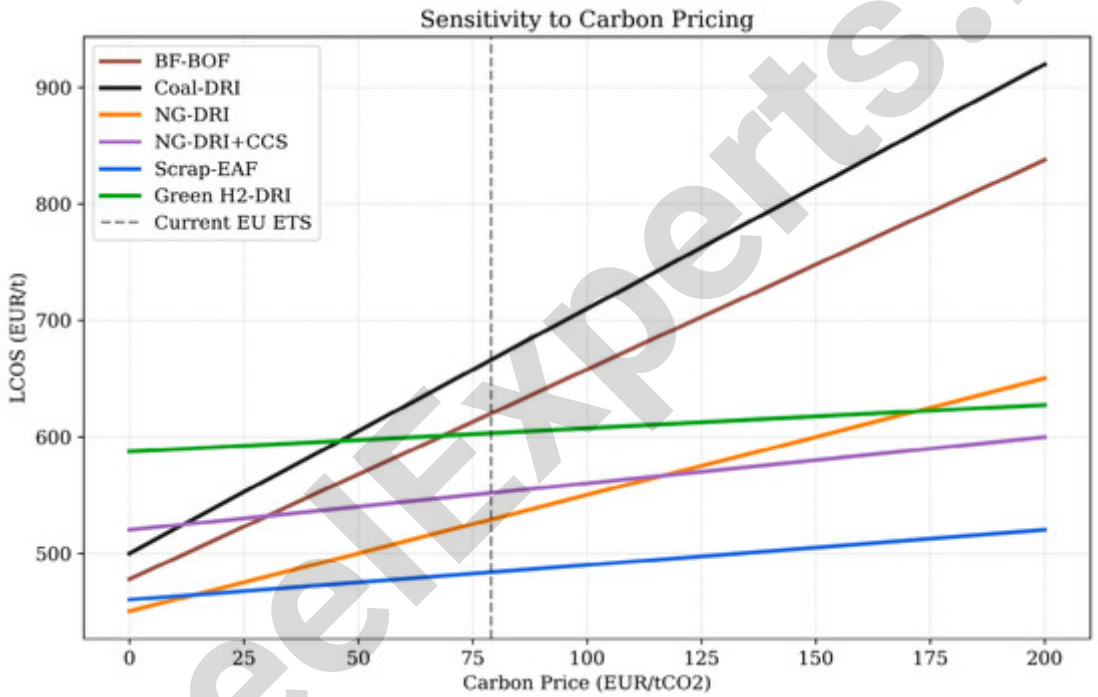


شکل 16. تفکیک اجزای LCOS در مسیرهای مختلف فناوری. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

مسیر سبز احیای مستقیم هیدروژنی، LCOS پایه برابر ۶۰۳٫۲۶ یورو بر تن دارد و در نرخ‌های کربن موردنظر از BF-BOF رقابتی‌تر است. ساختار هزینه آن تغییر بنیادین اقتصاد متالورژی را نشان می‌دهد: هزینه پایه فرآوری کوره برقی ۴۳۶٫۴۰ یورو بر تن، در میان همه گزینه‌های مبتنی بر سنگ‌آهن کمترین است؛ هزینه باقیمانده کربن فقط ۱۵٫۸۰ یورو و هزینه خوراک هیدروژن ۱۵۱٫۰۶ یورو بر تن است. رقابت‌پذیری این مسیر به تعادل میان بهای سوخت پاک و مالیات کربن اجتناب‌شده بستگی دارد. ذوب قراضه در کوره قوس با LCOS برابر ۴۸۳٫۷۰ یورو بر تن همچنان ارزان‌ترین گزینه است، اما ظرفیت گسترش آن به قراضه باکیفیت محدود می‌شود؛ بنابراین برای تولید اولیه در مقیاس بزرگ، احیای مستقیم سبز اهمیت ویژه دارد.

۳.۶. حساسیت به قیمت کربن و آستانه سربه‌سر مقرراتی

شکل ۱۷ نشان می‌دهد LCOS هر مسیر با قیمت مجوز کربن تقریباً خطی تغییر می‌کند و شیب آن به شدت انتشار فرایند بستگی دارد. برای BF-BOF با انتشار ۱٫۸۰ تن CO بر تن، افزایش قیمت کربن به‌سرعت مزیت قیمت سنتی را از بین می‌برد. نقطه سربه‌سر با فولاد سبز برابر ۶۸٫۵۴ یورو بر تن CO گزارش شده است: زیر این مقدار کوره‌بلند ارزان‌تر است و بالاتر از آن صرفه‌جویی کربنی، اضافه‌هزینه هیدروژن الکترولیتی را جبران می‌کند. چون نرخ پایه ۷۹ یورو از این مرز بالاتر است، مدل در شرایط مفروض برتری اقتصادی فوری مسیر سبز بر BF-BOF را نشان می‌دهد.

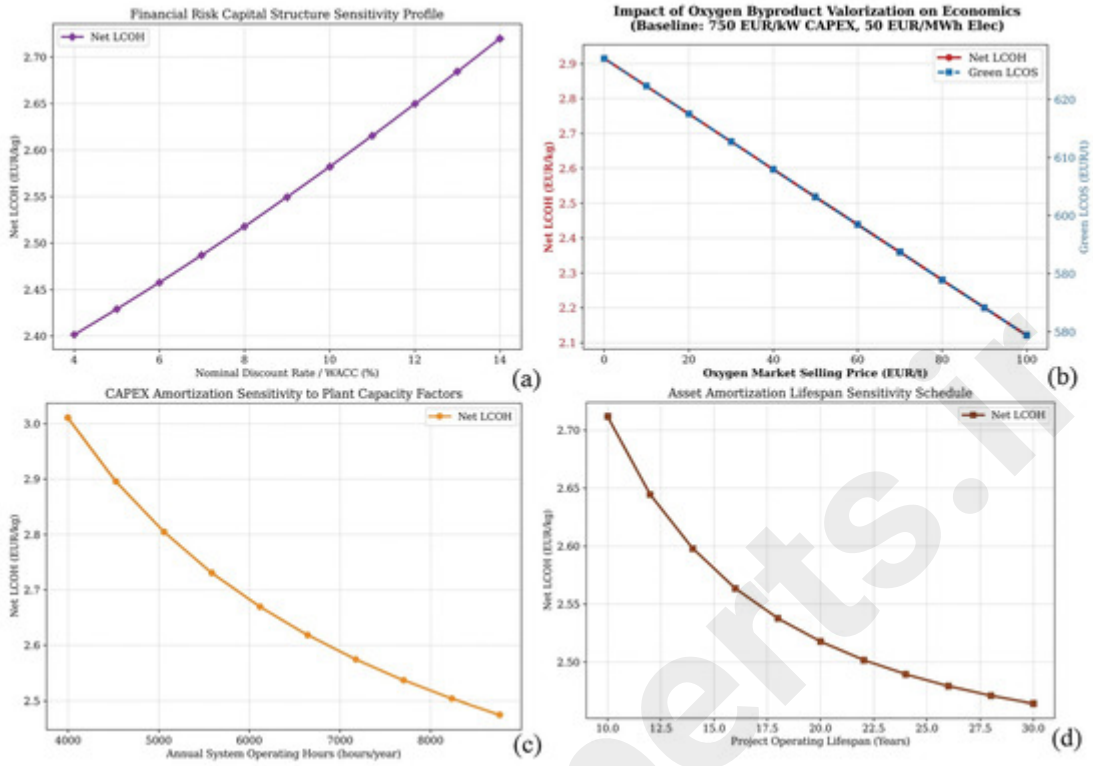


شکل 17. حساسیت LCOS مسیرهای مختلف فولادسازی به قیمت کربن. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

رقابت با مسیرهای گذار گازطبیعی کم‌انتشار به سیاست اقلیمی سخت‌گیرانه‌تری نیاز دارد. چون انتشار NG-DRI حدود یک تن CO بر تن است، برای برابری ساختاری با مسیر سبز، نرخ کربن باید به حدود ۱۷۱٫۸۳ یورو بر تن CO برسد. این مقدار اهمیت ابزارهایی مانند CBAM را برای محافظت از سرمایه‌گذاری هیدروژنی در برابر گزینه فسیلی ارزان و بدون مالیات کافی نشان می‌دهد.

۳.۷. تحلیل حساسیت سایر متغیرهای مؤثر

شکل ۱۸ حساسیت تک‌متغیره LCOH خالص و LCOS فولاد سبز را در برابر تغییر شرایط مالی، بازار و بهره‌برداری نمایش می‌دهد:



شکل 18. الف) حساسیت ساختار سرمایه به ریسک مالی؛ ب) ارزش اقتصادی اکسیژن جانبی در سناریوی پایه؛ پ) حساسیت استهلاک CAPEX به ضریب ظرفیت؛ ت) حساسیت به عمر اقتصادی دارایی‌ها. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

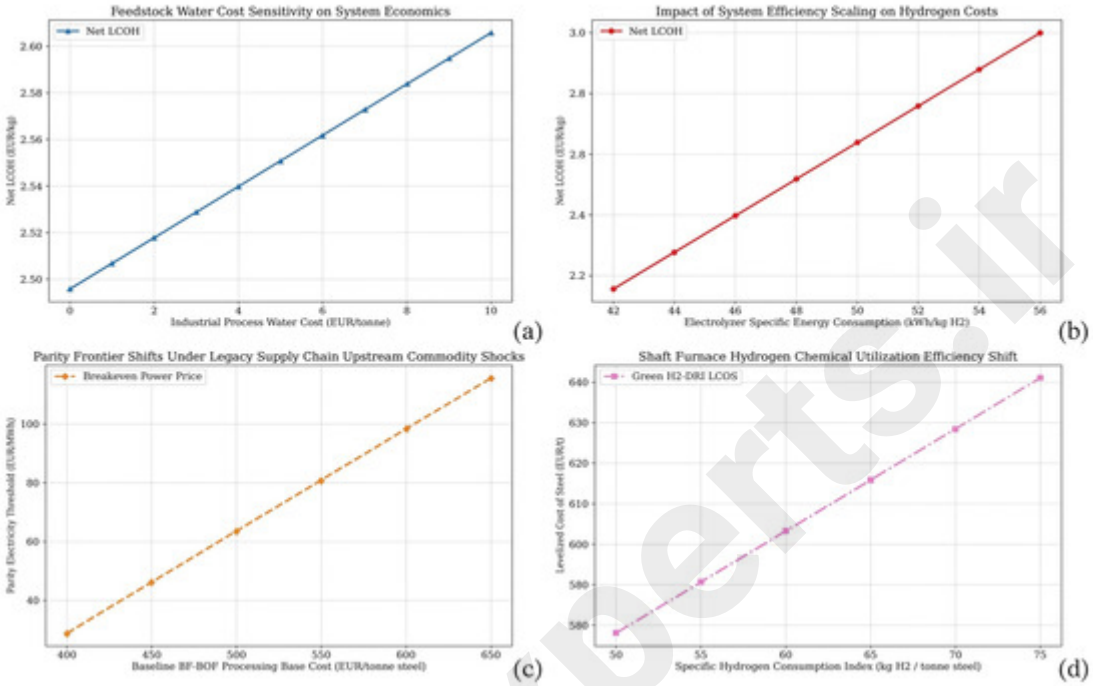
- ساختار تأمین مالی و ریسک سرمایه: افزایش هزینه موزون سرمایه (WACC) از ۴ به ۱۴ درصد، LCOH خالص را تقریباً خطی از ۲٫۴۰ به ۲٫۷۲ یورو بر کیلوگرم افزایش می‌دهد. این موضوع وابستگی پروژه‌های الکترولیز سرمایه‌بر به نرخ بدهی و بازده سهام‌داران را روشن می‌کند.

- ارزش‌افزایی اکسیژن جانبی: افزایش قیمت عمده‌فروشی اکسیژن از صفر تا ۱۰۰ یورو بر تن، اعتبار درآمدی خطی ایجاد می‌کند و LCOH خالص را از ۲٫۹۱ به ۲٫۱۲ یورو بر کیلوگرم و LCOS فولاد سبز را تقریباً از ۶۲۶ به ۵۸۰ یورو بر تن کاهش می‌دهد.

- ساعات کار سالانه: افزایش بهره‌برداری از ۴۰۰۰ به ۸۷۶۰ ساعت در سال، بار هزینه‌های ثابت را با روندی کاهنده پخش می‌کند. ضریب ظرفیت بالاتر سبب استفاده بهتر از سرمایه می‌شود و LCOH خالص را از حدود ۳٫۰۱ به ۲٫۴۸ یورو بر کیلوگرم می‌رساند.

- عمر اقتصادی پروژه: افزایش افق استهلاک از ۱۰ به ۳۰ سال، هزینه سرمایه سالانه را کم و LCOH خالص را از ۲٫۷۱ به ۲٫۴۶ یورو بر کیلوگرم کاهش می‌دهد. مزیت اقتصادی افزایش عمر پس از حدود ۲۰ سال بهره‌برداری به‌تدریج کمتر می‌شود.

شکل ۱۹ نشان می‌دهد تغییر بازده عملیاتی، هزینه خوراک و شوک‌های بازار چگونه آستانه رقابت اقتصادی فولاد سبز را جابه‌جا می‌کنند:



شکل 19. ماتریس حساسیت متغیرهای فنی: الف) هزینه آب خوراک؛ ب) بازده سامانه؛ پ) تغییر مرز سربه‌سر بر اثر نوسان مواد اولیه؛ ت) راندمان مصرف شیمیایی هیدروژن در کوره شفت. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

- حساسیت به قیمت آب فرایندی: افزایش هزینه آب صنعتی از صفر تا ۱۰ یورو بر تن در شکل ۱۹-الف، LCOH خالص را فقط از ۲٫۵۰ به ۲٫۶۱ یورو بر کیلوگرم می‌رساند؛ بنابراین قیمت آب در برابر هزینه برق اثر اندکی بر اقتصاد هیدروژن دارد.

- مصرف ویژه انرژی الکترولایزر: افزایش SEC از ۴۲ به ۵۶ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم هیدروژن در شکل ۱۹-ب، LCOH خالص را به‌صورت خطی از ۲٫۱۵ به حدود ۳ یورو افزایش می‌دهد و نقش تعیین‌کننده بازده استک در هزینه تولید را تأیید می‌کند.

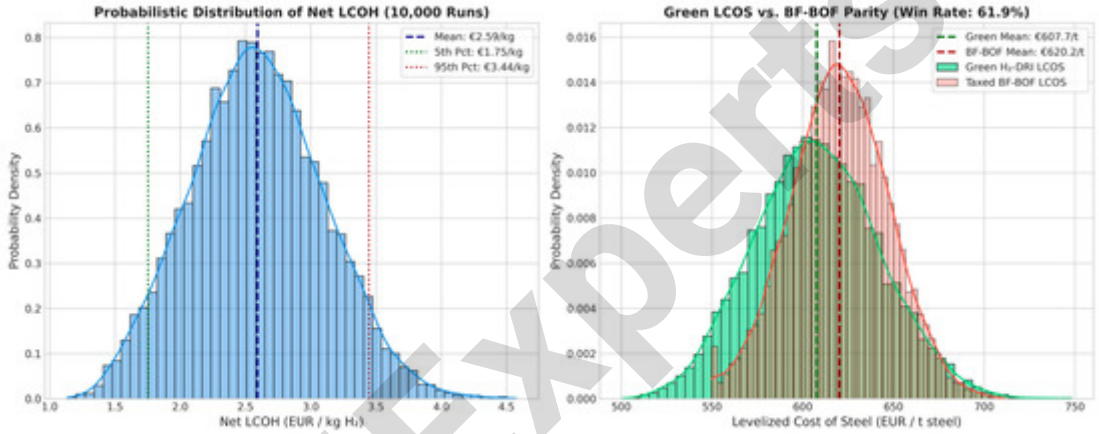
- شوک قیمت نهاده‌های سنتی: هنگامی که هزینه پایه BF-BOF به‌دلیل نوسان زغال یا سایر نهاده‌ها از ۴۰۰ به ۶۵۰ یورو بر تن افزایش یابد، در شکل ۱۹-ج سقف قیمت برق قابل‌تحمل برای فولاد سبز از ۲۸ به ۱۱۴ یورو بر مگاوات‌ساعت می‌رسد. افزایش هزینه مسیر سنتی، محدودیت برق ارزان برای رقابت‌پذیری سبز را کاهش می‌دهد.

- بازده مصرف شیمیایی هیدروژن در کوره شفت: اگر به علت کاهش استفاده شیمیایی یا اتلاف

بیشتر گاز بالاسری، مصرف ویژه هیدروژن از ۵۰ به ۷۵ کیلوگرم بر تن فولاد برسد، شکل ۱۹-د افزایش خطی LCOS فولاد سبز را از ۵۷۸ به ۶۴۱ یورو بر تن نشان می‌دهد.

۳.۸. ریسک احتمالاتی و تحلیل عدم‌قطعیت مونت‌کارلو

برای سنجش تاب‌آوری مالی یک واحد فولادسازی در نوسان واقعی بازار، ۱۰ هزار اجرای مونت‌کارلو انجام شده است. با نمونه‌گیری هم‌زمان از توزیع احتمال پارامترهای عملیاتی، ترمودینامیکی، مالی و مقرراتی، پروفایل چگالی خروجی و توزیع نقاط برابری هزینه تولید می‌شود که در شکل ۲۰ نمایش داده شده است.



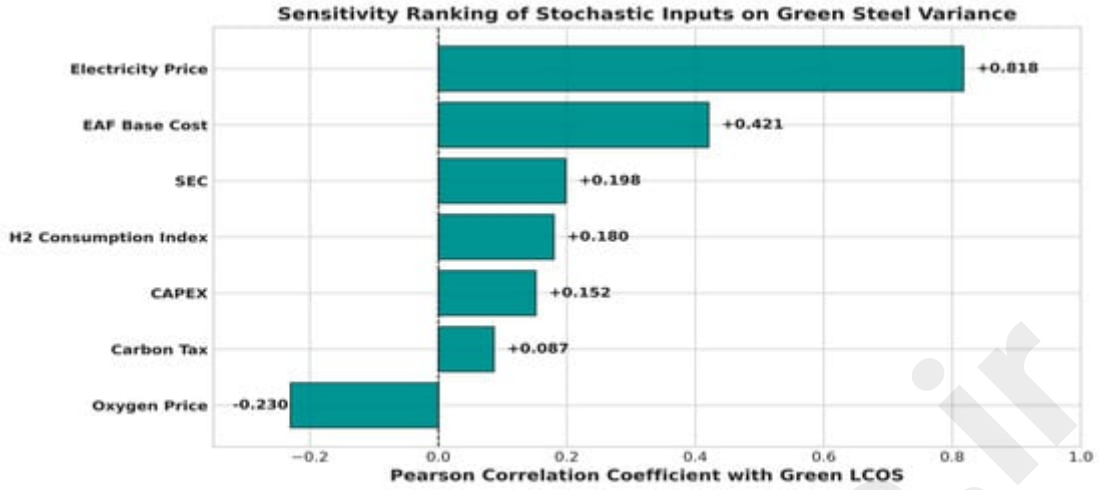
شکل 20. توزیع چگالی احتمالاتی LCOH خالص در ۱۰,۰۰۰ اجرای مونت‌کارلو. منبع: Gambelli، Soomro و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

۳.۸.۱. توزیع احتمالاتی هزینه و احتمال رقابت‌پذیری در بازار

توزیع تصادفی هزینه تولید هیدروژن در بالادست، میانگین مورد انتظار LCOH خالص را ۲٫۵۹ یورو بر کیلوگرم نشان می‌دهد. در حالت مطلوبِ صدک پنجم، هزینه تا ۱٫۷۵ یورو افت می‌کند و در ترکیب نامساعد متغیرهای بازار، مقدار صدک ۹۵ به ۳٫۴۴ یورو می‌رسد.

در پایین‌دست، هزینه هم‌سطح فولاد مسیر سبز H -DRI-EAF توزیعی نزدیک به نرمال با میانگین ۶۰۷٫۷۰ یورو بر تن دارد. مسیر رقیب BF-BOF که زیر نوسان قیمت مجوز کربن EU ETS ارزیابی شده، توزیع هزینه‌ای با میانگین ۶۲۰٫۲۰ یورو بر تن نشان می‌دهد.

طبق منحنی‌های هم‌پوشان احتمال در شکل ۲۱، نرخ پیروزی رقابت بازاری فولاد سبز ۶۱٫۹ درصد است؛ یعنی در نزدیک به دو سوم ترکیب‌های تصادفی مفروض از وضعیت فنی و بازار، مسیر هیدروژن سبز بدون نیاز به یارانه مستقیم بیشتر از روش زغال‌سنگ‌محور ارزان‌تر است.



شکل 21. نمودار تورنادو و رتبه‌بندی تأثیر متغیرهای تصادفی بر واریانس LCOS فولاد سبز بر پایه ضریب هم‌بستگی پیرسون. منبع: Soomro، Gambelli و Rossi، Energies (2026)، مجوز CC BY 4.0.

۳.۸.۲. رتبه‌بندی حساسیت و شناسایی عوامل خطر

برای شناسایی عوامل اصلی نوسان هزینه، ضرایب هم‌بستگی خطی پیرسون در ۱۰ هزار اجرا محاسبه شده‌اند و شکل ۲۱ آن‌ها را در نمودار گردبادی نمایش می‌دهد. ضرایب مربوط به قیمت برق ۰٫۸۱۸، هزینه پایه فرآوری ۰٫۴۲۱، قیمت اکسیژن منفی ۰٫۲۳۰، SEC برابر ۰٫۱۹۸، مصرف ویژه هیدروژن ۰٫۱۸۰، CAPEX برابر ۰٫۱۵۲ و قیمت کربن ۰٫۰۸۷ هستند.

ترتیب ضرایب هم‌بستگی، نکات مهمی برای تصمیم‌گیری در احداث صنعتی و کاهش ریسک نشان می‌دهد:

- غلبه تعرفه برق، با ضریب ۰٫۸۱۸: قیمت خرید برق مهم‌ترین عامل است و مربع هم‌بستگی آن نزدیک به ۶۶٫۹ درصد واریانس هزینه فولاد سبز را توضیح می‌دهد. بنابراین قرارداد خرید برق شرکتی بلندمدت با تعرفه کمتر از ۵۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، پیش‌شرط اصلی قابلیت تأمین مالی پروژه است.

- اثر هزینه فرآوری غیرهیدروژنی، با ضریب ۰٫۴۲۱: تغییر هزینه پایه کوره قوس بر اثر قیمت گندله، دسترسی به قراضه و مصرف الکترود گرافیتی، دومین عامل مهم عدم‌قطعیت کل هزینه است.

- نقش حفاظتی فروش اکسیژن، با ضریب منفی ۰٫۲۳۰: درآمدزایی از اکسیژن صنعتی با هزینه فولاد هم‌بستگی معکوس دارد. فروش اکسیژن جانبی نزدیک به نرخ ۵۰ یورو بر تن، ضربه افزایش تعرفه برق را جبران و حاشیه سود پروژه را پایدارتر می‌کند.

- شاخص‌های بازده فناوری، با ضرایب ۰٫۱۹۸ و ۰٫۱۸۰: مصرف ویژه برق استک و مصرف هیدروژن در

احیا، اثر مثبت متوسطی بر نوسان هزینه دارند. بهبود معماری سلول و کاهش SEC به سمت ۴۲ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم، از پروژه در برابر برق گران محافظت می‌کند.

- اثر محدود سرمایه اولیه، با ضریب ۰٫۱۵۲: نوسان CAPEX الکترولایزر در دامنه ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ یورو بر کیلووات کمتر از ۲٫۳ درصد واریانس کل هزینه را توضیح می‌دهد. در افق بهره‌برداری ۲۰ساله، هزینه انباشته انرژی عملیاتی به‌مراتب از استهلاک استک و تجهیزات جانبی مهم‌تر است.

- نقش مالیات کربن، با ضریب ۰٫۰۸۷: قیمت مستقیم کربن به‌سبب شدت انتشار بسیار پایین مسیر سبز، تأثیر کمی بر تغییر LCOS همان مسیر دارد؛ اما برای توجیه اقتصادی پروژه همچنان حیاتی است، زیرا هزینه مرجع رقیب BF-BOF را افزایش می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

۴.۱. نتیجه‌گیری

این پژوهش نقشه راهی جامع برای کربن‌زدایی فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی مجتمع فولاد تارانتو ارائه کرد. در سناریوی بررسی‌شده، ظرفیت تولید اولیه ۶ میلیون تن در سال از مسیر کوره‌بلند ـ کنورتور (BF-BOF) به معماری احیای مستقیم با هیدروژن سبز و کوره قوس (H -DRI-EAF) منتقل می‌شود و واحد الکترولیز AEMWE با ظرفیت ۲٫۱۶ گیگاوات و بدون فلزات گروه پلاتین از آن پشتیبانی می‌کند. یافته‌های اصلی عبارت‌اند از:

- مقیاس واحد الکترولایزر: مجموعه AEMWE با توان ۲٫۱۶ گیگاوات، تولید پیوسته ۴۵ هزار کیلوگرم هیدروژن در ساعت یا ۳۶۰ هزار تن در سال را با مصرف ویژه ۴۸ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم و بازده HHV حدود ۸۲٫۱ درصد فراهم می‌کند؛ محصول جانبی آن نیز حدود ۲٫۸۶ میلیون تن اکسیژن خالص در سال است. استفاده از کاتالیست‌های فلزات واسطه فراوان Ni-Fe-Co-Mn به‌جای فلزات نجیب، ریسک تأمین مواد بحرانی را کم و توسعه ظرفیت در مقیاس گیگاوات را امکان‌پذیرتر می‌کند.

- هزینه هم‌سطح تولید: در شرایط پایه با CAPEX برابر ۷۵۰ یورو بر کیلووات و برق ۵۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، LCOH خالص پس از اعتبار حدود ۰٫۴۰ یورو به ازای هر کیلوگرم هیدروژن از فروش

اکسیژن، برابر ۲٫۵۲ یورو بر کیلوگرم و LCOS فولاد سبز ۶۰۳٫۲۶ یورو بر تن است. این رقم از هزینه BF-BOF مشمول مالیات کربن، برابر ۶۲۰ یورو بر تن در قیمت EU ETS حدود ۷۹ یورو بر تن CO، پایین‌تر است. در سناریوی بهینه با CAPEX برابر ۵۰۰ و برق ۳۰ یورو، LCOH به ۱٫۳۹ و هزینه فولاد به ۵۳۵٫۸۱ یورو می‌رسند.

- ترتیب محرک‌های هزینه: قیمت خرید برق مهم‌ترین متغیر اقتصادی پروژه است. هر تغییر ۵ یورو بر مگاوات‌ساعت، LCOH را ۰٫۲۴ یورو بر کیلوگرم و LCOS را ۱۴٫۴۰ یورو بر تن جابه‌جا می‌کند. در مقابل، تغییر ۱۰۰ یورو بر کیلووات در CAPEX الکترولایزر فقط حدود ۴ یورو بر تن بر هزینه فولاد اثر دارد. بنابراین قرارداد خرید برق شرکتی پایدار و بلندمدت از قیمت اولیه تجهیزات برای قابلیت تأمین مالی مهم‌تر است.

- آستانه‌های برابری هزینه: در CAPEX پایه ۷۵۰ یورو بر کیلووات، اگر برق از ۵۵٫۸۱ یورو بر مگاوات‌ساعت ارزان‌تر باشد، فولاد سبز از BF-BOF مشمول مالیات کربن رقابتی‌تر می‌شود. کاهش CAPEX به ۵۰۰ یورو این سقف را تا ۵۹٫۲۳ یورو بالا می‌برد. نرخ سربه‌سر کربن نسبت به BF-BOF حدود ۶۸٫۵۴ یورو بر تن CO است، اما برای ارزان‌ترشدن از احیای مستقیم گازطبیعی با انتشار کمتر، قیمت کربن حدود ۱۷۱٫۸۳ یورو بر تن لازم می‌شود.

- مزیت محیط‌زیستی: مسیر H -DRI-EAF شدت انتشار فرایندی و انرژی مورد محاسبه را ۸۸٫۹ درصد کاهش می‌دهد و به ۰٫۲۰ تن CO بر تن فولاد می‌رساند؛ شامل ۰٫۰۸ تن دامنه ۱ و ۰٫۱۲ تن دامنه ۲. در ظرفیت سالانه ۶ میلیون تن تارانتو، انتشار از ۱۰٫۸۰ به ۱٫۲۰ میلیون تن CO در سال می‌رسد و خالص کاهش انتشار ۹٫۶۰ میلیون تن است؛ این امر طبق مفروضات مقاله حدود ۷۵۸٫۴ میلیون یورو از هزینه سالانه مقرراتی کربن جلوگیری می‌کند.

شبیه‌سازی ۱۰ هزار اجرای مونت‌کارلو نیز تاب‌آوری مالی چارچوب را ارزیابی کرد. میانگین LCOH خالص ۲٫۵۹ با انحراف معیار ۰٫۵۱ یورو بر کیلوگرم و میانگین LCOS فولاد سبز ۶۰۷٫۷۰ با انحراف معیار ۳۴٫۴۲ یورو بر تن گزارش شد. نرخ رقابت‌پذیری فولاد سبز در سناریوهای تصادفی بازار، عملیات، ترمودینامیک و مقررات ۶۱٫۹ درصد بود، بی‌آنکه یارانه سرمایه‌ای مستقیم بیشتری فرض شود.

۴.۲. چشم‌انداز آینده

با وجود ارائه یک مدل یکپارچه و قابل‌استفاده، برای رسیدن از ارزیابی امکان‌سنجی حالت پایدار به قطعیت

مهندسی در سطح اجرا، پژوهش‌های تکمیلی ضروری است.

نخستین محدودیت، فرض تولید تجدیدپذیر با ضریب ظرفیت ثابت و شرایط پایدار است. در پژوهش‌های آینده باید تولید ساعتی باد و خورشید، نوسان آن‌ها و رابطه این نوسان با اندازه ذخیره بافر هیدروژن مدل شود. چنین تحلیل پویایی مبادله میان بزرگ‌گرفتن ظرفیت الکترولایزر، ظرفیت ذخیره و کاهش اجباری تولید برق را روشن می‌کند و هزینه واقعی هیدروژن تحویلی در شرایط اقلیمی مدیترانه را دقیق‌تر به دست می‌دهد.

دوم، فناوری AEMWE که برای احیای مستقیم کاملاً الکترولیتی در حدود TRL 6 است، با مشکلات دوام ناشی از تجمع حباب، اضافه‌ولتاژ بالا و تخریب لایه کاتالیست در چگالی جریان صنعتی روبه‌روست. لازم است سینتیک فرسایش استک و فاصله تعویض دوره‌ای آن مستقیماً وارد جریان نقدی ProFAST شود تا هزینه هم‌سطح بر پایه عمر واقعی غشا و الکترود، نه افق بهره‌برداری ایده‌آل، محاسبه شود.

سوم، تبدیل BF-BOF به واحد بسیار خودکار DRI-EAF پیامدهای زیرساختی و اجتماعی‌ـاقتصادی چشمگیری دارد که از محدوده فنی این تحلیل فراتر می‌روند. پژوهش‌های بعدی باید مرحله گذار از متان به هیدروژن، نیاز موقت به گازطبیعی و تأسیسات گازرسانی و تبدیل LNG در سواحل تارانتو، و جابه‌جایی و بازآموزی نیروی کار را در مدل وارد کنند تا مسیر اجراییِ مرحله‌بندی‌شده و واقع‌بینانه از سوخت فسیلی به هیدروژن سبز مشخص شود.

چهارم، ارزیابی محیط‌زیستی می‌تواند با تحلیل چرخه عمر کامل «گهواره تا دروازه» توسعه یابد؛ تحلیلی که انتشار نهفته ساخت الکترولایزر، تأمین گندله سنگ‌آهن، لجستیک قراضه و بازیافت مواد استک در پایان عمر را دربرگیرد. پیوند این LCA با مدل فنی‌ـاقتصادی موجود، برآورد مزیت واقعی اقلیمی را کامل‌تر و مبنای صدور گواهی فولاد سبز سازگار با CBAM را محکم‌تر می‌کند.

در نهایت، H2I-TEA عمداً به‌صورت شیءگرا و قابل‌تعمیم طراحی شده است و باید انتقال‌پذیری آن در مجتمع‌های یکپارچه موجود دیگر، با شدت کربن متفاوت شبکه برق، تعرفه‌های انرژی و دسترسی متغیر به قراضه، سنجیده شود. مطالعات مقایسه‌ای چندسایتی نشان می‌دهند آیا آستانه‌های برابری هزینه و شاخص‌های کاهش انتشار به‌دست‌آمده برای تارانتو در بازارها و مقررات دیگر صنعت فولاد جهان نیز معتبر هستند یا نه؛ این اعتبارسنجی برای فراگیرکردن متالورژی هیدروژنی ضروری است.

معماری چندلایه H2I-TEA در مقایسه با ابزارهای مالی ثابت سنتی، چارچوبی توسعه‌پذیر برای مطالعات آینده کربن‌زدایی ایجاد می‌کند. چهار لایه اصلی آن در چند جهت قابلیت گسترش دارند:

- اتصال پویای شبکه و نوسان تجدیدپذیر، با توسعه لایه‌های ۱ و ۳: ورود پروفایل‌های واقعی تولید لحظه‌ای خورشید و باد همراه قیمت ساعتی برق عمده‌فروشی، برای بهینه‌سازی دنبال‌کردن بار

الکترولایزر و برنامه تخلیه و شارژ مخزن بافر.

- یکپارچه‌سازی صنعتی میان‌بخشی، با توسعه لایه ۲: گسترش اتصال موازنه جرم و انرژی فراتر از فولادسازی اولیه و مدل‌کردن قطب‌های مشترک هیدروژن سبز برای صنایع سخت‌کربن‌زدا، مانند آمونیاک سبز، سنتز متانول و حمل‌ونقل سنگین.

- کمی‌سازی پیشرفته عدم‌قطعیت با یادگیری ماشین، با توسعه لایه ۴: تقویت موتور ریسک مونت‌کارلو با الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای شبیه‌سازی هم‌بستگی غیرخطی قیمت چند کالای اصلی در شرایط تحول قوانین EU ETS و نوسان بازار جهانی.

۴.۲.۱. زمان‌بندی گذار و ریسک مالی EU ETS در دوره پل گاز طبیعی

کربن‌زدایی مجتمع Acciaierie d’Italia در تارانتو ابتدا از دوره گذار احیای مستقیم گازطبیعی تحت مدیریت شرکت DRI d’Italia S.p.A. عبور خواهد کرد. جایگزینی زغال با گاز طبیعی در این مرحله، شدت انتشار «دروازه تا دروازه» را از حدود ۱٫۸۵ به ۰٫۷۰ تن CO بر تن کاهش می‌دهد؛ بااین‌حال کارکرد کوره گازطبیعی بدون جذب کربن، با سخت‌ترشدن قواعد نظام تجارت انتشار اتحادیه اروپا (EU ETS) ریسک مالی قابل‌توجهی دارد.

بر اساس اصلاحات EU ETS در دستورالعمل 2023/959 و اجرای تدریجی سازوکار CBAM، سهمیه رایگان انتشار برای فولادسازان اولیه به‌صورت تدریجی از ۱۰۰ درصد در ۲۰۲۵ به صفر در سال ۲۰۳۴ کاهش می‌یابد. جدول ۲۰ بدهی‌های مقرراتی پیش‌بینی‌شده مسیر NG-DRI را در برنامه سه‌مرحله‌ای گذار نشان می‌دهد.

مرحله گذار	زمان‌بندی	خوراک غالب	شدت کربن (tCO /t)	پیش‌بینی قیمت EU ETS ((EUR/tCO	سهم مجوز رایگان	بدهی کربن بدون مهار (EUR/t)	راهبرد کاهش ریسک
مرحله 1: پل گاز طبیعی	2029–2026	گاز طبیعی با 10% H	0.65	85	100%–75	13.81–0	ریسک پایین با سهمیه رایگان
مرحله 2: احتراق ترکیبی	2033–2030	گاز طبیعی با 50% H	0.40	125	48%–14	43–26	احتراق ترکیبی 50% هیدروژن، مالیات کربن را 38.5% کم می‌کند
مرحله 3: هیدروژن سبز 100%	2034 به بعد	H سبز با 60 kg/t	0.20	≤171.83	0%	34.37؛ برابری خالص	حذف انتشار فسیلی با هیدروژن 100%

جدول ۲۰ بیان می‌کند NG-DRI بدون جذب کربن در مرحله دوم در معرض ریسک مالی فزاینده است. در سال ۲۰۳۲، با افت سهمیه رایگان به ۲۲ درصد و قیمت ETS برابر ۱۲۵ یورو بر تن CO، جریمه کربن مؤثر این فرایند به ۳۹ یورو بر تن فولاد می‌رسد. با فرض گازطبیعی ۳۵ یورو بر مگاوات‌ساعت، مسیر هیدروژن سبز برای برابری کامل هزینه سوخت به کربن ۱۷۱٫۸۳ یورو بر تن نیاز دارد؛ اما ترکیب تدریجی هیدروژن در مرحله دوم، ابزار مهم کنترل ریسک است. اختلاط ۵۰ درصد حجمی هیدروژن در خوراک کوره شفت DRI می‌تواند تا رسیدن ظرفیت الکترولایزر به جانشینی ۱۰۰ درصد هیدروژن سبز در ۲۰۳۴، مواجهه با هزینه کربن را محدود کند.

۴.۲.۲. هم‌افزایی با حمل‌ونقل سنگین هیدروژنی و بهینه‌سازی جریان پیل سوختی PEMFC

تأسیسات هیدروژن سبز گیگاواتی در قطب‌های صنعتی بزرگ، مانند مجموعه AEMWE با توان ۲٫۱۶ گیگاوات تارانتو، فقط برای احیای سنگ‌آهن ارزش ندارند؛ بلکه می‌توانند زیرساخت انرژی پاک منطقه‌ای را نیز با اتصال چند صنعت تقویت کنند. اگر ایستگاه‌های سوخت‌رسانی هیدروژن به خودروهای سنگین کنار خطوط تأمین صنعتی ساخته شوند، سرمایه مخازن فشاربالای ۳۵ تا ۷۰۰ بار و واحدهای خالص‌سازی میان تولید فولاد و ناوگان لجستیکی تقسیم می‌شود. این زیرساخت مشترک، هزینه هم‌سطح هیدروژن شبکه کامیون‌های برقی پیل‌سوختی را کم می‌کند. برای بهبود اقتصاد حمل‌ونقل هیدروژنی سنگین، افزایش بازده استک پیل‌سوختی در پایین‌دست ضروری است. مطالعات اخیر مهندسی پیل‌سوختی نشان داده‌اند بهینه‌سازی انتقال واکنش‌دهنده‌ها در پیل‌های غشای تبادل پروتون (PEMFC)، به‌ویژه با موانع غیرهمگن در کانال‌های جریان صفحه دوقطبی، توزیع جریان را تنظیم، آب‌گرفتگی را کاهش و انتقال جرم همرفتی در لایه کاتالیست را بهبود می‌دهد. این بهینه‌سازی میدان جریان، چگالی توان خالص و بهره‌برداری از سوخت در حمل‌ونقل سنگین را بالا می‌برد و پیوندی فناورانه میان تولید هیدروژن گیگاواتی و لجستیک کم‌کربن شکل می‌دهد. [149]

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان: مفهوم‌پردازی، روش‌شناسی، برنامه‌نویسی و مدیریت داده‌ها: A.R.S.؛ اعتبارسنجی: F.R. و A.M.G.؛ تحلیل رسمی: F.R.، A.R.S. و A.M.G.؛ تحقیق و منابع: F.R. و A.M.G. به‌همراه A.R.S.؛ نگارش پیش‌نویس: A.R.S.؛ بازبینی و ویرایش متن و مصورسازی: هر سه نویسنده؛ سرپرستی، مدیریت پروژه و جذب حمایت مالی: F.R. همه نویسندگان نسخه منتشرشده را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

تأمین مالی

این پژوهش حمایت مالی بیرونی دریافت نکرده است.

دسترسی به داده‌ها

مشارکت‌های اصلی پژوهش در متن همین مقاله ارائه شده‌اند و برای دریافت اطلاعات بیشتر می‌توان با نویسندگان مسئول مکاتبه کرد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام کرده‌اند که تعارض منافعی ندارند.

فهرست نمادها

در جدول زیر، نمادهای به‌کاررفته در مدل و مقدار مبنای هر پارامتر آمده است.

نماد	شرح پارامتر	مقدار مبنا	واحد
P sys	توان کل موردنیاز آرایه الکترولایزر	2.16	GW
P inst	ظرفیت نصب‌شده الکترولایزر	2,160,000	kW
H2	دبی جرمی هیدروژن	45,000 (2,160,000/h) ((yr	kg/h/t/yr
SEC AEMWE	مصرف ویژه انرژی استک	48	kWh/kg H 2
O2	نرخ استوکیومتری تولید اکسیژن جانبی	357,600	kg/h
y O2	ضریب استوکیومتری تولید اکسیژن	7.9467	kg O 2 /kg H 2
water	نرخ برداشت آب خام	495,000	kg/h
spec / f water	ضریب مصرف ویژه آب خام	11	kg H 2 O/kg H 2
P elec	تعرفه عمده‌فروشی برق قرارداد cPPA	50.00 (0.050)	(EUR/MWh (EUR/kWh
f BOP	سهم توان مصرفی تجهیزات جانبی (BOP)	0.078 (7.8%)	–

SteelExperts.ir

CAPEX unit	سرمایه‌گذاری واحد سامانه الکترولایزر	750	EUR/kW
OPEX fixed	هزینه ثابت سالانه بهره‌برداری و نگهداری الکترولایزر	29.16	MEUR/yr
P O2	قیمت فروش اکسیژن جانبی در بازار	50	EUR/t O 2
R O2	اعتبار درآمد اکسیژن جانبی	0.3973	EUR/kg H 2
LCOH gross	هزینه هم‌سطح ناخالص هیدروژن	2.92	EUR/kg H 2
LCOH net	هزینه هم‌سطح خالص هیدروژن	2.52	EUR/kg H 2
V buffer	ظرفیت ذخیره بافر پرفشار	540	t H 2
t buffer	مدت تأمین مستقل ذخیره پرفشار	12	hours
steel	ظرفیت اسمی تولید سالانه فولاد خام	6	Mt/yr
I H2	شاخص مصرف ویژه هیدروژن در احیا	60	kg H 2 /t steel
C base,Green	هزینه پایه فرایند تولید فولاد سبز بدون هیدروژن	436.4	EUR/t steel
Green	شدت انتشار باقیمانده گازهای گلخانه‌ای از دروازه تا دروازه	0.2	tCO 2 /t steel
P carbon	قیمت مجوز انتشار کربن در EU ETS	79	EUR/tCO 2
LCOS Green	هزینه هم‌سطح فولاد سبز	603.4	EUR/t steel
CRF	ضریب بازیافت سرمایه	0.10185	–
r WACC	هزینه موزون سرمایه	0.08	–
N	عمر عملیاتی پروژه	20	years

فهرست اختصارات

اختصارات فنی مورد استفاده در پژوهش در جدول زیر تعریف شده‌اند.

IEA	آژانس بین‌المللی انرژی
tCO_2	تن دی‌اکسیدکربن
BF-BOF	کوره‌بلند ـ کنورتور اکسیژنی
H_2I-TEA	تحلیل فنی ـ اقتصادی یکپارچه‌سازی هیدروژن
AEMWE	الکترولایزر آب با غشای تبادل آنیونی
CCUS	جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن
CNY	یوان چین؛ عنوان منبع «Chinese Yen» است

DRI-EAF	احیای مستقیم آهن ـ کوره قوس الکتریکی
COREX	فرایند احیا با زغال‌سنگ
FINEX	فرایند احیای مستقیم نرمه سنگ‌آهن FINEX
Mt	میلیون تن متریک
COG	گاز کک‌سازی
DRI	آهن احیای مستقیم (آهن اسفنجی)
PEMWE	الکترولایزر آب با غشای تبادل پروتون
PGM	فلزات گروه پلاتین
AWE	الکترولایزر قلیایی آب
HYBRIT	پروژه آهن‌سازی هیدروژنی HYBRIT
HBIS-COG	گاز کک‌سازی شرکت فولاد HBIS
TRL	سطح آمادگی فناوری
EU ETS	نظام تجارت انتشار اتحادیه اروپا
CBAM	سازوکار تعدیل کربن در مرز
GSCC	شورای جهانی اقلیم و فولاد
SBT	اهداف انتشار مبتنی بر علم
PPA	قرارداد خرید برق
IPCEI	پروژه‌های مهم دارای منافع مشترک اروپایی
MIMIT	وزارت بنگاه‌ها و ساخت ایتالیا
WWF	صندوق جهانی طبیعت
ILVA	نام پیشین مجتمع فولاد تارانتو
GHGs	گازهای گلخانه‌ای
GW	گیگاوات
OpenMDAO	تحلیل و بهینه‌سازی طراحی چندرشته‌ای
Pro-FAST	ابزار سناریونویسی تحلیل مالی تولید
NREL	آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر آمریکا
LCOH	هزینه هم‌سطح هیدروژن
LCOS	هزینه هم‌سطح فولاد
HHV	ارزش حرارتی بالا
WACC	هزینه موزون سرمایه

SteelExperts.ir

SEC	مصرف ویژه انرژی
OPEX	هزینه عملیاتی
CAPEX	هزینه سرمایه‌ای
cPPA	قرارداد خرید برق فیزیکی شرکتی
CP	ضریب ظرفیت
BOP	تجهیزات جانبی سامانه
BAT	بهترین فناوری‌های در دسترس
CRF	ضریب بازیافت سرمایه
DCF	جریان نقدی تنزیل‌شده
MEA	مجموعه غشا و الکترود
GSCC	شورای جهانی اقلیم و فولاد
NG	گاز طبیعی
UHP	الکترودهای گرافیتی فوق‌توان
ATR	ریفرمینگ اتوترمال
CCS	جذب و ذخیره‌سازی کربن
ZLD	تخلیه مایع صفر

منابع علمی

1. Bararzadeh Ledari, M.; Khajehpour, H.; Akbarnavasi, H.; Edalati, S. Greening Steel Industry by Hydrogen: Lessons Learned for the Developing World. Int. J. Hydrogen [Energy **2023**, 48, 36623–36649. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

2. Devlin, A.; Kossen, J.; Goldie-Jones, H.; Yang, A. Global Green Hydrogen-Based Steel Opportunities Surrounding High Quality Renewable Energy and Iron Ore Deposits. Nat. Commun. **2023**, 14, 2578. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [[PubMed

3. Kim, J.; Sovacool, B.K.; Bazilian, M.; Griffiths, S.; Lee, J.; Yang, M.; Lee, J. Decarbonizing the Iron and Steel Industry: A Systematic Review of Sociotechnical Systems, Technological Innovations, and Policy Options. Energy Res. Soc. Sci.

[**2022**, 89, 102565. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

4. Xi, L.; Qianguo, L.; Hasan, M.; Ming, L.; Qiang, L.; Jia, L.; Alisa, W.; Muxin, L.; Francisco, A. Assessing the Economics of CO_2 Capture in China's Iron/Steel Sector: A Case Study. Energy Procedia **2019**, 158, 3715–3722. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

5. Decarbonising Steel: National Circumstances and Priority Actions. Available online: https://climateactiontracker.org/publications/decarbonising-steel/ (accessed on 23 June 2026).

6. Fan, Z.; Friedmann, S.J. Low-Carbon Production of Iron & Steel: Technology Options, Economic Assessment, and Policy. Joule **2021**, 5, 829–862. [Google [Scholar] [CrossRef] [Scilit

7. Liu, X.; Wu, P.; Liu, X.; Zhang, Z.; Ai, X. The Utilization of Carbonated Steel Slag as a Supplementary Cementitious Material in Cement. Materials **2024**, 17, 4574. [[Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

8. Rodríguez Diez, J.; Tomé-Torquemada, S.; Vicente, A.; Reyes, J.; Orcajo, G.A. Decarbonization Pathways, Strategies, and Use Cases to Achieve Net-Zero CO_2 Emissions in the Steelmaking Industry. Energies **2023**, 16, 7360. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

9. Iron and Steel Technology Roadmap—Analysis. Available online: https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap (accessed on 23 June 2026).

10. Algers, J.; Åhman, M.; Nilsson, L.J. Steel Decarbonization—From Optimization to Transformation. Annu. Rev. Environ. Resour. **2025**, 50, 433–454. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

11. Watari, T.; McLellan, B. Decarbonizing the Global Steel Industry in a Resource-Constrained Future—A Systems Perspective. Philos. Trans. Ser. A Math. Phys. Eng. [Sci. **2024**, 382, 20230233. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

12. Industry—Energy System. Available online:

.(https://www.iea.org/energy-system/industry (accessed on 23 June 2026

13. COP27: UN Report Shows Pathways to Carbon-Neutrality in “Energy Intensive” Steel, Chemicals and Cement Industries. UNECE. Available online: .(https://unece.org/media/press/372890 (accessed on 23 June 2026

14. World Steel Association. Sustainability Indicators Report 2025; World Steel [Association: Brussels, Belgium, 2025. [Google Scholar

15. Steel Climate Impact 2025: An International Benchmarking of Energy and GHG Intensities. Available online: https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-2025-an-international .(-benchmarking-of-energy-and-ghg-intensities (accessed on 23 June 2026

16. Steel—Breakthrough Agenda Report 2025—Analysis. Available online: https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2025/steel (accessed on .(23 June 2026

17. Gajdzik, B.; Wolniak, R.; Grebski, W. An Econometric Analysis of CO_2 Emission Intensity in Poland’s Blast Furnace–Basic Oxygen Furnace Steelmaking Process. [Sustainability **2025**, 17, 4045. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

18. Arras, M.; Jeandey, T.-F.; He, Y.; Gupta, P.; Li, Z.; Ma, L. Decarbonizing China’s Iron and Steel Industry: Hydrogen-Based Mitigation Pathway and Techno-Economic Implications. Int. J. Hydrogen Energy **2025**, 154, 149946. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

19. Wu, W.; Tang, Q.; Xue, W.; Shi, X.; Zhao, D.; Liu, Z.; Liu, X.; Jiang, C.; Yan, G.; Wang, J. Quantifying China’s Iron and Steel Industry’s CO_2 Emissions and Environmental Health Burdens: A Pathway to Sustainable Transformation. Environ. Sci. [Ecotechnol. **2023**, 20, 100367. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

20. Share of EAF Route in Global Steel Production Likely to Rise to 40% in 2030—BigMint Analysis. SEAISI. Available online: .(https://www.seaisi.org/details/25179 (accessed on 23 June 2026

21. Shi, N.; Xie, Y.; Watson, P.; Wu, Z.; Xu, X.; Buntine, M.; Wu, H.; Shao, Z. Green Steel

Production: An Overview. Green Chem. **2026**, 28, 8667–8693. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

22. Zhang, J.; Guo, H.; Yang, G.; Wang, Y.; Chen, W. Sustainable Transition Pathways for Steel Manufacturing: Low-Carbon Steelmaking Technologies in Enterprises. [Sustainability **2025**, 17, 5329. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

23. Adhikari, N.; Khanam, S. Toward Sustainable Production: Emerging Trends in Iron and Steel Making. ChemBioEng Rev. **2024**, 11, e202300055. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

24. World Steel Association. Sustainability Indicators 2024 Report; World Steel [Association: Brussels, Belgium, 2024. [Google Scholar

25. Vasquez, J. Benefits of EAF Steelmaking|Circularity in Steel Part 3; Nucor: [Charlotte, NC, USA, 2025. [Google Scholar

26. Biswal, P.; Avdijaj, J.; Parente, A.; Coussement, A. Decarbonization of Iron and Steel Industries: A Review of Computational Advancements to Enhance Furnace Energy Efficiency in the BF-BOF Route. Next Energy **2026**, 11, 100578. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

27. Shahabuddin, M.; Brooks, G.; Rhamdhani, M.A. Decarbonisation and Hydrogen Integration of Steel Industries: Recent Development, Challenges and Technoeconomic Analysis. J. Clean. Prod. **2023**, 395, 136391. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

28. Kim, Y.R.; Lee, J.C.; Son, S.H.; Yoon, S.; Jeong, D.H. Simulation Study, Techno-Economic, and Environmental Assessment of Hydrogen-Based DRI Production for Sustainable Steel Industry. Processes **2026**, 14, 651. [Google Scholar] [CrossRef] [[Scilit

29. Song, J.; Jiang, Z.; Bao, C.; Xu, A. Comparison of Energy Consumption and CO_2 Emission for Three Steel Production Routes—Integrated Steel Plant Equipped with Blast Furnace, Oxygen Blast Furnace or COREX. Metals **2019**, 9, 364. [Google [Scholar] [CrossRef] [Scilit

30. Shang, X.; Yin, W.; Pan, J.; Wang, M.; Wang, H.; Yang, K.; Xiao, Q. Advances of Artificial Intelligence Applications to Low-Carbon Metallurgy of Iron and Steel. [Carbon Neutr. Syst. **2026**, 2, 7. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

31. Bazaluk, O.; Kieush, L.; Koveria, A.; Schenk, J.; Pfeiffer, A.; Zheng, H.; Lozynskyi, V. Metallurgical Coke Production with Biomass Additives: Study of Biocoke Properties for Blast Furnace and Submerged Arc Furnace Purposes. Materials **2022**, 15, [1147. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

32. The COREX® Process for Cost-Efficient and Eco-Friendly Hot Metal Production. Available online: https://www.primetals.com/en/portfolio/solutions/ironmaking/direct-reduction/cor .(ex/ (accessed on 23 June 2026

33. Discover the Technology That Is Making Steel Production More Sustainable. Available online: https://newsroom.posco.com/en/discover-the-tech-making-steel-more-sustainab .(le-finex/ (accessed on 23 June 2026

34. Energy Transitions Commission. Making Net-Zero Steel Possible; Energy [Transitions Commission: London, UK, 2022. [Google Scholar

35. Smelting Reduction. Available online: https://www.iipinetwork.org/wp-content/Ietd/content/smelting-reduction.html .((accessed on 23 June 2026

36. Ariyama, T.; Takahashi, K.; Kawashiri, Y.; Nouchi, T. Diversification of the Ironmaking Process Toward the Long-Term Global Goal for Carbon Dioxide Mitigation. J. Sustain. Metall. **2019**, 5, 276–294. [Google Scholar] [CrossRef] [[Scilit

37. FINEX® Smelting Reduction Process Using Iron Ore Fines. Available online: https://www.primetals.com/en/portfolio/solutions/ironmaking/direct-reduction/fin .(ex/ (accessed on 23 June 2026

38. Yang, Y.; Holappa, L.; Saxén, H.; van der Stel, J. Ironmaking. In Treatise on Process

Metallurgy; Seetharaman, S., Guthrie, R., McLean, A., Seetharaman, S., Sohn, H.Y., Eds.; Elsevier B.V.: Amsterdam, The Netherlands, 2024; Volume 3, pp. 7–88. ISBN [978-0-323-85896-0. [Google Scholar

39. Hu, C.; Han, X.; Li, Z.; Zhang, C. Comparison of CO_2 Emission between COREX and Blast Furnace Iron-Making System. J. Environ. Sci. **2009**, 21, S116–S120. [Google [Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

40. Remus, R.; Aguado, M.M.; Roudier, S.; Delgado, S.L. Best Available Techniques (BAT) Reference Document:For:Iron and Steel Production:Industrial Emissions Directive 2010/75/EU:(Integrated Pollution Prevention and Control). Available online: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC69967 .((accessed on 11 August 2026

41. Kohitlhetse, I.; Chiririwa, H. Emerging Trends and Opportunities in Hydrogen-Based Direct Reduction for Sustainable Low-Carbon-Emission Steelmaking. Processes [**2026**, 14, 1529. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

42. Rosner, F.; Papadias, D.; Brooks, K.; Yoro, K.; Ahluwalia, R.; Autrey, T.; Breunig, H. Green Steel: Design and Cost Analysis of Hydrogen-Based Direct Iron Reduction. [Energy Environ. Sci. **2023**, 16, 4121–4134. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

43. Vogl, V.; Åhman, M.; Nilsson, L.J. Assessment of Hydrogen Direct Reduction for Fossil-Free Steelmaking. J. Clean. Prod. **2018**, 203, 736–745. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

44. Bhaskar, A.; Assadi, M.; Nikpey Somehsaraei, H. Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen. Energies [**2020**, 13, 758. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

45. Patisson, F.; Mirgaux, O. Hydrogen Ironmaking: How It Works. Metals **2020**, 10, [922. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

46. Shen, J.; Zhang, Q.; Tian, S.; Li, X.; Liu, J.; Tian, J. The Role of Hydrogen in Iron and Steel Production: Development Trends, Decarbonization Potentials, and Economic Impacts. Int. J. Hydrogen Energy **2024**, 92, 1409–1422. [Google Scholar]

[[CrossRef] [Scilit

47. Haikarainen, C.; Shao, L.; Pettersson, F.; Saxén, H. Mathematical Optimization Modeling for Scenario Analysis of Integrated Steelworks Transitioning towards Hydrogen-Based Reduction. Energy **2024**, 305, 132366. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

48. Elegbeleye, I.; Oguntona, O.; Elegbeleye, F. Green Hydrogen: Pathway to Net Zero Green House Gas Emission and Global Climate Change Mitigation. Hydrogen **2025**, [6, 29. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

49. Hassan, S.U.; Syed, M.W.; Kazmi, W.W.; Waqas, M.; Shamsi, S.S.A.; Kariim, I.; Ahmed, S.S.; Unar, I.N.; Al-Khulaifi, F.M.; Hussain, A. A Life Cycle Assessment Review of Climate Impacts from Low-Carbon Hydrogen Production Technologies. [Energy Fuels **2026**, 40, 5944–5991. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

50. Bekrit, L.; Seladji, C.; Bekrit, L.; Seladji, C. A Multi-Criteria Techno-Economic Evaluation of PEM and Alkaline Electrolyzers for Green Hydrogen Production Using Fuzzy BWM, TOPSIS, and WASPAS. Clean Technol. Recycl. **2026**, 6, 56–74. [[Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

51. Idris, A.; Man, Z.; Maulud, A.S.; Khan, M.S. Effects of Phase Separation Behavior on Morphology and Performance of Polycarbonate Membranes. Membranes **2017**, 7, [21. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

52. PatSnap Insights Team. PEM Electrolyzer Catalyst Technology Landscape 2026; [PatSnap: Singapore, 2026. [Google Scholar

53. Staudacher, M.; Goes, D.; Ahn, S.; Vrucak, D.; Gießmann, T.; Bauer-Siebenlist, B.; Leißner, T.; Rudolph, M.; Fleischer, J.; Friedrich, B.; et al. Conceptual Recycling Chain for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers—Case Study Involving Review-Derived Model Stack. Recycling **2025**, 10, 121. [Google Scholar] [CrossRef] [[Scilit

54. Volk, E.K.; Kreider, M.E.; Kwon, S.; Alia, S.M. Recent Progress in Understanding the Catalyst Layer in Anion Exchange Membrane Electrolyzers—Durability, Utilization,

[and Integration. EES Catal. **2024**, 2, 109–137. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

Kim, J.H.; Jo, H.J.; Han, S.M.; Kim, Y.J.; Kim, S.Y. Recent Advances in .55
Electrocatalysts for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis: Design
Strategies and Characterization Approaches. Energy Mater. **2025**, 5, 500099.
[[Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

AEM vs. PEM Electrolysers|Hydrogen Production in the Enapter Handbook. .56
Available online:
https://handbook.enapter.com/knowledge_base/aem_technology.html (accessed
.(on 19 August 2026

Rey, J.; Delgado, C.; Segura, F.; Andújar, J.M. Modularisation Analysis for Scaling .57
Hydrogen Production: High-Power Single-Electrolyser vs. Multiple-Smaller-
[Electrolyser Plants. Hydrogen **2026**, 7, 4. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

Electrolysers. Available online: .58
https://www.ansaldoenergia.com/offering/solutions-for-the-transition/electrolyser
.(s (accessed on 1 August 2026

Wang, C.R.; Stansberry, J.M.; Mukundan, R.; Chang, H.-M.J.; Kulkarni, D.; Park, .59
A.M.; Plymill, A.B.; Firas, N.M.; Liu, C.P.; Lang, J.T.; et al. Proton Exchange
Membrane (PEM) Water Electrolysis: Cell-Level Considerations for Gigawatt-Scale
Deployment. Chem. Rev. **2025**, 125, 1257–1302. [Google Scholar] [CrossRef]
[[Scilit] [PubMed

Riaz, M.A.; Trogadas, P.; Aymé-Perrot, D.; Sachs, C.; Dubouis, N.; Girault, H.; .60
Coppens, M.-O. Water Electrolysis Technologies: The Importance of New Cell
Designs and Fundamental Modelling to Guide Industrial-Scale Development.
[Energy Environ. Sci. **2025**, 18, 5190–5214. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

Vincent, I.; Bessarabov, D. Low Cost Hydrogen Production by Anion Exchange .61
Membrane Electrolysis: A Review. Renew. Sustain. Energy Rev. **2018**, 81,
[1690–1704. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

Son, Y.J.; Mirshekari, G.; Raaijman, S.J.; Corbett, P.J. Technology Landscape of .62

Anion Exchange Membrane Water Electrolyzers: Where Are We Today? ACS Energy Lett. **2025**, 10, 3058–3063, Correction in ACS Energy Lett. **2025**, 10, 3775–3776. [https://doi.org/10.1021/acsenergylett.5c01933. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

63. Global Hydrogen Review 2026—Analysis. Available online: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2026 (accessed on 31 August 2026).

64. Sugawara, Y.; Sankar, S.; Miyanishi, S.; Illathvalappil, R.; Gangadharan, P.K.; Kuroki, H.; Anilkumar, G.M.; Yamaguchi, T. Anion Exchange Membrane Water Electrolyzers: An Overview. J. Chem. Eng. Jpn. **2023**, 56, 2210195. [Google Scholar] [CrossRef] [[Scilit

65. Aminaho, E.N.; Aminaho, N.S.; Aminaho, F. Techno-Economic Assessments of Electrolyzers for Hydrogen Production. Appl. Energy **2025**, 399, 126515. [Google [Scholar] [CrossRef] [Scilit

66. Loh, A.; Li, X.; Sluijter, S.; Shirvanian, P.; Lai, Q.; Liang, Y. Design and Scale-Up of Zero-Gap AEM Water Electrolysers for Hydrogen Production. Hydrogen **2023**, 4, [257–271. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

67. Shaya, N.; Glöser-Chahoud, S. A Review of Life Cycle Assessment (LCA) Studies for Hydrogen Production Technologies through Water Electrolysis: Recent [Advances. Energies **2024**, 17, 3968. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

68. Muhyuddin, M.; Santoro, C.; Osmieri, L.; Ficca, V.C.A.; Friedman, A.; Yassin, K.; Pagot, G.; Negro, E.; Konovalova, A.; Lindquist, G.; et al. Anion-Exchange-Membrane Electrolysis with Alkali-Free Water Feed. Chem. Rev. **2025**, 125, [6906–6976. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

69. Hua, D.; Huang, J.; Fabbri, E.; Rafique, M.; Song, B. Development of Anion Exchange Membrane Water Electrolysis and the Associated Challenges: A Review. [ChemElectroChem **2023**, 10, e202200999. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

70. Ahmad Kamaroddin, M.F.; Sabli, N.; Tuan Abdullah, T.A.; Siajam, S.I.; Abdullah, L.C.; Abdul Jalil, A.; Ahmad, A. Membrane-Based Electrolysis for Hydrogen Production:

[A Review. Membranes **2021**, 11, 810. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

71. Liu, L.; Ma, H.; Khan, M.; Hsiao, B.S. Recent Advances and Challenges in Anion Exchange Membranes Development/Application for Water Electrolysis: A Review. [Membranes **2024**, 14, 85. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

72. Emin, A.; Liu, J.; Sun, X.; Jiang, H. Recent Progress in Anion Exchange Membrane Water Electrolysis: From Membrane Materials to System Components. Membranes [**2026**, 16, 185. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

73. Lei, J.; Ma, H.; Qin, G.; Guo, Z.; Xia, P.; Hao, C. A Comprehensive Review on the Power Supply System of Hydrogen Production Electrolyzers for Future Integrated [Energy Systems. Energies **2024**, 17, 935. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

74. Santos, A.L.; Cebola, M.-J.; Santos, D.M.F. Towards the Hydrogen Economy—A Review of the Parameters That Influence the Efficiency of Alkaline Water [Electrolyzers. Energies **2021**, 14, 3193. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

75. PEM Water Electrolysis: The Acid Trade-Off, Iridium and PFAS. Available online: https://hydroxpand.com/en/blog/2026-08-29-what-is-pem-water-electrolysis/ .((accessed on 31 August 2026

76. Kim, D.; Oh, L.S.; Park, J.H.; Kim, H.J.; Lee, S.; Lim, E. Perovskite-Based Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reaction in Alkaline Media: A Mini Review. [Front. Chem. **2022**, 10, 1024865. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

77. Vinodh, R.; Kalanur, S.S.; Natarajan, S.K.; Pollet, B.G. Recent Advancements of Polymeric Membranes in Anion Exchange Membrane Water Electrolyzer (AEMWE): A Critical Review. Polymers **2023**, 15, 2144. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [[PubMed

78. Lee, M.; Park, J.-S. Enhanced Performance and Durability of Pore-Filling Membranes for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis. Membranes **2024**, [14, 269. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

79. Wu, L.; Wang, Q.; Yuan, S.; Mei, X.; Wang, Q.; Zou, X.; Zhang, K.; Huo, X.; Shi, X.; Pan, Z.; et al. Unrevealing the Interaction Between Electrode Degradation and Bubble

Behaviors in an Anion Exchange Membrane Water Electrolyzer. Adv. Sci. **2025**, 12, [2412962. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

.80 Yu, Y.; Wang, F.; Hao, X.; Liu, H.; Wang, B.; Gao, J.; Qi, Y. Multiphysics Modelling and Optimization of Hydrogen-Based Shaft Furnaces: A Review. Processes **2026**, 14, [138. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.81 Fei, Y.; Guan, X.; Kuang, S.; Yu, A.; Yang, N. A Review on the Modeling and Simulation of Shaft Furnace Hydrogen Metallurgy: A Chemical Engineering [Perspective. ACS Eng. Au **2024**, 4, 145–165. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.82 Pei, M.; Petäjäniemi, M.; Regnell, A.; Wijk, O. Toward a Fossil Free Future with HYBRIT: Development of Iron and Steelmaking Technology in Sweden and Finland. [Metals **2020**, 10, 972. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.83 Vogl, V.; Olsson, O.; Nykvist, B. Phasing out the Blast Furnace to Meet Global [Climate Targets. Joule **2021**, 5, 2646–2662. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.84 World's First 1.2million Ton Hydrogen Steel Making Pilot Plant Successfully Delivered Its First Green DRI Products from HBIS. Available online: .(https://www.hbisco.com/en/news/group/t101/2075 (accessed on 4 July 2026

.85 China's First 1 Million Ton Hydrogen-Based Shaft Furnace Began Production at Baosteel Zhanjiang. Global Hydrogen Hub. 2023. Available online: https://globalhydrogenhub.com/chinas-first-1-million-ton-hydrogen-based-shaft-f .(urnace-began-production-at-baosteel-zhanjiang/ (accessed on 23 June 2026

.86 Wu, J. Progresses of Hydrogen-Based Shaft Furnace DRI in China. China Hydrogen .Bulletin, 30 October 2025

.87 Baosteel Subsidiary Starts China's First Large-Scale Zero-Carbon Steel Facility. SEAISI. Available online: https://www.seaisi.org/details/27687 (accessed on 4 .(July 2026

.88 Özgün, Ö.; Dirba, I.; Gutfleisch, O.; Ma, Y.; Raabe, D. Green Ironmaking at Higher H2 Pressure: Reduction Kinetics and Microstructure Formation During Hydrogen-Based Direct Reduction of Hematite Pellets. J. Sustain. Metall. **2024**, 10,

[1127–1140. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed

89. Chair of Materials Physics and Institute for Physical Metallurgy and Materials Physics. Sustainable Ironmaking through Solid-State Reduction of Iron Ores with Hydrogen: Influence of H2 Gas Pressure on Reduction Kinetics and Microstructure Evolution. IMM|RWTH Aachen University|EN. Available online: https://www.imm.rwth-aachen.de/cms/imm/forschung/publikationen/~baxdjp/details/?file=1020705&lidx=1 (accessed on 4 July 2026).

90. Mastropasqua, L. Demonstration of a SOEC Hydrogen Direct Reduction (HDR) at the Toledo, Ohio Steel Plant. Available online: https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-07/CX-030809.pdf (accessed on 23 June 2026).

91. Watari, T.; McLellan, B. Global Demand for Green Hydrogen-Based Steel: Insights from 28 Scenarios. Int. J. Hydrogen Energy **2024**, 79, 630–635. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

92. [SEI. Green Steel Tracker; SEI: Oaks, PA, USA, 2021. [Google Scholar

93. Energy Transitions Commission. The Net Zero Steel Sector Transition Strategy; [Energy Transitions Commission: London, UK, 2021. [Google Scholar

94. Institut, W. Low-Carbon Technologies—Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy. Available online: https://wupperinst.org/en/topics/energy/low-carbon-technologies/ (accessed on 4 July 2026).

95. European Parliament and Council. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 Establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism (Text with EEA Relevance). Off. J. Eur. Union **2023**, 130, [52–104. [Google Scholar

96. European Carbon Prices Rose to €79 per Ton at the End of May. GMK 1779955264. Available online: https://gmk.center/en/news/european-carbon-prices-rose-to-e79-per-ton-at-the-

.(end-of-may/ (accessed on 23 June 2026

.97 Italy Increased Steel Production by 3.6% y/y in 2025. GMK1768995010. Available online: https://gmk.center/en/news/italy-increased-steel-production-by-3-6-y-y-in-2025 .(/ (accessed on 23 June 2026

.98 Dall'Osto, G.; Mombelli, D.; Mapelli, C. Consequences of the Direct Reduction and Electric Steelmaking Grid Creation on the Italian Steel Sector. Metals **2024**, 14, [311. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.99 Hubatka, S.; Buľko, B.; Baricová, D.; Fogaraš, L.; Pylypenko, A.; Dubec, D.; Demeter, J.; Demeter, P. The Impact of Implementing Carbon Border Adjustment Mechanisms on the Steel Industry until 2034: A Forecasting Study. Eng. Proc. [**2024**, 64, 15. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.100 European Steel in Action 2025. Available online: https://www.eurofer.eu/publications/reports-or-studies/european-steel-in-action-2025 .(accessed on 19 June 2026

.101 The Geopolitical and Geoeconomic Aspects of Italy's Arctic Strategy. Istituto Affari Internazionali. Available online: https://www.iai.it/en/publications/c41/geopolitical-and-geoeconomic-aspects-ital ys-arctic-strategy .(accessed on 19 June 2026

.102 Hydrogen to Decarbonize Steel: First Trial Launched in Italy. Available online: https://www.tenaris.com/en/news/2024/hydrogen-for-steel-decarbonization .((accessed on 19 June 2026

.103 Global Steel Climate Council. The Steel Climate Standard; Global Steel Climate [Council: Washington, DC, USA, 2023. [Google Scholar

.104 HYDRA: The Decarbonization of Steel Industry The Key Role of Hydrogen in Steel Production. Available online: https://www.rina.org/en/media/projects/hydra-project .((accessed on 20 June 2026

.105 Mio, A.; Danielis, R.; Carrosio, G.; Pricl, S. Decarbonization Pathways for the Italian

Steel Sector: Environmental, Economic and Social Implications. Chem. Eng. Trans. [**2025**, 117, 325–330. [Google Scholar] [CrossRef

106. Steel | Federacciai. Available online: https://federacciai.it/english/steel/ (accessed on 23 June 2026).

107. Kotas, D.A.M. Italy Steel Industry: Facilities, Resources & Analysis. Available online: https://www.steelonthenet.com/resources/countries/italy.html (accessed on 4 July 2026).

108. Tonelli, F.; Short, S.; Taticchi, P. Case Study of ILVA, Italy. In Innovative Solutions: Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing; [Universitätsverlag der TU Berlin: Berlin, Germany, 2013. [Google Scholar

109. Acciaierie d'Italia Taranto Has Decided to Close Blast Furnace No.1. Available online: https://www.steelradar.com/en/acciaierie-ditalia-taranto-has-decided-to-close-blast-furnace-no1/ (accessed on 20 June 2026).

110. ADI in E.A.: One Billion Euro Investment in Maintenance. Confirmation of the Timetable for the Restart of Two Blast Furnaces|EN. Available online: https://www.acciaierieditalia.com/en/press-releases/ADI-one-billion-euro-investment-in-maintenance/ (accessed on 4 July 2026).

111. DRI d'Italia|Invitalia. Available online: http://www.invitalia.it/en/chi-siamo/il-gruppo/dri-ditalia (accessed on 4 July 2026).

112. Ministero delle Imprese e del Made in Italy. MIMIT ANNOUNCEMENT: SALE OF ILVA GROUP AND STEEL MILLS OF ITALY GROUP. Available online: https://ambabuja.esteri.it/en/news/dall_ambasciata/2024/08/bando-mimit-vendita-del-gruppo-ilva-e-del-gruppo-acciaierie-ditalia/ (accessed on 4 July 2026).

113. Haas, L. Italy Assesses ADI Bids as Deadline Closes; EUROMETAL: Luxembourg, [2026. [Google Scholar

114. Annual Report: European Steel in Action 2026. Available online:

https://www.eurofer.eu/publications/brochures-booklets-and-factsheets/annual-r
.(eport-european-steel-in-action-2026 (accessed on 20 June 2026

.115 Fischedick, M.; Marzinkowski, J.; Winzer, P.; Weigel, M. Techno-Economic Evaluation of Innovative Steel Production Technologies. J. Clean. Prod. **2014**, 84, [563–580. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.116 Wang, C.; Walsh, S.D.C.; Weng, Z.; Haynes, M.W.; Summerfield, D.; Feitz, A. Green Steel: Synergies between the Australian Iron Ore Industry and the Production of Green Hydrogen. Int. J. Hydrogen Energy **2023**, 48, 32277–32293. [Google [Scholar] [CrossRef] [Scilit

.117 Cao, T.; Sugiyama, M.; Ju, Y. Prospects of Regional Supply Chain Relocation for Iron & Steel Industry Decarbonization: A Case Study of Japan and Australia. Resour. Conserv. Recycl. **2024**, 209, 107804, Corrigendum in Resour. Conserv. Recycl. **2025**, 212, 107929. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107929. [[Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.118 Energy Transitions Commission. Industrial Transformation 2050; Energy [Transitions Commission: London, UK, 2019. [Google Scholar

.119 Acciaierie d'Italia Announces Details for Relaunch of Taranto Site. Available online: https://www.steelorbis.com/steel-news/latest-news/acciaierie-ditalia-announces-
.(details-for-relaunch-of-taranto-site-1435631.htm (accessed on 4 July 2026

.120 ISO 14044:2006; Environmental Management—Life Cycle .Assessment—Requirements and Guidelines. ISO: Geneva, Switzerland, 2006

.121 Bernat, R.; Milewski, J.; Dybinski, O.; Martsinchyk, A.; Shuhayeu, P. Review of AEM Electrolysis Research from the Perspective of Developing a Reliable Model. [Energies **2024**, 17, 5030. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.122 Noor Azam, A.M.I.; Ragunathan, T.; Zulkefli, N.N.; Masdar, M.S.; Majlan, E.H.; Mohamad Yunus, R.; Shamsul, N.S.; Husaini, T.; Shaffee, S.N.A. Investigation of Performance of Anion Exchange Membrane (AEM) Electrolysis with Different Operating Conditions. Polymers **2023**, 15, 1301. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit]

[[PubMed

123. Olaitan, D.; Bertagni, M.; Porporato, A. The Water Footprint of Hydrogen Production. Sci. Total Environ. **2024**, 927, 172384. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [[PubMed

124. Greenhouse Gas Emission Intensity of Electricity Generation in Europe. Available online: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1 (accessed on 31 August 2026).

125. IRENA. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5° C Climate Goal; Irena: Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2020; ISBN [978-92-9260-295-6. [Google Scholar

126. Vasyliv, O.; Kovalenko, O.; Vasyliv, B. Comparative Analysis of Desalination Technologies: Energy, Environmental Impact, and Freeze Desalination Potential for Zero Liquid Discharge Systems. Desalin. Water Treat. **2026**, 326, 101814. [Google [Scholar] [CrossRef] [Scilit

127. Benavides, K.; Gurgel, A.; Morris, J.; Mignone, B.; Chapman, B.; Kheshgi, H.; Herzog, H.; Paltsev, S. Mitigating Emissions in the Global Steel Industry: Representing CCS and Hydrogen Technologies in Integrated Assessment Modeling. Int. J. Greenh. [Gas Control **2024**, 131, 103963. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

128. Franco, A.; Giovannini, C. Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives. Sustainability [**2023**, 15, 16917. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

129. Fuhrlaender, D.; Vermeulen, B.; Schnuelle, C. Green Hydrogen Transformation of the Iron and Steel Production System: An Integrated Operating Concept for System-Internal Balance, Lower Emissions, and Support for Power System Stability. Appl. [Energy **2025**, 381, 125104. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

130. Ishmam, S.; Heinrichs, H.; Winkler, C.; Bayat, B.; Lahnaoui, A.; Agbo, S.; Pena Sanchez, E.U.; Franzmann, D.; Oijeabou, N.; Koerner, C.; et al. Mapping Local Green

Hydrogen Cost-Potentials by a Multidisciplinary Approach. Int. J. Hydrogen Energy [**2024**, 87, 1155–1170. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.131 Margutti, J.M.; Schiedeck, M.; Morsch, P.; Deutz, S.; Khadhraoui, S.; Wolfinger, T.; Peschel, A. Towards Green Steel from Hydrogen-Based Direct Reduction of Low-Grade Iron Ores: Techno-Economic and Greenhouse Gas Emissions Assessment. [Int. J. Hydrogen Energy **2026**, 235, 155073. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.132 Hönig, F.; Rupakula, G.D.; Duque-Gonzalez, D.; Ebert, M.; Blum, U. Enhancing the Levelized Cost of Hydrogen with the Usage of the Byproduct Oxygen in a Wastewater Treatment Plant. Energies **2023**, 16, 4829. [Google Scholar] [CrossRef] [[Scilit

.133 Eckl, F.; Moita, A.; Castro, R.; Neto, R.C. Valorization of the By-Product Oxygen from Green Hydrogen Production: A Review. Appl. Energy **2025**, 378, 124817. [Google [Scholar] [CrossRef] [Scilit

.134 Mohammadpour, H.; Cord-Ruwisch, R.; Pivrikas, A.; Ho, G. Utilisation of Oxygen from Water Electrolysis—Assessment for Wastewater Treatment and Aquaculture. [Chem. Eng. Sci. **2021**, 246, 117008. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.135 Patisson, F.; Mirgaux, O.; Birat, J.-P. Hydrogen Steelmaking. Part 1: Physical Chemistry and Process Metallurgy. Matér. Tech. **2021**, 109, 303. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

.136 Rechberger, K.; Spanlang, A.; Sasiain Conde, A.; Wolfmeir, H.; Harris, C. Green Hydrogen-Based Direct Reduction for Low-Carbon Steelmaking. Steel Res. Int. [**2020**, 91, 2000110. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.137 World Steel Association. World Steel in Figures 2024; World Steel Association: [Brussels, Belgium, 2024. [Google Scholar

.138 Publications. Available online: https://www.energypeacepartners.com/publications .((accessed on 20 May 2025

.139 MCC Metallic Group. Steelmaking Pathways Compared: CO_2 Reduction, Energy Exposure, and Operational Benefits vs BF–BOF; MCC Metallic Group—Shaping the

[Future of Steel: Samut Prakan, Thailand, 2026. [Google Scholar

140. Gray, J.S.; Hwang, J.T.; Martins, J.R.R.A.; Moore, K.T.; Naylor, B.A. OpenMDAO: An Open-Source Framework for Multidisciplinary Design, Analysis, and Optimization. Struct. Multidiscip. Optim. **2019**, 59, 1075–1104. [Google Scholar] [CrossRef] [[Scilit

141. NatLabRockies/ProFAST 2026. Available online: https://github.com/NatLabRockies/ProFAST/releases (accessed on 23 June 2026).

142. Panda, R.K.; Serre, G.; Fouda-Onana, F.; Bultel, Y.; Schott, P. Performance Evaluation of the Anion Exchange Membrane Based Water Electrolysis. In Proceedings of the 2022 10th International Conference on Systems and Control [(ICSC), Marseille, France, 23–25 November 2022; pp. 102–107. [Google Scholar

143. Kirschen, M.; Badr, K.; Pfeifer, H. Influence of Direct Reduced Iron on the Energy Balance of the Electric Arc Furnace in Steel Industry. Energy **2011**, 36, 6146–6155. [[Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

144. Anameric, B.; Kawatra, S.K. Direct Iron Smelting Reduction Processes. Miner. [Process. Extr. Metall. Rev. **2008**, 30, 1–51. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

145. Platts Iron Ore Index (IODEX) Price Assessment. Available online: https://www.spglobal.com/energy/en/pricing-benchmarks/assessments/metals/iron-ore-index-iodex-price-explained (accessed on 1 September 2026).

146. Germany's Ex-Warehouse Scrap Prices Remain Stable in June. Available online: https://www.steelorbis.com/steel-prices/steel-prices-market-analyses/scrap-and-raw-materials/germanys-ex-warehouse-scrap-prices-remain-stable-in-june-1460543.htm (accessed on 1 September 2026).

147. Overview—Energy—Eurostat. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/overview?pk_source=google&pk_medium=cpc&pk_campaign=eurostat_search_2026&pk_content=energy&gad_source=1&gad_campaignid=23976986324&gbraid=0AAAABCR00wIpkWxWlg3-

pnjHwnsrIVyRc&gclid=Cj0KCQjw79nUBhCgARIsADSHka1Ium3FX3ccCRZdV6lmwRXx1UGOODiMe_l_DAO1cWiVQH8qDXZ2ygsaAnvPEALw_wcB (accessed on 1 September 2026).

148. Eula. Available online: https://eula.eu/ (accessed on 1 September 2026).

149. Qi, W.; Yu, L.; Zhao, S.; Guo, Y.; Ge, S.; Zhang, Y.; Cheng, J.; He, Z. Mechanism of PEMFC Output Performance Improvement via Non-Uniform Bluff Body Structures in Bipolar Plate Flow Channels: Flow Field Regulation and Mass Transfer Enhancement. Renew. Energy **2026**, 271, 126020. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit]

© 2026 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

اطلاعات منبع و حقوق انتشار

عنوان انگلیسی: Decarbonizing Steel Industry via Hydrogen: A Techno-Economic Evaluation

نویسندگان: Abdul Rehman Soomro، Alberto Maria Gambelli و Federico Rossi؛ **نشریه:** Energies، سال ۲۰۲۶.

DOI: 10.3390/en19194500؛ متن اصلی منتشرشده توسط MDPI.

متن حاضر ترجمه فارسی مقاله اصلی است و با ذکر تغییر زبان و نام منبع، بر پایه مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) منتشر می‌شود. تصاویر ۱، ۲ و ۴ به علت روشن‌نبودن حقوق بازنشر آثار اقتباس‌شده/شخص ثالث بازنشر نشده‌اند. حقوق تمامی تصاویر مجاز و زیرنویس‌ها به صاحبان اصلی تعلق دارد.

اعداد و نتایج مطابق اثر اصلی نقل شده‌اند. برخی مقادیر متن و جدول‌های منبع با یکدیگر سازگار نیستند؛ برای ارجاع علمی و تصمیم‌های مهندسی باید نسخه اصلی کنترل شود.

نسخه آنلاین مقاله: https://landing.steelexperts.ir/2026/10/26/sx-r009-decarbonizing-steel-hydrogen-techno-economic/

SteelExperts.ir