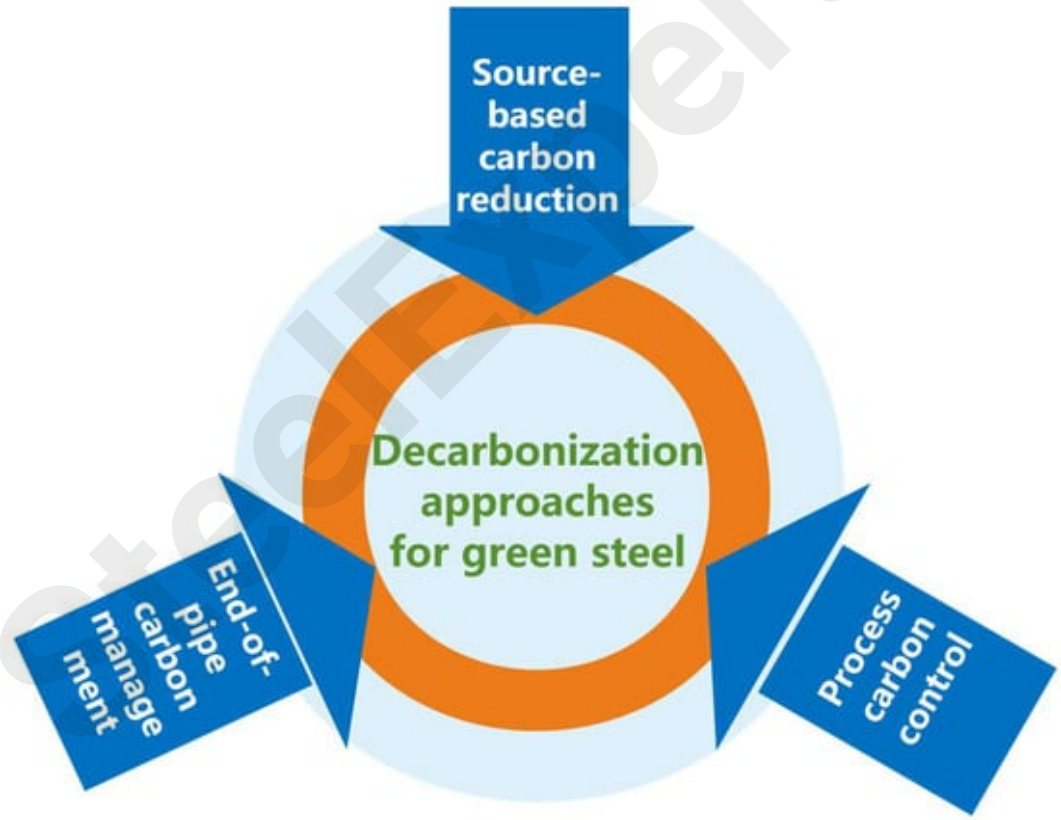
مرکز دانش شبکه خبرگان صنعت فولاد

مسیرهای گذار پایدار در تولید فولاد؛ فناوری‌های کم‌کربن در کارخانه‌های فولادسازی

مقالات تخصصی | شبکه خبرگان صنعت فولاد | ۱۴۰۵/۰۸/۰۵

مرور تجربیات صنعتی کاهش انتشار در مسیر کوره بلند–کنورتور و کوره قوس، از شارژ گندله و قراضه تا احیای هیدروژنی، کنترل هوشمند، CCUS و بازیافت گرما و سرباره.



چکیده

در شرایطی که بحران اقلیم جدی‌تر شده و تحقق اهداف بی‌طرفی کربنیِ توافق پاریس ضرورت بیشتری یافته

است، صنعت فولاد ــ یکی از منابع بزرگ انتشار گازهای گلخانه‌ای ــ با چالشی اساسی روبه‌روست: چگونه می‌توان بدون مختل‌کردن تولید، به کمک فناوری‌های جدید فولادسازی کم‌کربن، مسیر توسعه پایدار را پیمود؟ این مقاله فناوری‌های کاهش کربن را در سه نقطه از زنجیره تولید، یعنی **مبدأ، درون فرایند و انتهای خط**، برای دو مسیر اصلی بررسی می‌کند: مسیر بلندِ **کوره بلند–کنورتور اکسیژنی (BF–BOF)** و مسیر کوتاهِ **کوره قوس الکتریکی (EAF)**.

در مسیر BF–BOF، استفاده بیشتر از گندله در شارژ کوره بلند و افزایش سهم قراضه، انتشار را از مبدأ کاهش می‌دهد. در مرحله فولادسازی، دمش ترکیبی اکسیژن، دی‌اکسید کربن و آهک از کف کنورتور می‌تواند کنترل فرایند و بهره‌وری را بهبود دهد. در انتهای زنجیره نیز بازیافت CO و فناوری‌های جذب کربن برای کربن‌زدایی عمیق‌تر مطرح‌اند. در مقابل، مسیر EAF بر کوره‌های قوس پربازده، برق تجدیدپذیر و کوره‌های شفت احیای آهن با هیدروژن تکیه دارد؛ کنترل هوشمند ذوب، بازیافت مرحله‌ای گرمای اتلافی و استفاده مجدد از سرباره نیز اجزای مکمل این مسیرند.

مرور تجربه‌های صنعتی نشان می‌دهد ظرفیت کاهش انتشار، توجیه اقتصادی و محدودیت‌های اجرا از پروژه‌ای به پروژه دیگر تفاوت چشمگیری دارد. در هر دو مسیر، احیای مستقیم مبتنی بر هیدروژن و کوره قوس تغذیه‌شده با برق سبز امیدبخش‌اند، اما تحقق کاهش عمیق کربن به هماهنگی سیاست‌گذاری، نوآوری فنی و همکاری در کل زنجیره تأمین نیاز دارد. مقاله حاضر ضمن سنجش فناوری‌های موجود، راهبردهای عملی برای استقرار آن‌ها در بنگاه‌های فولادی را مرور می‌کند.

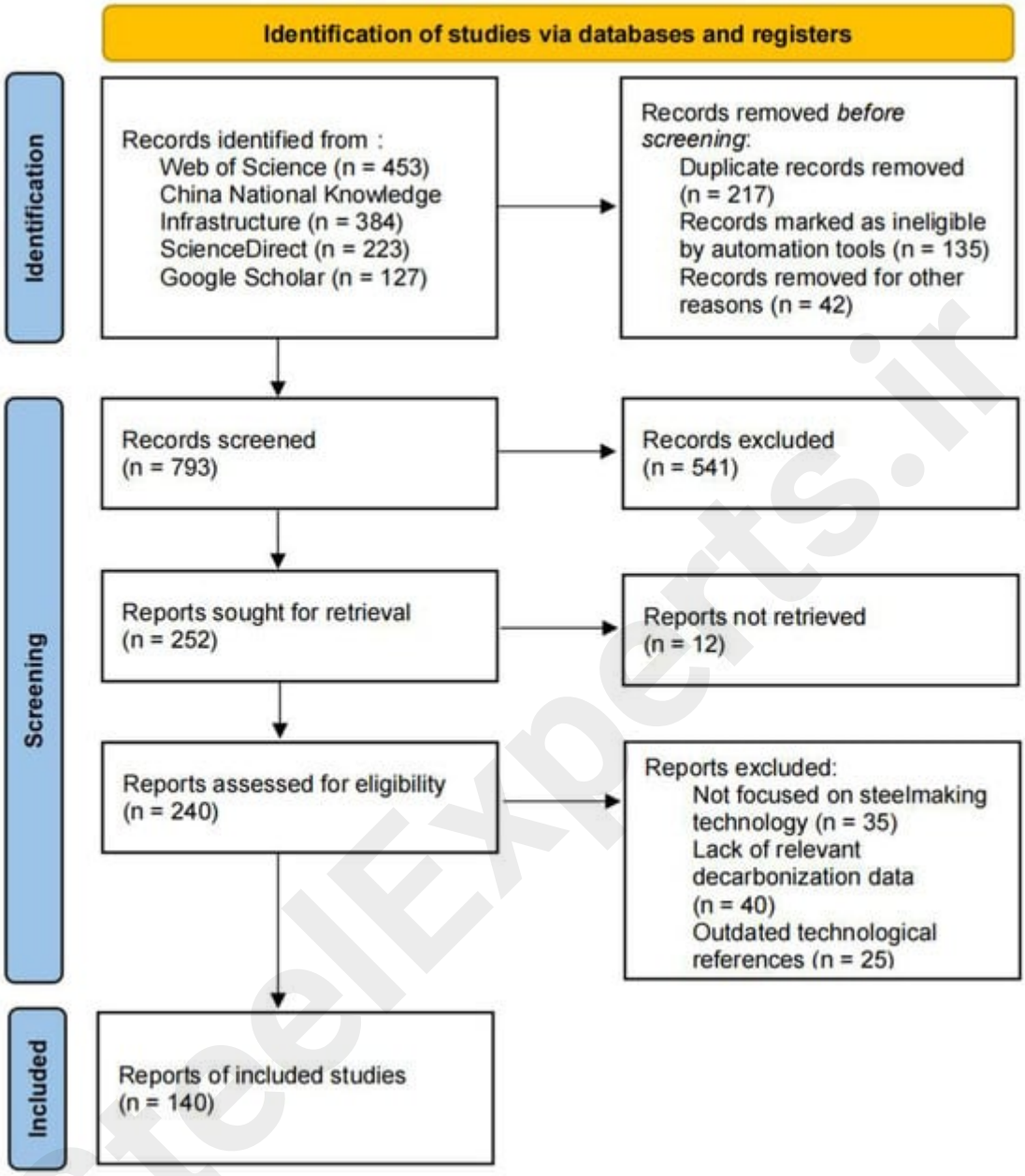
واژگان کلیدی: فولادسازی کم‌کربن؛ کاهش انتشار CO؛ متالورژی مبتنی بر هیدروژن؛ کوره قوس الکتریکی پربازده؛ جذب، استفاده و ذخیره کربن (CCUS).

۱. انتخاب مقالات و روش پژوهش

۱.۱. چارچوب PRISMA

نویسندگان برای انتخاب منابع و تحلیل نظام‌مند مطالعات از چارچوب **PRISMA**، یعنی دستورالعمل استاندارد گزارش مرورهای نظام‌مند و فراتحلیل‌ها، استفاده کرده‌اند. این چارچوب چهار مرحله دارد: شناسایی منابع، غربالگری، ارزیابی صلاحیت و انتخاب نهایی. گردش کار در شکل ۱ آمده است.

SteelExperts.ir



شکل 1. نمودار انتخاب و غربالگری منابع پژوهش مطابق روش PRISMA (منبع: مقاله اصلی، CC BY 4.0)

۲ـ۱. شناسایی منابع

جست‌وجوی اولیه در چهار پایگاه انجام شد: Web of Science با **۴۵۳** رکورد، زیرساخت ملی دانش چین (CNKI) با **۳۸۴** رکورد، ScienceDirect با **۲۲۳** رکورد و Google Scholar با **۱۲۷** رکورد؛ در مجموع **۱۱۸۷** رکورد.

پیش از غربالگری، **۲۱۷** رکورد تکراری، **۱۳۵** رکورد نامرتبط شناسایی‌شده با ابزارهای خودکار و **۴۲** رکورد به دلایل دیگر کنار گذاشته شدند.

۱ـ۳. غربالگری

عنوان و چکیده **۷۹۳** رکورد بررسی شد. برای **۲۵۲** گزارش، متن کامل درخواست شد که **۱۲** مورد در دسترس نبود؛ بنابراین **۲۴۰** گزارش وارد ارزیابی صلاحیت شدند.

۱ـ۴. دلایل حذف

از میان گزارش‌های بررسی‌شده، **۳۵** مورد به فناوری فولادسازی مربوط نبودند، **۴۰** مورد داده مرتبطی درباره کربن‌زدایی نداشتند و **۲۵** مورد بر مراجع فناورانه منسوخ تکیه می‌کردند. این سه گروه از تحلیل نهایی حذف شدند.

۱ـ۵. انتخاب نهایی

پس از تکمیل غربالگری و اعمال معیارهای حذف، **۱۴۰ گزارش** برای تحلیل نهایی باقی ماند.

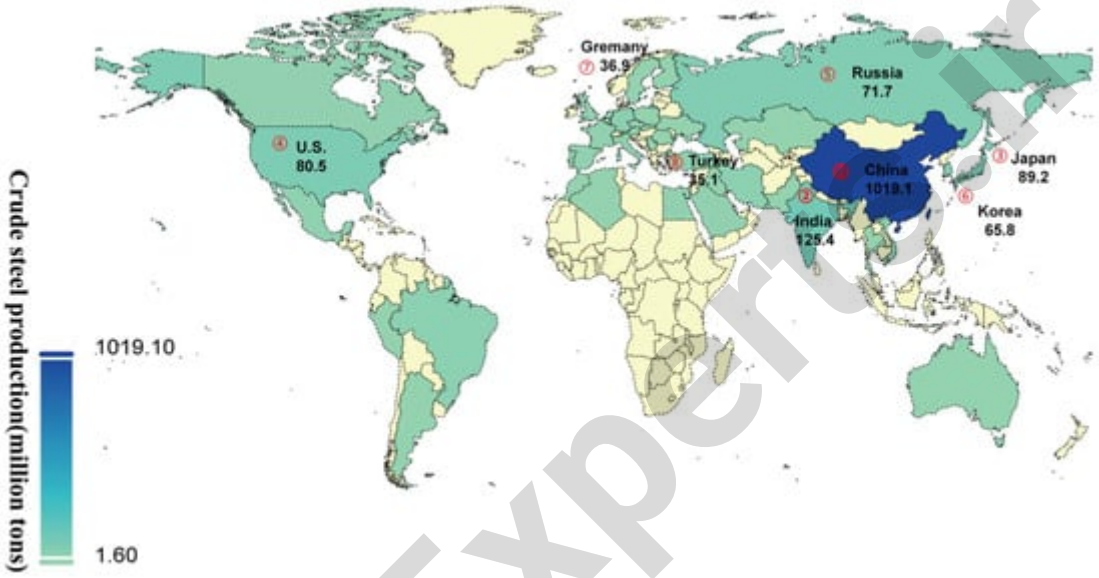
۲. مقدمه

صنعت فولاد حدود **۷ تا ۱۱ درصد** از انتشار جهانی کربن را به خود اختصاص می‌دهد [۱، ۲] و در چارچوب توافق پاریس با چالش دستیابی به انتشار خالص صفر تا سال **۲۰۵۰** مواجه است. از ابتدای قرن بیست‌ویکم، برنامه‌های بین‌المللی بزرگی برای تغییر الگوی متعارف فولادسازی شکل گرفته‌اند: **ULCOS** در اروپا (۲۰۰۴)، **COURSE50** در ژاپن (۲۰۰۸)، **HYBRIT** در سوئد (۲۰۱۶)، **SALCOS** در آلمان (۲۰۱۹) و **ROSIE** در ایالات متحده (۲۰۲۴). وجه مشترک این برنامه‌ها حرکت به سوی احیای مبتنی بر هیدروژن، جذب کربن و انرژی پاک است [۳، ۴].

هدف این بررسی، سنجش آثار واقعی فناوری‌های کم‌کربن اجراشده در بنگاه‌های صنعتی از نظر کاهش انتشار و صرفه‌جویی انرژی است. نویسندگان با گردآوری نمونه‌های عملیاتی و مقایسه مسیرهای توسعه، می‌کوشند پشتوانه‌ای فنی برای تصمیم‌گیری درباره گذار کم‌کربن در صنعت فولاد فراهم کنند.

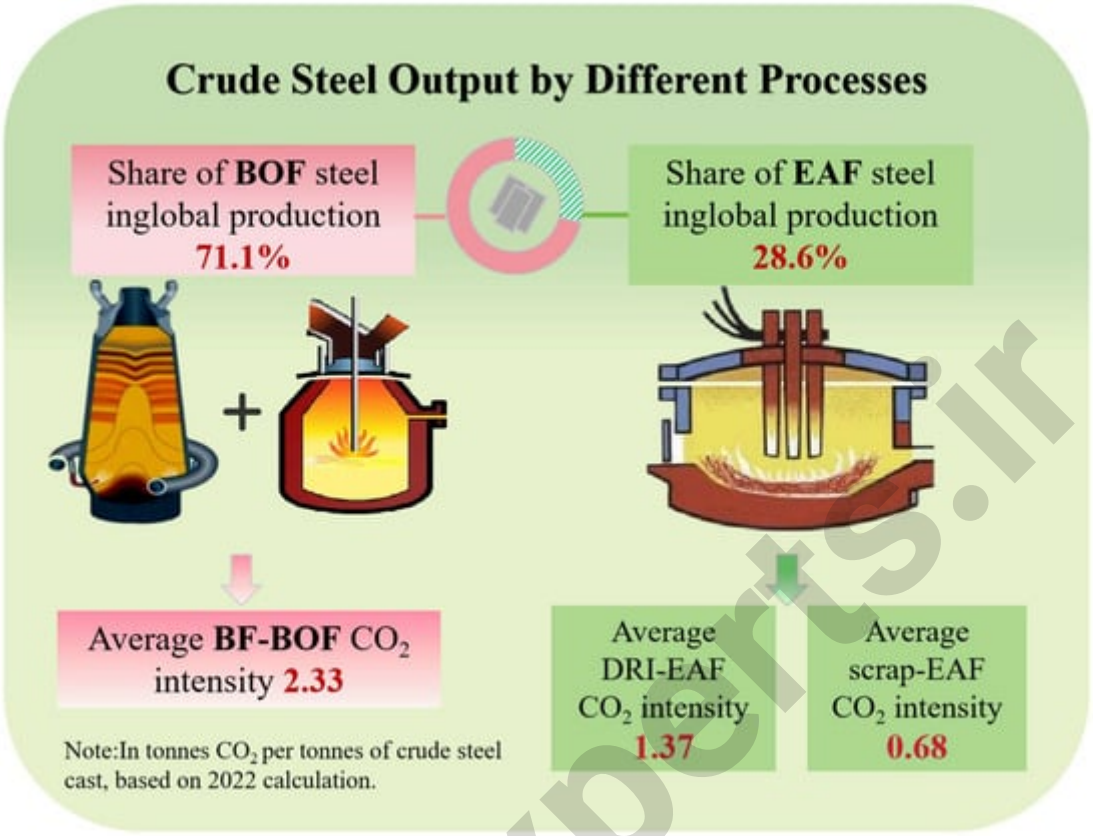
تولید صنعتی فولاد عمدتاً بر دو مسیر متکی است. در **مسیر بلند**، مواد اولیه ابتدا در واحدهای کک‌سازی، زینترینگ و گندله‌سازی آماده می‌شوند؛ کوره بلند چدن مذاب تولید می‌کند و کنورتور اکسیژنی آن را به فولاد خام تبدیل می‌کند. در **مسیر کوتاه**، قراضه ــ و در صورت نیاز آهن اسفنجی یا آهن احیای مستقیم (DRI) ــ در کوره قوس ذوب می‌شود و سپس در تجهیزات متالورژی ثانویه، از جمله کوره پاتیلی، پالایش می‌یابد. محصول نهایی با ریخته‌گری و نورد تولید می‌شود.

طبق داده‌های سال **۲۰۲۲** در مقاله، تولید جهانی فولاد خام حدود **۱٫۸۹ میلیارد تن** و انتشار ناشی از فولادسازی حدود **۳٫۶۱ میلیارد تن CO** بوده است [۵]. مقدار مصرف انرژی در متن اصلی «۳۹۶٫۷ گیگاژول» گزارش شده است؛ از آنجا که این واحد با مقیاس تولید جهانی سازگار به نظر نمی‌رسد، در این ترجمه بدون حدس‌زدن واحد صحیح نقل می‌شود و برای استناد عملیاتی باید به منبع داده اولیه مراجعه کرد. شکل ۲ توزیع جغرافیایی تولید فولاد خام و شکل ۳ مقایسه ردپای کربنی مسیرهای تولید را نشان می‌دهند.



شکل 2. توزیع جغرافیایی تولید فولاد خام جهان (منبع: مقاله اصلی، CC BY 4.0)

SteelExperts.ir

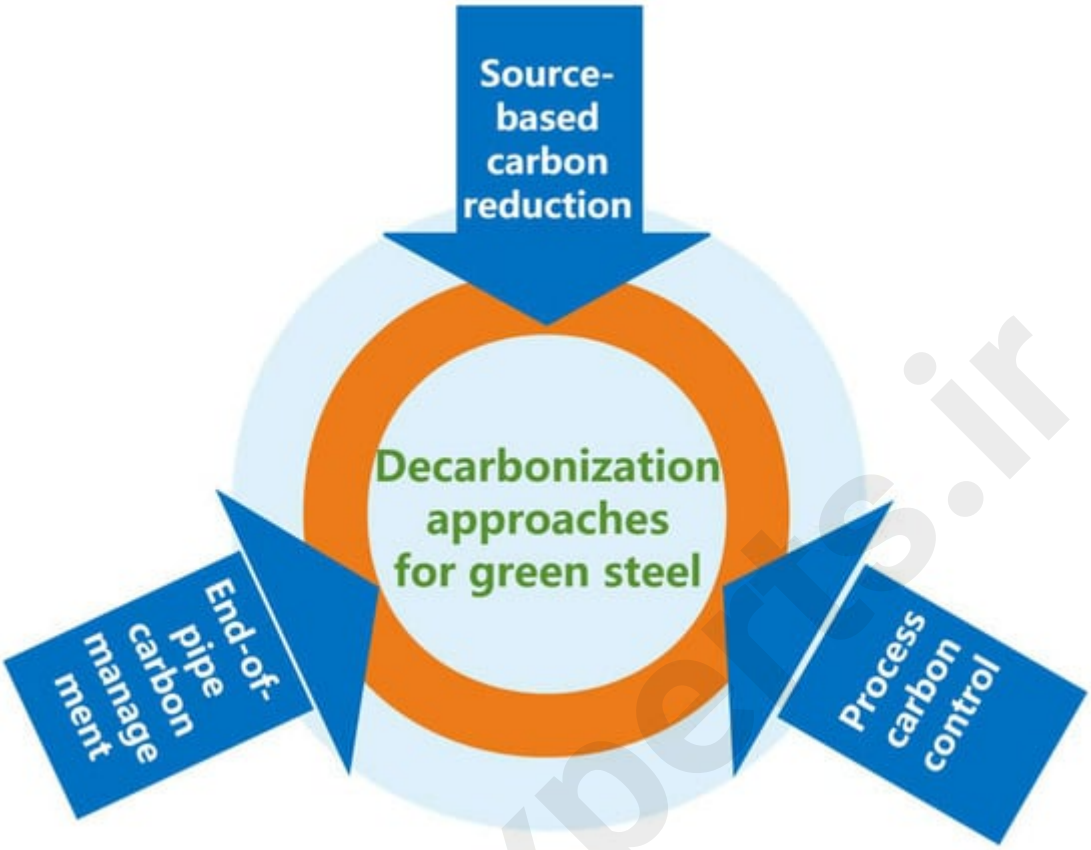


شکل 3. مقایسه ردپای کربنی مسیرهای مختلف تولید فولاد (منبع: مقاله اصلی، CC BY 4.0)

در همان سال، حدود **۷۱ درصد** فولاد خام جهان از مسیر BF–BOF و **۲۹ درصد** از مسیر EAF تولید شد. شدت متوسط انتشار در مسیر بلند **۲٫۳۳ تن CO به ازای هر تن فولاد خام** بود. برای مسیر کوره قوس، نوع شارژ اهمیت زیادی دارد: استفاده از آهن احیای مستقیم به‌طور متوسط **۱٫۳۷ تن CO** و استفاده از قراضه حدود **۰٫۶۸ تن CO به ازای هر تن فولاد خام** انتشار به همراه داشت [۵]. به‌این‌ترتیب، یکسان دانستن تمام کوره‌های قوس از نظر عملکرد کربنی گمراه‌کننده است.

چهار راهبرد اصلی برای مهار انتشار عبارت‌اند از: **جایگزینی سوخت‌های متعارف با انرژی پاک**؛ **ارتقای بهره‌وری انرژی**؛ **گسترش پژوهش‌های بنیادی درباره تبدیل و مصرف انرژی**؛ و **جذب کربن و تبدیل آن به منابع قابل‌استفاده** [۶]. جایگزینی انرژی، تولید CO را در مبدأ کاهش می‌دهد؛ جذب و استفاده مجدد، به گاز خروجی می‌پردازد؛ و بهره‌وری و پژوهش‌های فرایندی بر میزان مصرف انرژی و انتشار در حین تولید اثر می‌گذارند. نویسندگان این راهکارها را در سه حوزه کاهش در مبدأ، کنترل در فرایند و مهار در انتهای خط سامان داده‌اند [۷].

SteelExperts.ir



شکل 4. مسیرهای فناورانه گذار به تولید پایدار فولاد (منبع: مقاله اصلی، CC BY 4.0)

۳. مسیرهای کربن‌زدایی در فولادسازی بلندمدار BF–BOF

کاهش انتشار در مسیر کوره بلند–کنورتور مستلزم بازنگری در سامانه‌ای است که بیش از یک قرن بر احیای کربنی آهن استوار بوده است. متالورژی هیدروژنی و احتراق غنی‌شده با اکسیژن مسیرهای تازه‌ای پیشنهاد می‌کنند، اما کاربردشان در کوره بلند با محدودیت‌های ترمودینامیکی، دمایی، موازنه انرژی و بازده احیا روبه‌روست. سرمایه عظیم صرف‌شده در زیرساخت‌های موجود BF–BOF و آماده‌نبودن شبکه عرضه هیدروژن سبز نیز مانع جایگزینی سریع می‌شود. ازاین‌رو، هم‌زمان با حفظ امنیت عرضه فولاد، گذار مرحله‌ای از «متالورژی کربنی» به «متالورژی سبز» ضروری است.

۳ـ۱. کاهش کربن در مرحله تأمین مواد و شارژ

با آنکه مسیر BF–BOF همچنان حدود **۷۱ درصد** تولید جهانی فولاد خام را به خود اختصاص می‌دهد، انتشار و مصرف انرژی بالای آن فشار فزاینده‌ای بر تولیدکنندگان وارد می‌کند. چون جایگزینی یکباره این ظرفیت عظیم با کوره قوس ممکن نیست، بهبود مواد شارژ و افزایش مصرف قراضه اهمیت ویژه‌ای دارد. راهکارهای تولید چدن

کم‌کربن شامل افزایش سهم گندله، دمش غنی از اکسیژن، ذوب با اکسیژن کامل، تزریق زیست‌توده، پلاستیک یا هیدروژن و بازیافت گاز کوره بلند است. برخی از این روش‌ها هنوز در مقیاس آزمایشی‌اند، اما شارژ با سهم بالای گندله برای بسیاری از کارخانه‌ها عملی‌تر است.

جدول 1. فناوری‌های آزمایشی برای کاهش کربن در مبدأ مسیر بلند BF–BOF

Table 1. Pilot technologies for source-stage carbon reduction in BF-BOF long-process steelmaking.

Technology Name	Description	Industrial Maturity
3R Carbon-Hydrogen BF Technology [9]	Recirculates reducing gases from furnace gas and enhances reduction via carbon–hydrogen coupling, reducing coke consumption	Pilot stage (partial demonstration)
Top Gas Recycling and Full-Oxygen Smelting [10]	Injects hydrogen-enriched gas after CO_2 separation and reduces coke ratio through full-oxygen blast	Demonstration stage (under validation)
Fluxed Pellets and Composite Iron Coke [11]	Replaces traditional sinter with low-carbon burden to reduce flux demand	Small-scale application
Hydrogen-Blended Injection [12]	Co-injects hydrogen with natural gas/pulverized coal to progressively replace fossil fuels	Pilot stage (exploratory development)
High-Grade Ore & Pellets [13]	Reduces sintering energy consumption by adopting high-grade ore and pellets	Gradual adoption (partial industrial use)
Biomass Fuel Substitution [14]	Substitutes coke breeze/anthracite with charcoal/biomass to reduce fossil carbon reliance	Limited pilot trials
Plasma Blast Heating [15,16]	Enhances blast temperature using green electricity-driven plasma to lower coke demand	Demonstration stage

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

نویسندگان یک راهبرد دوگانه پیشنهاد می‌کنند: نخست تولید چدن با کربن کمتر از طریق بهبود کیفیت مواد آهن‌دار و سهم بالای گندله؛ دوم افزایش سهم قراضه در فولادسازی کنورتوری. مطابق برآورد نقل‌شده در مقاله، **هر یک واحد درصد افزایش سهم قراضه، انتشار را حدود ۱۶ کیلوگرم به ازای هر تن فولاد کاهش می‌دهد** [۸]. این نتیجه پیوند مستقیم بهره‌وری مواد و اقتصاد چرخشی را نشان می‌دهد.

۳ـ۱ـ۱. تجربه کارخانه‌ها در استفاده از سهم بالای گندله در کوره بلند

افزایش سهم گندله با بهبود کیفیت شارژ، تنظیم دقیق پارامترهای بهره‌برداری و اصلاح الگوی توزیع مواد در دهانه کوره می‌تواند مصرف سوخت و انتشار را کاهش دهد. کارخانه‌های چینی مانند شوگانگ و تانگ‌استیل از مدیریت دقیق‌تر فرایند بهره برده‌اند؛ در اروپا و آمریکای شمالی نیز دسترسی به گندله مرغوب و تجربه عملیاتی به نتایج محیط‌زیستی و اقتصادی کمک کرده است.

در نمونه‌های بررسی‌شده، جایگزینی بخشی از زینتر با گندله، **۱۲ تا ۳۵ درصد** کاهش انتشار به همراه داشته

است: **۳۵ درصد** در SSAB سوئد [۱۷] و **۱۸ درصد** در شوگانگ جینگ‌تانگ [۱۸]. نسبت سوخت در Great Lakes Steel آمریکا به **۴۳۰ کیلوگرم بر تن چدن** و در کوبه‌استیل ژاپن به **۴۹۷ کیلوگرم بر تن** رسیده است. در کوره بلند **۵۵۰۰ مترمکعبی** شوگانگ جینگ‌تانگ، انرژی جنبشی دمش **۱۴۰ کیلوژول بر ثانیه** گزارش شده است؛ SSAB با شارژ کاملاً گندله‌ای، تولید سرباره را به **۱۴۶ کیلوگرم بر تن** رسانده؛ و کوبه‌استیل با لایه‌گذاری میان‌بار کک، اختلاف فشار را **۱۵ درصد** پایین آورده است.

جدول 2. نمونه‌های استفاده از سهم بالای گندله در کوره بلند

Table 2. Application cases of blast furnace smelting with high pellet ratio.

Project Name	BF Volume (m^3)	Pellet Ratio	Fuel Ratio (kg/t HM)	Coke Rate (kg/t HM)	Productivity (t/(m^3·d))	Carbon Reduction (Baseline)	Technical Highlights	Advantages	Limitations	Distinctive Features
Shougang Jingtang No. 1	5500	>50%	510	264	2.15	18% (CN: 1.8 tCO_2/t HM) [19]	High O_2 (7.3%), top pressure 277 kPa, blast 8300 m^3/min [20]	Gas utilization 49~50%, stable Si < 0.3%	Pellet strength > 3200 N, cost +10%	Blast energy 140 kJ/s, Zn < 160 g/t
Tangsteel No. 2	2922	40%	510	313	3.066	12% (CN baseline)	Tuyere area 0.4051 m^2, blast temp. 1220 °C, slag Al_2O_3 < 16.5%	Slag/HM 210 kg/t, HM temp. >1500°C [18]	RDI fluctuation ±5% [21]	Fluxed pellet RDI + 6.3 > 90%, MgO/Al_2O_3 0.5~0.55
SSAB Sweden	1800	~100%	457 (H_2-DRI)	—	3.5	35% (EU: 1.6 tCO_2/t HM)	Full-pellet, TFe > 66.8%, slag 146 kg/t	Flue gas −28%, HM cost €15/t	Pellet energy +20%	Slag FeO < 0.5%, S < 0.02% [17]
U.S. Great Lakes	1645	92%	430 (coke + coal)	270	2.31	22% (NA: 1.7 tCO_2/t HM)	Fluxed pellets (52%), slag < 200 kg/t	Flux −40%, HM cost $8/t	Heat load ±10 °C adjustments	Basicity (CaO/SiO_2) 1.2~1.5
Kobe Steel No. 3	4850	100%	497	275	2.91	25% (JP: 1.5 tCO_2/t HM)	Coke interlayer, O_2 > 8%, flame 2250~2400 °C	ΔP −15%, Temp. error ±20 °C	Basicity ±0.1 (limestone needed)	Coke layer 80~100 mm, permeability +12% [17,22]

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

سه عامل در موفقیت این طرح‌ها نقش برجسته دارد: **خوراک با عیار بالا** (از جمله گندله SSAB با آهن کل بیش از **۶۶٫۸ درصد**)، **تنظیم دقیق شرایط بهره‌برداری** (مانند کنترل انرژی دمش در شوگانگ جینگ‌تانگ) و **اصلاح شیمی سرباره** (برای نمونه، نسبت MgO/Al O در محدوده **۰٫۵ تا ۰٫۵۵** در تانگ‌استیل). علاوه بر کاهش انتشار، هزینه تولید چدن در تجربه‌های گزارش‌شده تا **۸ دلار بر تن** در آمریکا و **۱۵ یورو بر تن** در SSAB کمتر شده است. با این حال، صرفه‌جویی مذکور باید در کنار هزینه آماده‌سازی و تأمین گندله سنجیده شود.

محدودیت‌های فناوری نیز کم‌اهمیت نیستند: مصرف انرژی گندله‌سازی در تجربه SSAB حدود **۲۰ درصد** افزایش یافته؛ شاخص کاهش‌پذیری گندله پس از احیا (RDI) در تانگ‌استیل تا **±۵ درصد** نوسان کرده [۲۱]؛ و در کوبه‌استیل تغییرات بازیسیته تا **±۰٫۱** به اصلاح مصرف سنگ‌آهک نیاز داشته است [۲۲]. ترکیب فناوری گندله، هیدروژن و برق، تولید گندله مناسب از سنگ‌آهن کم‌عیار و کنترل هوشمند کوره از مسیرهای آینده‌اند. توسعه قیمت‌گذاری کربن و تقاضای فولاد سبز می‌تواند انتقال از پایلوت به کاربرد گسترده را سرعت بخشد.

۳ـ۱ـ۲. تجربه کارخانه‌ها در فولادسازی با سهم بالای قراضه

افزایش قراضه در شارژ، وابستگی به سنگ‌آهن و کک را کاهش می‌دهد. مقاله دامنه سهم قراضه را **۱۰ تا ۱۰۰ درصد** و کاهش انتشار ناشی از آن را ــ بسته به مسیر تولید ــ **۶ تا ۷۸ درصد به ازای هر تن فولاد** گزارش

می‌کند. امکان‌پذیری فنی و اقتصادی این کار به پیش‌گرمایش قراضه در BOF، مسیرهای ترکیبی مبتنی بر EAF، دسترسی به قراضه و آهن اسفنجی، بهای انرژی و سیاست‌هایی مانند مالیات کربن و یارانه برق تجدیدپذیر بستگی دارد.

در مسیر سنتی کوره بلند–کنورتور سهم معمول قراضه **۱۰ تا ۲۵ درصد** است، اما در کوره قوس با برق سبز می‌تواند به **۸۰ تا ۱۰۰ درصد** برسد. مشکلات مهم شامل کنترل ناخالصی‌های مس و قلع (هدف مقاله: **کمتر از ۰٫۲ درصد**) و هزینه پیش‌گرمایش حدود **۵۰ تا ۱۰۰ یوان به ازای هر تن** است.

جدول 3. نمونه‌های فولادسازی با سهم بالای قراضه و راهکارهای فنی

Table 3. Representative cases and technical solutions for high-scrap-ratio steelmaking.

Company	Process Type	Scrap Ratio	Key Technical Support	Carbon Reduction Effect	Cost Change	Applicable Scenarios
Tangsteel	BF-BOF Synergy	10% [23]	Direct scrap charging + hot metal ladle preheating	6% reduction in CO_2/t steel	5.8% lower hot metal cost	Abundant hot metal, retrofit constraints
JFE Steel	BOF-SMP Process	35% [24]	Scrap pre-melting + secondary combustion oxygen lance	15% reduction in CO_2/t steel	12% lower fuel cost	Scrap availability, upgrade-capable equipment
ThyssenKrupp	BOF-Jet Process	40%	Natural gas injection preheating + dynamic thermal model [25]	18% reduction in CO_2/t steel	5~9% higher profit/t steel	Carbon tax > $50/t
NuCOr	EAF-BOF Hybrid	86%	EAF scrap melting + DRI blending [26]	78% reduction in CO_2/t steel	10~15% lower cost/t steel	Green power access, stable DRI supply
Danieli Q-One	100% Scrap EAF	100%	Oxy-fuel burners + carbon powder injection	Near-zero carbon (green power)	>500 kWh/t power consumption	Zero-carbon steel certification required

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

تانگ‌استیل با پیش‌گرمایش پاتیل چدن، پوشش کامل پاتیل و مدل‌های پویا برای موازنه حرارتی، سهم قراضه در کنورتور را به **۳۰ تا ۴۰ درصد** رساند و هزینه فولادسازی را **۵٫۸ درصد** کاهش داد [۲۳، ۲۴]. شوگانگ جینگ‌تانگ با کنترل پویای حرارتی به سهم **۵۰ درصد** قراضه در تولید فولاد خودرویی رسید و آزمایش **۵۵ درصد** را برنامه‌ریزی کرده است. در مسیر EAF، تیم پروفسور «ژو رونگ» با ترکیب ریزشبکه خورشیدی–بادی–ذخیره‌ساز و مشعل هیدروژنی، بهای برق سبز را به **۰٫۲ تا ۰٫۳ یوان بر کیلووات‌ساعت** (حدود **۰٫۰۳ تا ۰٫۰۴ دلار**) رسانده است [۲۷]. تزریق CO برای کنترل نیتروژن و جایگزینی پودر کربن با گاز زیست‌توده نیز از اجزای راهکار گزارش‌شده است.

اما قراضه خریداری‌شده ممکن است **۰٫۳ تا ۰٫۶ درصد مس** داشته باشد و برای تولید فولادهای کیفی مناسب نباشد. جدایش مغناطیسی، جدایش جریان گردابی، حذف نیتروژن و کنترل عناصر باقیمانده باید پیش از بالا بردن سهم قراضه مورد توجه قرار گیرند. هزینه برق تجدیدپذیر و گرمایش کمکی نیز تعیین‌کننده است. در سامانه ریزشبکه پیشنهادی ژو رونگ، مدیریت بار اوج و جایگزینی احیای کربنی با هیدروژن، کاهش انتشار حدود **۱۵۰ کیلوگرم CO بر تن فولاد** را هدف می‌گیرد.

نویسندگان تأکید دارند افزایش سهم قراضه صرفاً با تغییر شارژ امکان‌پذیر نیست و به هماهنگی سیاست‌ها و زنجیره تأمین نیاز دارد. در نسخه **۲۰۲۵** الزامات صنعت فولاد چین، سهم هدف تولید به روش EAF برابر **۱۵ درصد** اعلام شده است. مالیات کربن بالاتر از **۸۰ دلار بر تن** و گواهی‌های فولاد سبز از ابزارهای محرک‌اند. سه مسیر توسعه عبارت‌اند از: افزایش بازده کنورتور با تزریق پودر و دستیابی به **۹۲ تا ۹۵ درصد** فسفرزدایی و سهم قراضه بیش از **۵۰ درصد**؛ تکمیل پالایش EAF با برق پاک و هوشمندسازی برای کاهش **۵ تا ۸ دقیقه** زمان انتظار هر ذوب؛ و پیوند متالورژی هیدروژنی با کوره قوس. در برآورد آینده‌نگرانه مقاله، تا **۲۰۴۵** سهم کوره‌های قوس تمام‌قراضه به **۵۶٫۱ درصد** و مسیر احیای هیدروژنی–EAF به **۱۷ درصد** می‌رسد؛ این ارقام پیش‌بینی‌اند و نه عملکرد قطعی صنعت.

۳ـ۲. کنترل انتشار کربن در جریان تولید

افزایش سخت‌گیری‌های اقلیمی، تولیدکنندگان مسیر بلند را به سمت فناوری‌هایی می‌برد که هم‌زمان مصرف انرژی را کمتر و کیفیت فولاد را بهتر کنند. کنترل انتشار در حین فرایند، محل تلاقی واکنش‌های متالورژیکی و مدیریت انرژی است؛ بنابراین به‌جای بهینه‌سازی صرفِ یک عامل، باید ترکیب رسانه‌های دمش و تنظیم پویای کل عملیات مورد توجه باشد. روش‌هایی مانند ساب‌لنس، اندازه‌گیری برخط و پیش‌بینی نقطه پایان با هوش مصنوعی هنوز در حال توسعه‌اند؛ مقاله بیشتر بر فناوری صنعتی‌شده **دمش از کف کنورتور با ترکیب $CaO–CO–O$** تمرکز می‌کند.

در این فناوری، ترکیب گاز دمشی و طراحی تجهیز به گونه‌ای تغییر می‌کند که ضمن بهبود اختلاط مذاب و فسفرزدایی، از CO نیز در داخل فرایند استفاده شود. جایگزینی بخشی از گازهای بی‌اثر با محیط حاوی CO، به گفته نویسندگان، اکسیداسیون سرباره را کاهش می‌دهد؛ مصرف اکسیژن را **۱۵ تا ۲۰ درصد** و اتلاف آهن را **۵ تا ۸ درصد** کمتر می‌کند. ارزش اصلی این روش در آن است که بهره‌وری فرایند، پاکیزگی فولاد و استفاده از کربن را هم‌زمان هدف می‌گیرد.

جدول 4. فناوری‌های کنترل کربن در فرایند کنورتوری BF–BOF

Table 4. Analysis of process carbon control technologies in BF–BOF long process.

Technology Name	Core Function	Application Maturity *
Sub-lance/Online Detection [28]	Real-time monitoring of molten steel composition and temperature to optimize smelting rhythm	Widely adopted
Coolant Control [29]	Precise regulation of furnace temperature and molten steel composition stability	Mature application
Endpoint Prediction Model (AI) [30]	Machine learning-based prediction of smelting endpoint parameters	Promotion and validation phase
Digital Twin and Simulation [31]	Virtual production line modeling for process optimization	Promotion and validation phase
RH Vacuum Degassing [32]	Efficient removal of gases and inclusions in steel	Mature application (high-grade steel)
LF Refining [33]	Fine-tuning of temperature/composition and inclusion control	Widely adopted
CAS-OB [34]	Rapid alloy adjustment and temperature boosting	Mature application (small–medium mills)
CO_2 as Oxidizer [35,36]	Replaces O_2 for decarbonization, desiliconization, and demanganization, reducing oxygen content	Industrial trial stage
CO_2 as Stirring Gas [37,38]	Enhances bath stirring, improves composition homogeneity, and lowers nitrogen content	Industrial adoption phase
CO_2 as Protective Gas [39,40]	Continuous casting protection and ladle covering to suppress reoxidation and nitrogen pickup	Industrial trial stage
CO_2 Temperature Control and Dust Suppression [41,42]	Reduces localized temperature, minimizes metal evaporation, and suppresses dust generation	Laboratory research stage

* Application maturity detailed explanation is in Appendix A of Table A1.

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

دمش ترکیبی از کف کنورتور با ورود هم‌زمان اکسیژن، CO و ماده سرباره‌ساز **CaO** انجام می‌شود. این تزریق، شرایط واکنش اکسایش، اختلاط، دما و جو داخل کوره را تحت تأثیر قرار می‌دهد و هدف آن افزایش کیفیت فولاد مذاب همراه با کاهش مصرف انرژی است. ترکیب مناسب گازها می‌تواند تشکیل نیتریدهایی مانند **TiN** و **AlN** و گازهای زیان‌آور مانند **NO** را نیز محدود کند. تجربه کارخانه‌ها و داده‌های عملکرد در جدول ۵ مقایسه شده‌اند.

جدول 5. نمونه‌های دمش ترکیبی O_2–CO_2–CaO از کف کنورتور

Table 5. Extended application cases of BOF bottom-blowing O_2-CO_2-CaO technology.

Country	Company/Project	Technical Features and Outcomes	Key Data and Emission Reduction
China	HBIS Handan 120 t BOF Project	Optimized bottom tuyere layout enhances stirring; external trunnion design simplifies structure, enabling high gas flow rates	Carbon-oxygen product: 0.0026 [43]; bottom-blowing lifespan matches furnace campaign; energy consumption reduced by 10%
China	Ansteel	Patented bottom-blowing components (eccentric gas ducts + bent nozzles) widen injection angles, improving bath dynamics	Enhanced process visibility; smelting efficiency +15%; oxygen consumption −10% [44]
China	JISCO Group	High-intensity CO_2 bottom-blowing (0.21 $m^3/(t{\cdot}min)$) with N_2/Ar switching optimizes final steel composition	Final nitrogen content <20 ppm; de-phosphorization rate +8%; CO_2 emissions −15% [45]
China	Baosteel	Annular-gap swirling bottom-blowing device with multi-layer sleeve design enhances gas flow, reducing inclusions [46]	Steel cleanliness +20%; slag volume −30%; dust emissions −25% [47]
Germany	ThyssenKrupp	O_2-CO_2 hybrid bottom-blowing with off-gas recycling optimizes slag oxidation	Annual CO_2 reduction: 2 million tonnes [48]; gas consumption −20%.
Japan	Nippon Steel	O_2-CO_2 bottom-blowing + CaO optimization reduces final oxygen content and boosts de-phosphorization	De-sulfurization rate +10%; final nitrogen content −20% [49]
Europe	ThyssenKrupp Decarb Project	Produces low-carbon steel via EAF technology, reducing emissions by 70% and driving green supply chains	CO_2 emissions −70%; applied in Volkswagen's supply chain [48]

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

در HBIS هاندان، اصلاح جانمایی نازل‌های کف هم‌زدن مذاب را تقویت کرد و حاصل‌ضرب کربن–اکسیژن به **۰٫۰۰۲۶** رسید. آن‌استیل با مجرای گاز غیرمرکزیِ ثبت‌شده در اختراع، راندمان ذوب را **۱۵ درصد** افزایش داد. بائواستیل با سامانه چرخشیِ شکاف حلقوی، پاکیزگی فولاد را **۲۰ درصد** بهتر و انتشار غبار را کمتر کرد. تیسن‌کروپ آلمان بازیافت گاز خروجی را با فرایند پیوند داد و کاهش سالانه حدود **۲ میلیون تن CO** را گزارش کرد؛ نیپون‌استیل ژاپن نیز بر کنترل نقطه پایان متمرکز شد و نرخ گوگردزدایی را **۱۰ درصد** بهبود داد. گروه JISCO با تزریق شدید CO و تعویض نیتروژن–آرگون، نیتروژن انتهایی را در سطح کمتر از **۲۰ ppm** پایدار نگه داشت.

اگرچه چین بیشتر بر طراحی تجهیزات، آلمان بر یکپارچه‌سازی سامانه‌ها و ژاپن بر کنترل نقطه پایان تأکید کرده‌اند، دامنه نتایج گزارش‌شده شامل **۱۵ تا ۲۵ درصد** بهبود بهره‌وری، **۱۰ تا ۲۰ درصد** صرفه‌جویی انرژی و **۱۵ تا ۷۰ درصد** کاهش انتشار CO است. مقایسه این اعداد باید با درنظرگرفتن مرز سامانه و شرایط هر پروژه انجام شود؛ زیرا همه موارد از مبنای یکسانی استفاده نکرده‌اند.

ریسک‌های اصلی. پیچیدگی تزریق و نیاز به تجهیزات کنترل بسیار دقیق؛ سرمایه‌گذاری و هزینه بهره‌برداری

قابل‌توجه؛ دشواری اتصال سامانه جدید به خطوط موجود و ضرورت بازسازی تجهیزات؛ و حساسیت کیفیت فولاد نهایی به هماهنگی دبی، ترکیب گاز و شرایط واکنش، از مهم‌ترین موانع‌اند.

جهت‌گیری‌های پیشنهادی. استانداردسازی طراحی نازل و بهینه‌سازی جنس قطعات مصرفی برای افزایش عمر؛ توسعه کنترل هوشمند گاز برای پایدارترشدن عملیات؛ اتصال دمش CO به واحدهای جذب و بازیافت برای بستن چرخه کربن؛ و استفاده از قیمت‌گذاری انتشار و اعتبارات سبز برای کاهش مانع اقتصادیِ ورود، به‌ویژه در کارخانه‌های کوچک و متوسط.

۳ـ۳. مهار کربن در انتهای زنجیره تولید

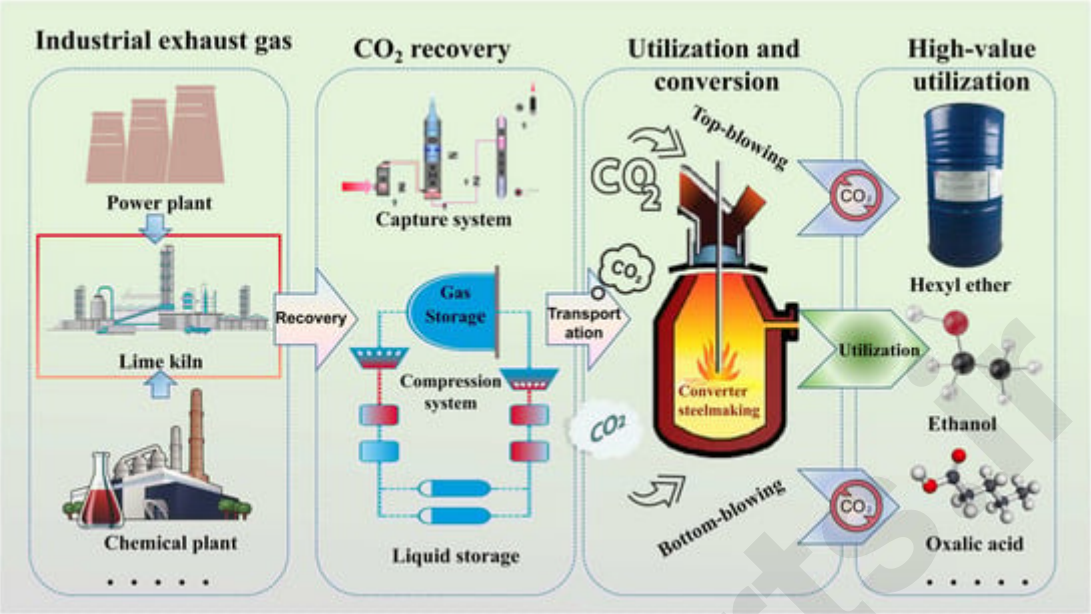
چهار محور پژوهشی در کاهش انتشار انتهای خطِ BF–BOF برجسته‌اند. محور نخست **افزایش غلظت اولیه CO** است؛ از جمله پیش‌تغلیظ گاز زینترینگ و کوره آهک، غنی‌سازی دمش کوره بلند با اکسیژن و افزایش غلظت CO در گاز کوره بلند. محور دوم، **جذب کربن با استفاده از گرمای اتلافی** و به‌ویژه پیوند جریان‌های دودِ دمای متوسط و پایین با واحد جذب است.

در محور سوم، **تبدیل CO به گازهای احیاکننده** مطرح است؛ مانند هیدروژنه‌کردن کاتالیستی CO با هیدروژن حاصل از گاز کک‌سازی یا الکترولیز CO برای تولید گاز سنتز. محور چهارم، **بازیافت محصولات** است؛ از کربناته‌کردن سرباره تا استفاده مستقیم از CO در آهن‌سازی و فولادسازی. هدف آن است که جذب، تبدیل و استفاده از کربن به‌جای چند واحد مستقل، در یک چرخه اختصاصی صنعت فولاد به هم متصل شوند.

۳ـ۳ـ۱. فناوری‌های استفاده مجدد از CO در فولادسازی

گروه پروفسور ژو رونگ در دانشگاه علم و فناوری پکن، استفاده مستقیم از CO را در عملیات کنورتور توسعه داده است تا چالش‌هایی مانند فسفرزدایی، نیتروژن‌زدایی، کنترل اکسیژن و عمر دمش از کف را به‌طور هم‌زمان پاسخ دهد. در کنورتور **۳۰۰ تنی** شوگانگ جینگ‌تانگ، CO به بخشی از تنظیم‌کننده فرایند تبدیل شده است. بهبود فسفرزدایی و کربن‌زدایی، کاهش تبخیر فلز و جذب آخال‌ها از دستاوردهای معرفی‌شده‌اند.

ارزیابی چرخه عمر این فناوری به ازای هر تن فولاد چنین نتایجی گزارش می‌کند: **۴٫۰۹ کیلوگرم** کاهش مصرف آهن؛ **۳٫۷۳ درصد** افزایش غلظت CO در گاز خروجی؛ **۵٫۵۷ نرمال‌مترمکعب** افزایش بازیافت گاز؛ استفاده از **۱۰٫۰۸ کیلوگرم CO**؛ کاهش مصرف انرژی معادل **۶٫۱۲ کیلوگرم زغال‌سنگ استاندارد**؛ و کاهش انتشار **۲۶٫۲۸ کیلوگرم** [۵۰–۵۱ CO].



شکل 5. طرح‌واره بازیافت و استفاده از دی‌اکسید کربن در صنایع (منبع: مقاله اصلی، CC BY 4.0)

بازیافت CO می‌تواند از دریافت و فشرده‌سازی گاز خروجی، ذخیره‌سازی موقت و تبدیل آن به مواد باارزش مانند اتانول و اسید اگزالیک تشکیل شود. شکل ۵ مسیرهای تبدیل دی‌اکسید کربن صنعتی به محصول و کاربردهای متالورژیکی را نشان می‌دهد.

جدول 6. فناوری‌های بازیافت CO در فولادسازی

Table 6. Analysis of CO_2 recycling technologies.

Technology Name	Core Function	Application Maturity
CO_2-O_2 Mixed Injection Dephosphorization [50,51]	Optimizes thermodynamic conditions for dephosphorization, improving efficiency	Industrial trial stage
CO_2 in AOD Furnace Decarburization [52,53]	Utilizes CO_2's weak oxidation to selectively decarburize stainless steel, reducing Cr loss	Industrial adoption phase
CO_2-Enhanced EAF Smelting [54]	Suppresses metal evaporation in arc zones via CO_2 injection, lowering electrode consumption	Industrial trial stage
CO_2-CCUS Integration [55]	Captures and reuses steel plant off-gas CO_2 in steelmaking, forming a carbon loop	Demonstration project stage
Dynamic CO_2 Injection Control Model [51]	Adjusts CO_2 flow in real-time based on bath sensor feedback to optimize decarburization rate	Laboratory research stage
CO_2 for RH Refining Oxygen Control [56]	Replaces partial Ar with CO_2 in vacuum degassing to reduce molten steel oxygen content	Industrial trial stage
CO_2-Powder Injection Synergy [57]	Uses CO_2 as carrier gas for desulfurizers (CaO/Mg), enhancing interfacial mass transfer	Laboratory research stage
CO_2 Inclusion Removal [58]	Generates dispersed CO bubbles via CO_2 reactions to adsorb micro-inclusions	Theoretical validation stage

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

۳ـ۳ـ۲. جذب کربن؛ مقایسه جذب نوسان فشاری و جذب شیمیایی

جذب با نوسان فشار (PSA) از تفاوت تمایل و ظرفیت جذب مولکول‌های CO و سایر اجزای گاز، مانند N و O، روی سطح یک جاذب جامد استفاده می‌کند. CO در فشار بالا نگه داشته و با کاهش فشار آزاد می‌شود؛ بدین‌ترتیب جاذب احیا و جریان CO غنی‌تر می‌شود. هزینه بهره‌برداری در مقاله **۳۰۰ تا ۵۰۰ یوان به ازای هر تن CO** و مصرف انرژی الکتریکی **۲٫۵ تا ۲٫۸ گیگاژول بر تن CO** ذکر شده است. سامانه فشرده، سرمایه‌گذاری اولیه نسبتاً کمتر و امکان تولید CO با خلوص بالا از مزایای آن است؛ اما به برق وابسته است، ظرفیت جذب محدودی دارد و پایداری بلندمدت جاذب باید بهتر شود.

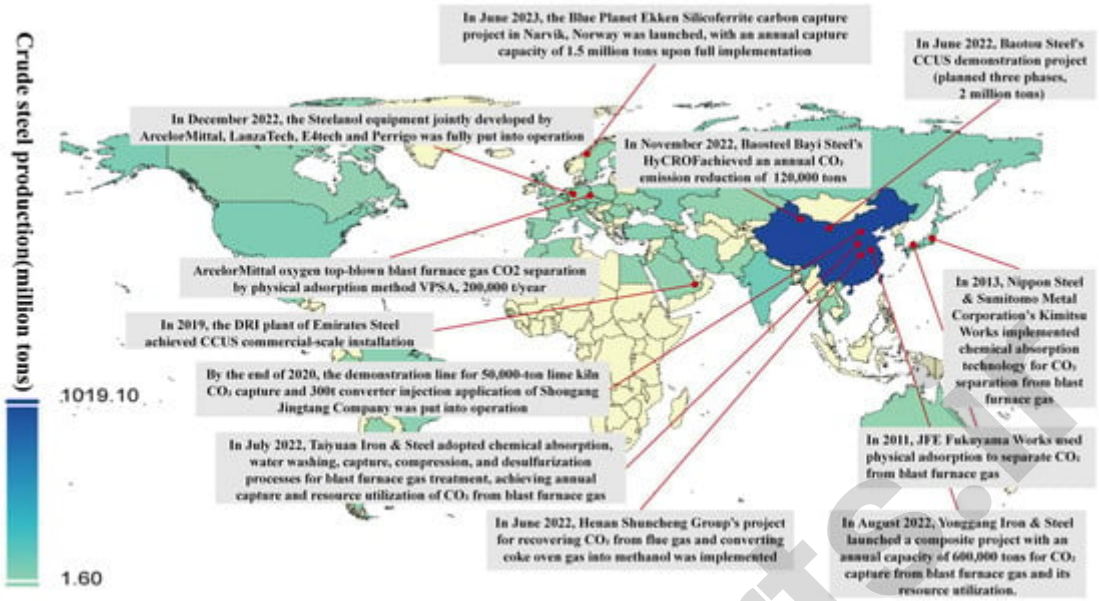
جذب شیمیایی با کمک حلال‌های جاذب انجام می‌شود. CO ابتدا در محیط جذب می‌شود و سپس با گرم‌کردن حلال و طی چرخه جذب–واجذب، جریان غنی CO به دست می‌آید. بازه هزینه عملیاتی **۳۰۰ تا ۴۰۰ یوان بر تن** و مصرف انرژی **۳٫۴ تا ۳٫۹ گیگاژول بر تن CO** شامل برق و بخار است. ظرفیت بالاتر و تجربه صنعتی بیشتر از مزایا و انرژی زیاد احیای حلال، خوردگی، تخریب و تبخیر حلال و سرمایه‌گذاری سنگین از چالش‌های آن هستند.

واکنش تشکیل کربامات در جذب آمینی به‌صورت شماتیک چنین بیان می‌شود؛ نوع آمین و شرایط عملیاتی بر تعادل آن اثر دارد:

$$2\ R\ R'NH + CO \rightleftharpoons R\ R'NCOO^- + R\ R'NH_2^+$$

شکل ۶ نمونه‌هایی از پروژه‌های جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن در صنعت فولاد را نشان می‌دهد. CCUS از مقیاس آزمایشگاهی به کاربرد صنعتی رسیده است، اما گستردگی و بلوغ آن در همه کارخانه‌ها یکسان نیست. شوگانگ جینگ‌تانگ جذب PSA را با بازیافت گرما ترکیب کرده و کاهش سالانه **۵۰ هزار تن CO** و **۲۰ درصد** کاهش مصرف انرژی جذب را گزارش می‌کند. در این طرح جایگزینی آرگون با CO در دمش کنورتور نیز بررسی شده است. در مقابل، پروژه Elkem نروژ با غلظت CO بالاتر از **۹۰ درصد** به جذب شیمیایی و ذخیره‌سازی زمین‌شناختی متکی است.

SteelExperts.ir



شکل 6. نمونه پروژه‌های عملیاتی جذب، استفاده و ذخیره کربن (CCUS) در صنعت فولاد (منبع: مقاله اصلی، CC BY 4.0)

در پروژه‌های مقایسه‌شده، ظرفیت‌های جذب از **۱۵۰ هزار تا ۱٫۵ میلیون تن در سال** متفاوت‌اند. در نمونه‌های صنعتی، Dongfang Boiler کاهش **۶۶ درصدی** هزینه جذب، TISCO تولید یخ خشک با درآمد سالانه **۳۰ میلیون یوان** و یک پروژه مرتبط با آهن اسفنجی در امارات، ارزش اقتصادی حدود **۳۰۰ میلیون دلار** از پیوند جذب کربن و ازدیاد برداشت نفت را گزارش کرده‌اند. این ارقام مربوط به پروژه‌های خاص‌اند و تعمیم مستقیم آن‌ها به هر کارخانه منطقی نیست.

SteelExperts.ir

جدول 7. پروژه‌های جذب کربن با PSA و جذب شیمیایی؛ عملکرد و اقتصاد

Table 7. Application cases of carbon capture: pressure swing adsorption (PSA) vs. chemical absorption.

Company/ Project	Technical Pathway and Process Features	Emission Reduction and Efficiency Data	Economic Benefits and Costs
Shougang Jingtang Lime Kiln CCUS Project (China)	Physical adsorption (PSA) + waste heat cascade utilization	Annual capture: 50,000 t; CO_2 concentration: 15~20% → 99%; steelmaking energy consumption reduced by 3~5%, argon use reduced by 30% [59]	Total investment: CNY 120 million; annual benefits: CNY 8 million; carbon reduction cost: ~240 CNY/t
Japan COURSE50 Project (Nippon Steel)	BFG PSA (zeolite/activated carbon adsorption) + hydrogen reduction	Capture rate: 80%; full-process emission reduction: 30% (lab); pilot plant captures 100,000 t/year [59]	Hydrogen reduction cuts coke reliance by 15%; carbon reduction cost: ~55 USD/t steel [60]
TISCO BFG CCUS Project (China)	Chemical absorption (MEA solvent) + water washing desulfurization	Annual capture: 100,000 t; energy consumption: 2.8 GJ/t; purity: 99.9%; dry ice production: 30 million CNY/year	Total investment: CNY 250 million; carbon reduction cost: ~40 USD/t
Elkem Ferrosilicon CCUS Project (Norway)	Chemical absorption (high-concentration CO_2 capture) + geological storage	Annual capacity: 1.5 Mt; capture rate: 95%; ferrosilicon carbon intensity reduced by 60% [61]	Norwegian government funding: NOK 16 million; storage cost: ~50 EUR/t; reuse revenue: 12 million EUR/year [62]
Petra Nova Coal Plant CCUS (USA)	Amine-based absorption (KM-CDR process)	Annual capture: 1.4 Mt CO_2; EOR boosts oil production by 15,000 barrels/day [63]	Total investment: 1 billion; EOR revenue: 30/t CO_2; payback period: 8 years [64]

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

مقایسه تجربه‌ها نشان می‌دهد PSA در گازهایی با غلظت **۱۵ تا ۲۰ درصد CO** مورد توجه قرار گرفته است؛ برای مثال، هزینه جذب در شوگانگ جینگ‌تانگ **۲۴۰ یوان بر تن** ذکر شده است. مقاله جذب شیمیایی را در شرایط غلظت بالا نیز بررسی می‌کند؛ در پروژه Elkem نرخ جذب **۱٫۵ میلیون تن در سال**، کاهش شدت انتشار **۶۰ درصد** و هزینه ذخیره‌سازی **۵۰ یورو بر تن** گزارش شده است [۶۲]. در TISCO هزینه عملیاتی حدود **۴۰ دلار بر تن CO** اعلام شده و پروژه Petra Nova آمریکا درآمد **۳۰ دلار به ازای هر تن CO** از بازیافت پیشرفته نفت را مطرح می‌کند. کمک **۱۶ میلیون کرون نروژ** از نمونه‌های حمایت دولتی است.

با وجود این موارد، CCUS هنوز در صنعت فولاد فراگیر نشده است. چهار علت مهم عبارت‌اند از **مصرف بالای انرژی** و افزایش هزینه کل تولید؛ **فرسودگی یا مسموم‌شدن جاذب‌ها و حلال‌ها** بر اثر ترکیباتی مانند سولفید کربونیل، غبار و فلزات قلیایی؛ **غلظت کم CO در بسیاری از گازهای خروجی** و نیاز به پیش‌تغلیظ؛ و **نامشخص‌بودن بازار و روش استفاده در مقیاس وسیع** برای کربن جذب‌شده.

توسعه آینده بر سه حوزه متمرکز است: **مواد جاذب جدید**، مانند چارچوب‌های فلزی–آلی (MOF) مقاوم به

رطوبت و گوگرد، و حلال‌های کم‌انرژی با هدف مصرف کمتر از **۱٫۵ گیگاژول بر تن CO**؛ **فرایندهای ترکیبی** PSA، غشا و جداسازی برودتی، مانند پیش‌تغلیظ CO تا **۴۰ تا ۵۰ درصد** و سپس خالص‌سازی تا **۹۹ درصد** با جذب شیمیایی، با ظرفیت کاهش مصرف انرژی **۱۵ تا ۲۵ درصد**؛ و **ارزش‌آفرینی از کربن** از راه تبدیل کاتالیستی CO به متانول، پلی‌کربنات و مواد شیمیایی دیگر. هدف پژوهش‌های الکتروکاتالیستی و فوتوکاتالیستی دستیابی به بازده تبدیل بیش از **۸۰ درصد** و ایجاد زنجیره اقتصادی «جذب–تبدیل–استفاده» است.

۴. مسیرهای کربن‌زدایی در فولادسازی کوتاه‌مدار با کوره قوس الکتریکی

منطق اصلی کاهش انتشار در کوره قوس، تغییر جریان مواد و انرژی است: به‌جای زنجیره خطی «سنگ‌آهن کک چدن»، زنجیره‌ای چرخشی از «قراضه برق پاک فولاد بازیافتی» شکل می‌گیرد. این تغییر هم انتشار داخل کارخانه را کاهش می‌دهد و هم کربن نهفته در استخراج و آماده‌سازی مواد اولیه را کمتر می‌کند.
بااین‌حال، سهم فولادسازی قوس الکتریکی در مقیاس جهان هنوز کمتر از **۳۰ درصد** است [۶۵] و ظرفیت بزرگی برای رشد وجود دارد. بهره‌برداری از این ظرفیت به عرضه پایدار قراضه باکیفیت، زیرساخت برق سبز، بازار کربن کارآمد و سیاست‌های پشتیبان نیاز دارد.

۴ـ۱. کربن‌زدایی در مبدأ در مسیر EAF

در فولادسازی کوتاه‌مدار، کاهش کربن در مبدأ با جایگزینی سوخت‌های فسیلی، اصلاح ترکیب انرژی و نوآوری در فرایند آغاز می‌شود. کوره قوس و متالورژی هیدروژنی از مهم‌ترین فناوری‌ها هستند، زیرا وابستگی به کک‌سازی و احیای کربنی را کمتر می‌کنند. از جمله فناوری‌های پشتیبان می‌توان به آماده‌سازی و درجه‌بندی قراضه، بازیافت گرما، کنترل هوشمند، ذخیره انرژی و تأمین هیدروژن سبز اشاره کرد. برخی فناوری‌ها هنوز در مرحله توسعه مهندسی و پایلوت هستند و پایداری شاخص‌های انرژی، قابلیت اطمینان تجهیز و سرمایه لازم برای تعمیم آن‌ها به مقیاس بزرگ روشن نیست.

SteelExperts.ir

جدول 8. فناوری‌های کاهش انتشار در مبدأ مسیر کوتاه EAF

Table 8. Analysis of source-stage decarbonization technologies for short-process steelmaking.

Technology Name	Core Function	Key Technologies/Methods	Application Maturity
Scrap Pretreatment and Sorting [68]	Enhances scrap utilization and reduces impurity impacts	AI visual recognition, magnetic/eddy current separation, high-temperature degreasing, shredding/compaction	Mature application
Real-Time Scrap Data Adjustment [69,70]	Dynamically optimizes charging mix and process parameters	Sensor monitoring, IoT, machine learning prediction models	Demonstration and promotion phase
Side-Draft Full Preheating [71]	Recovers waste heat, reduces energy use and pollution	Multi-stage heat exchangers, exhaust gas recirculation (EGR), high-temperature preheating (>1200 °C)	Mature application
Dynamic Sealing & Heat Recovery [72]	Minimizes heat loss and enhances waste heat utilization	Water-cooled flexible seals, regenerative combustion, waste heat power generation	Demonstration and promotion phase
Uniform Heating and Intelligent Control [73]	Ensures molten steel quality and reduces energy waste	Multi-electrode layout optimization, electromagnetic stirring, digital twin and AI control	Demonstration and promotion phase
Continuous Charging Optimization [71]	Enables continuous production and shortens smelting cycles	Twin-shell design, Consteel continuous charging, scrap preheating synchronization	Demonstration and promotion phase
Green Power Direct Supply and Storage [74,75]	Reduces carbon emissions and stabilizes power fluctuations	Wind/solar PPA, molten salt/battery storage, microgrids	Pilot application phase

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

دو جایگزینی بنیادی در این مسیر عبارت‌اند از **«قراضه به‌جای سنگ‌آهن»** و **«برق سبز به‌جای سوخت فسیلی»**. در تحلیل نویسندگان، شدت انتشار کوره قوس مبتنی بر قراضه حدود **۰٫۳ تا ۰٫۷ تن CO بر تن فولاد**، یعنی نزدیک به **۲۰ تا ۳۰ درصد** شدت انتشار مسیر بلند است [۶۶]. در صورت استفاده از احیای مستقیم سنگ‌آهن با هیدروژن سبز در کوره شفت، مقدار گزارش‌شده به **۰٫۰۴ تا ۰٫۴ تن CO بر تن فولاد** می‌رسد [۶۷]. دستیابی واقعی به این مقادیر به ترکیب برق، مرز محاسبه انتشار و روش تأمین هیدروژن وابسته است.

۴ـ۱ـ۱. نمونه‌های صنعتی کوره‌های قوس سبز و پربازده

تجربه جهانی نشان می‌دهد آثار کربن‌زدایی مسیر کوتاه از مرحله بحث نظری فراتر رفته است، هرچند فناوری‌های مناسب هر منطقه یکسان نیستند. جدول ۹ طرح‌هایی را مقایسه می‌کند که از افزایش مصرف قراضه، تلفیق برق تجدیدپذیر و اصلاح کنترل فرایند استفاده کرده‌اند. درس مشترک این تجربه‌ها روشن است: **بازیافت قراضه زیربنا، برق پاک ستون اصلی و کنترل هوشمند ضامن عملکرد پایدار** است.

جدول 9. نمونه‌های صنعتی فولادسازی با کوره قوس الکتریکی

Table 9. Application cases of electric arc furnace (EAF) steelmaking.

Project	Country/Region	Technical Highlights	Investment Scale	Key Performance Indicators (Energy Saving/Emission Reduction)
ArcelorMittal Belgium Plant	Belgium	Scrap preheating system + waste gas recovery	EUR 100 million	Energy consumption reduced by 12% (electricity); CO_2 emissions reduced by 15% (1 million tons/year); scrap ratio increased to 75% (from 60%) [76]
Nucor Arkansas Retrofit	USA	High-efficiency EAF design + renewable energy supply (solar/wind)	USD 200 million	Energy consumption reduced by 11% (400 kWh/t steel); CO_2 emissions reduced by 20% (2 million tons/year); scrap ratio increased to 85% (from 65%) [77]
Baosteel Changxing Retrofit	China	EAF + secondary refining technology + increased scrap ratio	CNY 1 billion	Energy consumption reduced by 10% (450 kWh/t steel); CO_2 emissions reduced by 18% (150,000 tons/year); scrap ratio increased to 70% (from 55%) [78]
Nippon Steel Kobe Gas Recovery	Japan	Waste gas recovery for scrap preheating + oxygen-enriched combustion	USD 600 million	Energy consumption reduced by 12% (electricity); CO_2 emissions reduced by 15% (1.3 million tons/year); scrap ratio maintained at 80% [79]

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

با وجود تفاوت اولویت‌ها ــ اروپا و آمریکا بیشتر از زیرساخت انرژی پاک و چین و ژاپن بیشتر از یکپارچگی و بهبود عملیاتی استفاده می‌کنند ــ ترکیب سهم قراضه بیش از **۸۰ درصد**، بازیافت انرژی و کنترل هوشمند به کاهش حدود **۱۵ تا ۲۰ درصدی CO به ازای هر تن فولاد** در نمونه‌های مورد مطالعه انجامیده است. برای ارزیابی هر پروژه باید سهم هر راهکار را جداگانه و با یک خط مبنای روشن اندازه‌گیری کرد.

SteelExperts.ir

جدول 10. مقایسه نمونه‌های منتخب کوره قوس از نظر مزیت، چالش و تفاوت‌ها

Table 10. Comparative analysis of representative EAF application cases.

Project	Advantages	Challenges	Distinctive Features
ArcelorMittal (Belgium)	Mature heat recovery technology; high scrap utilization rate (75%)	Difficulty in scrap impurity control; reliance on imported scrap	Representative of Europe's circular economy model; policy-driven retrofitting
Nucor (USA)	High green power integration (solar/wind); world-leading scrap ratio (85%)	Geographically constrained green power supply (limited replicability in low-resource areas)	Deep market-driven integration of renewables and steel production
Baosteel (China)	Advanced secondary refining technology; suitability for large-scale production	Underdeveloped scrap recycling system (low domestic scrap quality/poor sorting)	Indigenous technology development path; policy-backed under China's "Dual Carbon" goals
Nippon Steel (Japan)	High waste gas recycling rate (scrap preheating + oxygen enrichment); precision processes	High upgrade costs (USD 600 million); unaffordable for SMEs	Exemplar of resource efficiency; embodies lean manufacturing culture

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

چهار نمونه شاخص در جدول ۱۰ شامل **آرسلورمیتال در گنت بلژیک** با تأکید بر بازیافت قراضه، **نوکور در شارلوت آمریکا** با تمرکز بر تلفیق برق سبز، **بائواستیل در شانگهای** با نوسازی فشرده تجهیزات و **نیپون‌استیل در توکیو** با استفاده مجدد از گازهاست. این مقایسه نشان می‌دهد سیاست‌های محلی و دسترسی به مواد و انرژی، انتخاب فناوری را شکل می‌دهند؛ هیچ طراحی واحدی برای تمام کارخانه‌ها بهترین گزینه نیست.

فولادسازی EAF به‌تدریج از پروژه‌های منفرد به نوآوری سیستمی در چهار محور **مواد، انرژی، فناوری و سیاست‌گذاری** حرکت می‌کند. توسعه آهن اسفنجی هیدروژنی، ردیابی چرخه عمر قراضه، تأمین یکپارچه برق بادی–خورشیدی–ذخیره‌ساز با هدف سهم **۸۰ درصد یا بیشتر** از انرژی سبز و کاربرد دوقلوی دیجیتال از برنامه‌های آینده‌اند. راه‌حل‌های ماژولار نیز می‌توانند امکان استفاده شرکت‌های کوچک‌تر از فناوری‌های جدید را افزایش دهند.

۴ـ۱ـ۲. کاربرد کوره‌های قوس پیشرفته

کوره قوس با دو جایگزینی «برق به‌جای سوخت‌های کربنی» و «قراضه به‌جای سنگ‌آهن» شیوه مصرف مواد و انرژی در فولادسازی را تغییر می‌دهد. تنوع منابع قراضه، شبکه برق و مقیاس تولید باعث شده راهکارهای فناوری در مناطق گوناگون از هم فاصله بگیرند. شدت انتشار **۰٫۳ تا ۰٫۷ تن CO_2 بر تن فولاد** برای EAF تمام‌قراضه در برابر مسیر بلند مزیت مهمی است، زیرا بخش زیادی از انتشار استخراج، زینترینگ و کک‌سازی حذف می‌شود.

جدول 11. کاربردهای صنعتی کوره قوس الکتریکی کم‌کربن

Table 11. Analysis of low-carbon electric arc furnace (EAF) applications.

Company	Year	Technology/ Application	Key Metrics/Performance	Application Case
MCC-CISDI	2021	World's first IGBT DC EAF	30~40% CO_2 reduction per ton of steel	Panzhihua Special Steel Project
MCC-CISDI	2022	Domestic stepwise continuous charging EAF	35 min smelting cycle	Sichuan Dujiangyan Steel Project
MCC-CISDI	2023	First industrial-scale "Super EAF"	Target smelting energy consumption: 300 kWh/t	Yunnan Yuxi Xianfu Project
SMS Group	2021	Twin-shaft DC EAF (China's first)	45% reduction in smelting energy consumption	HBIS Shisteel New District
SMS Group	2024	World's largest AC EAF (185 t, 300 MVA)	Supports 80% DRI hybrid smelting; annual output: 1.9 Mt molten steel	Saarstahl AG, Germany
Danieli	2023	Q-ONE Lossless EAF Power System	Reduced power loss, improved energy efficiency	Commercial Metals Company, USA
SPCO (Japan)	—	ECOARC Ecological EAF	Fully enclosed scrap preheating; dioxin emissions < 0.1 ng TEQ/m^3	Benxi Steel Application
Primetals	—	Ultimate EAF (120 t)	40 heats/day; 10% energy reduction	NSMMZ Steel Plant, Russia
Thyssen and SMS	2026	Midrex H_2-DRI + EAF Hybrid Plant (Planned)	Annual DRI output: 2.5 Mt	Duisburg, Germany (Planned)
Voestalpine	2026	Hyfor-EAF (Hy4Smelt Pilot)	Pilot scale: 3 t/h; commercialization plan: 2.5 Mt/a	Based on Primetals Technologies
POSCO	2028	HyRex Fluidized Bed DRI + EAF Process	Fluidized bed DRI technology under pilot validation	Developed from FINEX Process
Tenova	—	iBlue (Enerqiron DRI + OSBF EAF)	BF alternative with cost advantages over DRI-EAF routes	Technical feasibility study phase
BHP and Hatch	2023	EAF Pilot Plant	Annual capacity: 10,000 t; informs decision-making for Australian facilities	Australia (Joint Design)
BHP, Rio Tinto and BlueScope	2024	ESF Process Development	Joint development of EAF-based smelting technology	Collaborative Framework Agreement
Rio Tinto and China Baowu	2023	Pilot-Scale EAF	Produces DRI from mid/low-grade iron ore fines for low-carbon steel	Baowu Demonstration Project (Planned)

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

در چین، شرکت **MCC–CISDI** و طرح‌های آزمایشی هیدروژنی **Baowu** به نوسازی تجهیزات و تغییر مواد اولیه توجه دارند. در اروپا، شرکت‌های **SMS Group** و **ThyssenKrupp** و فناوری **Hyfor** شرکت Voestalpine در کانون توسعه کوره‌های بزرگ و احیای هیدروژنی قرار گرفته‌اند. در ژاپن، **Eco-Arc** و در آمریکای شمالی سامانه تغذیه برق **Q-ONE** شرکت Danieli از نمونه‌های مورد بررسی‌اند. تفاوت این انتخاب‌ها بیش از هر چیز بازتاب منابع، هزینه برق، ظرفیت سرمایه‌گذاری و چارچوب سیاستی هر منطقه است.

جدول 12. مقایسه عملکرد سبزِ کوره‌های قوس الکتریکی منتخب

Table 12. Green performance analysis of representative electric arc furnaces.

Company	Type	Technical Features	Advantages	Emission Reduction	Energy Savings	Cost-Saving Case
CISDI	Super EAF (IGBT Flexible DC)	Dual-electrode DC power supply, continuous scrap preheating, dioxin control via flue gas diversion, intelligent electrode adjustment	30 min smelting cycle; 40% lower electrode consumption; 160 kg/t steam recovery from waste heat	30~40% reduction vs. conventional EAF	300 kWh/t steel (industry-leading)	Panzhihua Special Steel Project saves CNY 20 million/year in electricity costs [80]
Primetals Quantum EAF	Shaft Preheating EAF	Fully automatic charging, finger scrap retention system, bottom-blown stirring	Flexible feedstock (0~100% scrap/DRI); 15 dB noise reduction	<500 kg CO_2/t steel [81]	350 kWh/t steel	Tyasa Mexico achieves 25% higher smelting efficiency [82]
Tenova Consteel	Continuous Charging EAF	Horizontal scrap conveyor + flue gas preheating, dynamic sealing, smart slag foaming	Adapts to low-density scrap; 50% reduction in grid impact [83]	20~30% reduction vs. conventional	>70% waste heat utilization [84]	Nucor USA reduces 35% electrode consumption
Danieli Q-ONE	Quantum EAF	Electromagnetic stirring + ultrasonic detection, AI dynamic model, scrap-DRI co-preheating	Endpoint carbon control precision ±0.02% [85]; 2% higher metal yield	Up to 80% reduction with H_2-DRI	25% lower oxygen consumption	Erdemir Turkey reduces USD 8.5/t steel cost
SMS Group	Intelligent EAF	Multi-sensor fusion (infrared + laser), digital twin system, CO_2 injection denitrification	Nitrogen content < 60 ppm; dioxin emissions < 0.1 ng TEQ/m^3	Optimal green power adaptation	40% lower natural gas use	Salzgitter Germany cuts 18% maintenance costs
Japan NKK DC EAF	Dual-Electrode DC EAF	Water-cooled bottom anode, stepwise charging, bottom argon blowing	Suitable for high-alloy steel; 70% harmonic pollution reduction	60% reduction vs. BF–BOF	Electrode consumption < 1.2 kg/t [86]	Nippon Steel improves 30% production rhythm

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

بنا بر داده‌های گردآوری‌شده در جدول ۱۲، بعضی کوره‌های هوشمند امروزی به مصرف برق **۳۰۰ تا ۳۵۰ کیلووات‌ساعت بر تن فولاد**، سیکل ذوب حدود **۳۰ دقیقه** و کاهش **۲۰ تا ۸۰ درصدی** شدت انتشار در مقایسه با خطوط مرجع خود رسیده‌اند. نمونه پروژه فولاد ویژه پانژی‌هوا، صرفه‌جویی سالانه حدود **۲۰ میلیون یوان** را گزارش کرده است. سامانه‌های بازیافت گرمای قراضه، مدل‌های دینامیکی مبتنی بر هوش مصنوعی با دقت کنترل کربن نقطه پایان **±۰٫۰۲ درصد** [۸۵] و ترکیب EAF با آهن احیای مستقیم هیدروژنی در این دستاوردها

نقش دارند.

البته چالش‌هایی مانند ذوب قراضه کم‌چگالی، هزینه بالای هیدروژن سبز و خطای کنترل هم‌زمان چند هدف هنوز پابرجاست. سه حوزه پیشنهادی برای توسعه عبارت‌اند از: **هم‌افزایی برق و هیدروژن**، برای مثال پیوند Q-ONE با هیدروژن سبز؛ **رهگیری دیجیتال کربن** در زنجیره تأمین، از جمله با فناوری دفترکل توزیع‌شده؛ و **قیمت‌گذاری کربن** با سطوح محرک، مانند بیش از **۸۰ دلار به ازای هر تن CO**. مقاله هدف کاهش **۵۰ درصدی** انتشار کوره قوس تا **۲۰۳۰** را نسبت به سال **۲۰۲۰** مطرح می‌کند؛ این هدف، پیش‌بینی قطعی عملکرد همه خطوط نیست.

۴-۱-۳. نمونه‌های کاربرد برق تجدیدپذیر در فولادسازی

برق تجدیدپذیر نقش تعیین‌کننده‌ای در کربن‌زدایی کوره قوس دارد. طرح‌های صنعتی در مناطق مختلف، برق خورشیدی، بادی، برق‌آبی و تولید هیدروژن با الکترولیز را با فولادسازی پیوند داده‌اند. آثار این ترکیب بر انتشار به ترکیب سبد برق، ساعت بهره‌برداری و قابلیت ذخیره یا جابه‌جایی بار الکتریکی وابسته است.

جدول 13. نمونه‌های استفاده از برق تجدیدپذیر در تولید فولاد EAF

hydrogen electrolysis—these projects achieve significant carbon emission reductions in steel production. Detailed case studies and their specifications are presented in Table 13.

Table 13. Representative cases of green electricity applications in EAF steelmaking.

Country	Project/Enterprise	Technology Applied	Implementation Method	Energy Saving and Emission Reduction Effects
Sweden	HYBRIT Project (SSAB)	Green hydrogen–EAF steelmaking	Hydrogen production via water electrolysis	>90% CO_2 reduction; targets 1 Mt/year green steel; requires ~70,000 m^3/h electricity [87]
Germany	Thyssenkrupp	Hydrogen-based DRI-EAF	Green power and hydrogen for steel production	4.9 kWh/t steel; 0.75 kg CO_2/kg steel by 2040 [88,89]
Australia	Green Steel Project	Green hydrogen DRI-EAF	Optimized wind-solar hybrid hydrogen production	1.2~2.7 GW renewables + 200~400 MW electrolyzer per Mt steel; cost: AUD 900/t (2030), AUD 750/t (2050) [89]
China	Baowu Zhanjiang Demo Line	Solar/wind-powered EAF	Green electricity for EAF operations	20~90% CO_2 reduction per ton steel [90,91]
Australia	Economic Fairways	Wind/solar-to-hydrogen for EAF	Renewable hydrogen integration	Replacing 1% of global steel output requires 35 GW renewables, 11 GW electrolyzers; >85% indirect emission reduction [92]
EU	Low-Carbon Transition Project	EAF with green hydrogen DRI	Hydrogen-centric decarbonization	25% direct CO_2 reduction by 2030; additional 20 TWh power and 40 TWhHHV hydrogen demand [93]
USA	Nucor Arkansas Plant	100% scrap-EAF + Green Power	Solar farm + storage (1.8 TWh/year)	300-tonne EAF; 3 Mt/year output; 85% green power share (2025 target) [94]

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

نمونه‌های جدول ۱۳، هم ظرفیت بالای کاهش انتشار و هم تفاوت منطقه‌ای منابع، فناوری و سیاست حمایتی را روشن می‌کنند. در مناطقی که برق تجدیدپذیر فراوان اما ناپیوسته است، ذخیره انرژی و زمان‌بندی ذوب اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ در مناطقی با شبکه پایدار برق‌آبی، مزیت اصلی می‌تواند شدت انتشار کمتر برق ورودی باشد. توسعه زیرساخت پاک، بهبود قابلیت پیش‌بینی قیمت انرژی و قراردادهای بلندمدت خرید برق از عوامل مؤثر بر گسترش این مدل‌ها هستند.

۴.۱.۴. تجربه کوره‌های شفت احیای آهن با هیدروژن

احیای مستقیم سنگ‌آهن با هیدروژن در کوره شفت یکی از جدی‌ترین گزینه‌های کربن‌زدایی عمیق به شمار می‌رود. با جایگزینی گاز احیاکننده کم‌کربن یا هیدروژن سبز به‌جای زغال‌سنگ و کک، شدت انتشار می‌تواند به حدود **۰٫۰۴ تا ۰٫۴ تن CO بر تن فولاد** برسد؛ یعنی **۶۰ تا ۹۸ درصد** کمتر از کوره بلند متعارف، البته بر پایه شرایط و مرزهای مقایسه ذکرشده در مقاله. پروژه‌های **MIDREX H**، با درجه فلزی‌شدن بیش از **۹۴ درصد**، و **HYBRIT** پیشرفت در احیای هیدروژنی، بازیافت گرما و یکپارچگی مسیر کوتاه را نشان می‌دهند.

جدول 14. مقایسه پروژه‌های احیای سنگ‌آهن با هیدروژن در کوره شفت

SteelExperts.ir

Table 14. Comparative analysis of hydrogen-based shaft furnace application cases.

Project	Technology	Scale/Case	Advantages	Challenges	Suitable Regions	Distinctive Features
MIDREX H_2	Natural gas reforming (H_2 > 90%); metallization > 94% [95]	Boden Plant, Sweden (2.1 Mt/year)	Fully replaces blast furnaces; 0.04 t CO_2/t steel	Relies on natural gas; green H_2 cost (~USD 4~6/kg)	Gas-rich areas (e.g., North America)	First 100% H_2-DRI plant; highest maturity
HYBRIT	Wind-powered H_2 + EAF; targets 25 kg CO_2/t steel	Pilot in Sweden (industrial by 2035)	Fossil-free lifecycle; 95% emission reduction potential	High green power demand (4~5 MWh/t steel); 10~15 year industrialization	Renewable-rich (e.g., Scandinavia)	Full lifecycle decarbonization; integrates wind-H_2-EAF [96,97]
SALCOS	Waste heat-to-H_2 (GrInHy 2.0); targets 95% reduction [98]	Germany test (40 Nm^3/h H_2)	>80% waste heat utilization; 3.5 kWh/Nm^3 H_2 production [98]	H_2 storage/transport costs (35% share); immature liquid H_2 tech	Industrial clusters (e.g., Ruhr, Germany)	Waste heat–H_2 coupling benchmark [99]
Baowu Zhanjiang	Hybrid gas (57% NG +13% H_2); Inconel 625 alloy tubes	China (1 Mt/year)	58~89% CO_2 reduction; 30,000 h tube lifespan	Low H_2 share (13%); fossil fuel dependency	Coastal renewable hubs (e.g., Guangdong)	Multi-gas synergy + anti-hydrogen embrittlement materials [100]
China Iron and Steel Research	Pure H_2 (>95%); 85% waste heat recovery	Shandong demo plant	40% lower energy use (8.5 GJ/t iron); 0.138 t CO_2/t	DRI reoxidation risk (+USD 20~30/t carburization)	Stable H_2 supply zones (e.g., NW China)	Pure H_2 metallurgy breakthrough; energy efficiency [101]
NEU Pilot Base	High-grade pellets (TFe > 70%, >2500 N/pellet) + H_2-EAF short process	Global first 10 kt/year demo line	<300 kWh/t steel; multi-field coupling theory	Small scale (10 kt/year); lacks industrial validation	Specialty steel producers	Short-process integration + pellet innovation [102,103]
HYL-ZR	Methane self-reforming (950~1050 °C); no external reformer	JSPL Plant, India	2.8 GJ/t DRI (vs. 3.2 GJ industry avg.); 0.4 t CO_2/t	Carbon deposition (30% higher corrosion); +15~20% maintenance costs	Coke-rich regions (e.g., India)	Simplified process; ideal for coke oven gas reuse [104]

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

هزینه هیدروژن سبز ــ حدود **۴ تا ۶ دلار بر کیلوگرم** در برآورد مقاله ــ خطر اکسایش مجدد DRI و مشکلات ذخیره و حمل‌ونقل هیدروژن از موانع جدی گسترش‌اند. جدول ۱۴ نشان می‌دهد سه راهبرد برای عبور از این موانع دنبال می‌شود: **جایگزینی عمیق هیدروژن سبز** مانند HYBRIT با رقم گزارش‌شده **۲۵ کیلوگرم CO بر تن فولاد**؛ **گذار با گاز ترکیبی** مانند طرح بائوو در ژان‌جیانگ با سهم **۱۳ درصدی** هیدروژن سبز؛ و **بهینه‌سازی یکپارچه فرایند** مانند SALCOS، که مصرف برق تولید هیدروژن را حدود **۳٫۵ کیلووات‌ساعت بر نرمال‌مترمکعب** اعلام کرده است.

در نمونه‌های دیگر، کاهش **۴۰ درصدی** مصرف انرژی به ازای هر تن آهن در موسسه پژوهش آهن و فولاد چین

و عمر کاری **۳۰ هزار ساعت** برای تجهیزات در پروژه Baowu Zhanjiang مطرح شده است. اما مسیر MIDREX H در بعضی آرایش‌ها هنوز به گاز طبیعی وابسته است، پایدارسازی DRI ممکن است به کربن‌دهی نیاز داشته باشد و هزینه هیدروژن مایع در نمونه SALCOS تا **۳۵ درصد** هزینه عملیات را تشکیل دهد. بنابراین همه طرح‌های «هیدروژنی» الزاماً صددرصد سبز یا عاری از انتشار نیستند.

هدف نهایی، احیا با **۱۰۰ درصد هیدروژن سبز** است؛ در کوتاه‌مدت، سامانه‌های ترکیبی هیدروژن خاکستری و سبز می‌توانند نقش گذار داشته باشند. این مسیر به آلیاژهای مقاوم به هیدروژن، گندله مستحکم، بازیافت گرما و حمایت‌هایی مانند قیمت‌گذاری کربن و یارانه هیدروژن نیاز دارد. نویسندگان گسترش صنعتی قابل‌توجه تا **۲۰۳۵** را پیش‌بینی می‌کنند؛ اروپا بیشتر بر هیدروژن خالص، چین بر سامانه‌های ترکیبی و آمریکای شمالی بر تجهیزات ماژولار متناسب با محدودیت زیرساخت تمرکز کرده‌اند.

روندهای منطقه‌ای. در اروپا و آمریکا توسعه سامانه‌های حلقه‌بسته با برق سبز و مصرف گسترده قراضه مورد توجه است، درحالی‌که چین و ژاپن به یکپارچه‌سازی و بهینه‌سازی دقیق عملیات گرایش بیشتری دارند. مقاله پیش‌بینی می‌کند با افزایش عرضه قراضه و برق پاک، فولادسازی EAF در **۱۰ تا ۲۰ سال آینده** سهم غالب‌تری پیدا کند. کاهش هزینه فناوری، فشار قیمت کربن و تقاضا برای زنجیره تأمین سبز، هم‌زمان به دو هدف **کاهش انتشار** و **توجیه اقتصادی** جهت می‌دهد.

۲.۴. کنترل کربن در جریان فولادسازی EAF

کوره قوس با حذف مراحل پرانتشار کک‌سازی و کوره بلند، ظرفیت مهمی برای گذار سبز فراهم کرده است؛ اما بهره‌برداری سنتی آن همچنان با نوسان کربن مذاب، مصرف انرژی بالا و آلودگی‌های ناشی از عناصر همراه قراضه روبه‌روست. برای مهار این مشکلات، سامانه‌های ترکیب هوشمند شارژ، درجه‌بندی قراضه، پایش ناخالصی‌ها و پیش‌بینی نقطه پایان در حال توسعه‌اند.

جدول 15. فناوری‌های آزمایشی کنترل کربن در فرایند EAF

Table 15. Pilot technologies for process carbon control in short-process EAF steelmaking.

Technology	Main Function	Core Technologies
Fully Automated Scrap Intelligent Batching System [105]	Optimizes raw material ratio to enhance molten steel quality	Machine learning algorithms, multi-source sensor fusion technology
Scrap Classification and Impurity Control [106]	Improves feedstock quality by reducing harmful elements	Machine vision recognition, spectral analysis sorting technology
Low-Carbon Metallurgical Process Coupling [107,108]	Achieves energy-process synergy for carbon reduction	Multi-energy coupling modeling, system integration optimization technology
Intelligent Power Supply and Energy Management [109]	Optimizes power allocation for energy efficiency	Dynamic scheduling algorithms, energy storage system integration technology
Smart and Digital Control Technology [110]	Enhances production automation and real-time optimization	Industrial IoT platforms, AI-driven process decision systems
Short-Process Integration [111,112]	Shortens production flow to reduce overall energy consumption	Interface reaction control technology, process reengineering technology

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

فناوری‌های کنترل هوشمند، از جمله تنظیم پویای نقطه پایان ذوب، بهینه‌سازی پیش‌گرمایش قراضه و پایدارسازی قوس، پارامترهای انرژی و کیفیت را در حین عملیات تنظیم می‌کنند. جدول ۱۶ نتایج تجربی این راهکارها را از نظر مصرف برق، شدت انتشار، کنترل کربن و صرفه اقتصادی گردآوری کرده است.

جدول 16. تجربه سامانه‌های کنترل هوشمند کوره قوس در کارخانه‌های جهان

Table 16. Global case studies of intelligent control systems in EAF Steelmaking for low-carbon applications.

Company (Country)	Technical Solution	Key Parameters and Data	Carbon Control and Economic Benefits
Nucor (USA)	SHARC DC EAF (150 t/160 MW) Twin-shaft scrap preheating (800 °C) Supersonic coherent jet oxygen lance (3500 m^3/h)	Power consumption: 270 kWh/t (decrease18%) Tap-to-tap time: 40 min Electrode consumption: 1.0 kg/t Scrap preheating efficiency: 45% [113]	35% reduction in CO_2 intensity per ton Annual CO_2 reduction: 500,000 t FeO generation decrease: 30% [114]
ECOARC (Japan)	Flat bath AC EAF Ar/N_2 bottom stirring (0.5~1.5 Nm^3/(min·t)) Off-gas scrap preheating (400~800 °C)	Energy consumption decrease: 22% Dust emissions decrease: 30% Tap-to-tap time: 45 min Furnace lifespan: 1000 heats	Annual coal savings: 120,000 tce FeO in slag decrease: 15% Arc thermal efficiency increase: 18% [113,114]
Danieli (Italy)	AI stockyard system Machine vision scrap sorting (98% accuracy) IR slag detection (slag thickness $\leq$ 35 mm)	Scrap utilization: 98% Lime consumption decrease: 15% (baseline: 50 kg/t) Auxiliary materials decrease: 20%	28% reduction in CO_2/t steel Annual cost savings: USD 12 M Steel purity increase: 25% [115]
HBIS Shisteel (China)	SHARC twinshaft DC EAF (150 t) Ar/N_2 bottom blowing (0.8~1.2 Nm^3/min) Onetap intelligent smelting system	Power consumption: 250 kWh/t (decrease 25%) Tapping time: 38 min Electrode consumption: 0.95 kg/t Endpoint C deviation: ±0.02%	Annual CO_2 reduction: 300,000 t Total energy consumption decrease: 25% Manual intervention decrease: 80% [116]
SMS Group (Germany)	Conductive bottom electrode DC EAF High-impedance circuit design (4~8 mΩ) Arc harmonic suppression technology	Electrode lifespan: 3500 heats (increase of 40%) Electrical efficiency increase: 12% Harmonic incidence decrease: 50%	Electrode consumption decrease: 40%/t steel Annual power savings: 120 GWh Grid stability: voltage fluctuation $\leq$ 5% [114]
Sha Steel Group (China)	Static control model Material/heat balance algorithm for slag optimization Endpoint C prediction (±0.02%)	Lime consumption: 487 kg/t (baseline: 1200 kg/t) Dolomite decrease: 683 kg/t Splashing rate decrease: 90%	18% reduction in CO_2/t steel Iron loss decrease: 5.63 kg/t Annual savings: CNY 8 M (auxiliary costs decrease 25%) [117]

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

در نوکور آمریکا، سامانه پیش‌گرمایش قراضه با شفت دوقلو، بازده گزارش‌شده **۴۵ درصدی** دارد؛ در HBIS Shisteel چین، انحراف کنترل کربن در نقطه پایان تا **±۰٫۰۲ درصد** گزارش شده است [۱۱۶]؛ و SMS Group آلمان با کنترل پایداری قوس، هارمونیک‌ها را **۵۰ درصد** کاهش داده است [۱۱۴]. مجموعه نمونه‌های صنعتیِ بررسی‌شده مصرف برق را به حدود **۲۵۰ تا ۲۷۰ کیلووات‌ساعت بر تن** رسانده، شدت انتشار را **۱۸ تا ۳۵ درصد** کاهش داده و در برخی پروژه‌ها از کاهش سالانه **۳۰۰ تا ۵۰۰ هزار تن CO** خبر داده‌اند.

شرکت Danieli ایتالیا با سامانه مدیریت هوشمند محوطه قراضه، نرخ استفاده از قراضه را به **۹۸ درصد** رسانده و صرفه‌جویی سالانه **۱۲ میلیون دلار** را گزارش کرده است [۱۱۵]. محدودیت‌های کنونی به کنترل ناخالصی قراضه، بهای هیدروژن سبز و دقت ناکافی در بهینه‌سازی چندهدفه مربوط‌اند. یکپارچه‌سازی **DRI هیدروژنی–EAF** و کنترل بلادرنگ با **دوقلوی دیجیتال** از مسیرهای مهم آینده است.

۴ـ۳. مدیریت انتشار و پسماند در انتهای خط EAF

روش‌هایی مانند کاهش انتشار با پلاسمای کمکی و جداسازی غشایی کم‌انرژی در پروژه‌های آزمایشی پیشرفت‌هایی نشان داده‌اند، اما مصرف انرژی بالا و پایداری محدود فرایند هنوز مانع بلوغ صنعتی آن‌هاست. در عوض، **بازیافت گرمای اتلافی** و **فرآوری سرباره** تجربه بهره‌برداری بیشتری دارند و در حال حاضر می‌توانند کاهش مصرف انرژی و آلایندگی را با ریسک اجرایی کمتری دنبال کنند.

جدول 17. فناوری‌های آزمایشی مدیریت پسماند و انتشار در انتهای خط EAF

Table 17. Pilot technologies for end-of-pipe treatment in EAF short-process steelmaking.

Technology	Primary Function	Core Technology/Method
Flue Gas Waste Heat Deep Recovery and Utilization [118]	Recovers waste heat from flue gas and converts it into electricity/thermal energy	ORC power generation, absorption heat pump, cascade heat utilization
Cooperative Treatment of Flue Gas Pollutants [119]	Integrated removal of multiple pollutants (SO_2, NOx, etc.)	Activated coke adsorption, non-thermal plasma, catalytic oxidation
Gas Resource Recovery and Recycling [120]	Purifies and recycles valuable components (H_2, CO, etc.) from furnace gas	Membrane separation, PSA hydrogen purification, syngas conversion
Steel Slag Carbonation for CO_2 Sequestration [121]	Utilizes steel slag to fix CO_2 while improving slag recycling properties	Mineral carbonation (CaO/MgO-CO_2 reaction)
Co-processing of Solid Wastes [122]	Synergistic treatment and high-value utilization of multi-source solid wastes	Co-processing in cement kilns, gasification for syngas, building material production
Plasma-Assisted Emission Reduction [123]	Degrades refractory pollutants (dioxins, VOCs, etc.)	Non-thermal plasma (corona discharge, dielectric barrier discharge)
Ultra-Low Energy Membrane Separation [124,125]	High-efficiency separation of target components in gas/liquid streams	MOFs membranes, graphene membranes, mixed-matrix membranes

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

۴ـ۳ـ۱. استفاده از گرمای اتلافی در فولادسازی قوس الکتریکی

گرچه مسیر EAF نسبت به BF–BOF کوتاه‌تر و کم‌کربن‌تر است، منابع بزرگی از انرژی حرارتی آن هدر می‌رود. دمای گاز خروجی در برخی مراحل به **۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سلسیوس** می‌رسد، آب خنک‌کاری حدود **۵۰ تا ۸۵ درجه**

سلسیوس است و سرباره نیز گرمای محسوس قابل‌توجهی دارد. برآورد مقاله نشان می‌دهد این اتلاف‌ها می‌توانند **۱۵ تا ۲۵ درصد** انرژی ورودی را تشکیل دهند.

راهکارهای توسعه‌یافته شامل تولید برق از گاز داغ، پیش‌گرمایش قراضه، استفاده از گرما برای تأمین حرارت منطقه‌ای و سامانه‌های خنک‌کاری تبخیری‌اند. جدول ۱۸ تجربه کارخانه‌های مختلف را برحسب طراحی فنی، صرفه‌جویی انرژی و عملکرد محیط‌زیستی مقایسه می‌کند.

جدول 18. پروژه‌های صنعتی استفاده از گرمای اتلافی کوره قوس

Table 18. Representative cases of waste heat utilization in global EAF steelmaking.

Country	Company/Project	Technical Solution	Key Data and Performance
China	Tianjin Pipe Group (90 t EAF Project)	Evaporative cooling system Flue gas heat storage	Steam output: 242 kg/t steel 5% reduction in power consumption/t steel Annual CO_2 reduction: 16,000 t Equipment lifespan extended to >2 years [126,127]
China	Laiwu Steel Group Waste Heat Heating System	BF slag flushing water + sintering waste heat recovery	Heating coverage: 5.3 million m^2 Annual energy cost savings: CNY 1.1 million Replaced coal boilers, reducing 3.7 t SO_2/year [128]
Germany	SMS Group CONSTEEL EAF Project	Continuous scrap preheating Post-combustion technology	Scrap preheating temp.: 300 °C 14% shorter tap-to-tap time [129] Post-combustion rate (PC): 60% 22% lower energy consumption/t steel [130]
Japan	Nippon Steel DC EAF System	DC EAF + waste heat boiler power generation	Steam pressure: 2.0 MPa Annual power generation: 8.4 GWh Electrode consumption: 1.1 kg/t 30% reduction in refractory consumption [131]
USA	Nucor Crawfordsville Plant	Oxygen fuel burners Hot metal charging (30%)	Power consumption: 300 kWh/t steel Oxygen supply: 45 m^3/t Tap-to-tap time: 50 min [132]
South Africa	ISCOR EAF Bottom Blowing Project	Inert gas bottom stirring Waste heat heating	Gas flow rate: 0.25~0.3 m^3/t 5% lower power consumption Heating coverage: 2 million m^2 20% improvement in molten steel homogeneity [133]
Italy	Danieli QOne EAF Project	Fully enclosed design Multistage scrap preheating	Scrap preheating temp.: 600 °C Power consumption: 360 kWh/t steel Dust emissions: <30 mg/m^3 EAF lifespan: 2500 heats [134]

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

در نمونه‌های گزارش‌شده، سامانه‌های خنک‌کاری تبخیری، پس‌سوزی CO (برای مثال نرخ **۶۰ درصدی** پس‌سوزی در طرح CONSTEEL آلمان) و دیگ بازیاب گرمای متصل به کوره قوس DC، تا **۵ تا ۳۰ درصد** مصرف برق به ازای هر تن فولاد را کم کرده‌اند. در ژاپن، نمونه‌ای از نیپون‌استیل تولید سالانه **۸٫۴ گیگاوات‌ساعت** برق را گزارش می‌کند و دامنه کاهش انتشار در پروژه‌های بررسی‌شده حدود **۱۶ تا ۳۷ هزار تن در سال** است.

مسائل باقی‌مانده شامل سرمایه اولیه بالا، طراحی پیچیده مبدل‌ها و کنترل جریان ناپیوسته گاز خروجی است. مدیریت هوشمند شبکه گرما، استفاده آبشاری از انرژی شیمیایی و حرارتیِ گاز داغ، پیوند بازیافت گرما با تولید هیدروژن و هم‌افزایی تولید برق و گرمایش منطقه‌ای از راهکارهای آینده‌اند. استانداردهای فنی و مشوق‌های سیاستی نیز برای گسترش کاربرد آن‌ها ضروری‌اند. کربن‌زدایی EAF فقط به بهبود ذوب وابسته نیست؛ بهره‌برداری مؤثر از انرژی اتلافیِ کل زنجیره اهمیت مشابهی دارد.

۴ـ۳ـ۲. فرآوری سرباره کوره قوس؛ از پسماند به منبع ارزشمند

استفاده مؤثر از سرباره EAF هم برای کاهش انتشار و هم برای تقویت اقتصاد چرخشی اهمیت دارد. مسیرهای بازیابی فلز، جایگزینی مواد اولیه ساختمانی، بازیافت انرژی گرمایی و کاربردهای پالایش محیط‌زیست، گزینه‌هایی برای افزایش ارزش این جریان هستند. جدول ۱۹ نمونه‌های صنعتی و پژوهشی را از کشورهای مختلف در کنار نتایج فنی و اقتصادی مقایسه می‌کند.

جدول 19. نمونه‌های صنعتی فرآوری و استفاده مجدد از سرباره EAF

SteelExperts.ir

Table 19. Global Application cases of EAF slag treatment.

Company/Project	Technology Application	Energy-Saving and Emission Reduction Data	Cost Savings Data
NucorSteel Brandenburg (USA)	Metal recovery from EAF slag (Cr, V, Mo)	Annual slag processing: 5~6 Mt; metal recovery rate: >95%; reduced iron ore consumption: 1.2 Mt/year	Value added per ton of slag: 50~80; annual revenue increase: 300~480 M [135]
TECNALIA Concrete Substitute Project (Spain)	EAF oxidized slag as concrete aggregate	Aggregate substitution rate: 50%; CO_2 reduction: 18%; energy consumption decrease: 22%	Material cost decrease: 12%; road construction cost savings: 8% [136]
Hengyang Valin Steel Pipe Slag Prediction System (China)	Real-time slag composition prediction model	Auxiliary material consumption decrease: 10~15%; smelting energy decrease: 8%	Annual limestone savings: 12,000 t; cost reduction: CNY 6 M [137]
Jinchuan Group DC EAF Project (China)	Selective reduction smelting of Kaldo slag	Ni/Cu recovery rate: >98.5%; residual metals in slag: <0.3%; reduced tailings landfill: 120,000 t/year	Slag treatment cost decrease: 35%; annual high-grade alloy output: 20,000 t; revenue: CNY 480 M [82]
ThyssenKrupp Steel Europe AG (Germany)	Magnetic separation and road construction utilization	Slag recycling rate: 94% (70% for road base); compressive strength: 50 MPa [138]	Natural aggregate substitution cost decrease: 25%; annual raw material savings: EUR 120 M
Topy Industries Ltd. (Japan)	Slag-based soil amendment	Soil pH increase: 1.5~2.0; Fe utilization efficiency increase: 40%	Fertilizer cost decrease: 30%; annual lime application reduction: 50,000 t [139]
Ceramica S.p.A (Italy)	Slag-fired ceramic tiles	Tile water absorption: <2% (40% slag content); flexural strength: 35 MPa; heavy metal leaching compliant with EU standards	Production cost decrease: 20%; annual eco-tile output: 500,000 m^2 [140]

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

بر پایه نمونه‌های مقاله، فناوری‌های یکپارچه استفاده از سرباره می‌توانند کاهش انتشار حدود **۱۵ تا ۳۰ درصد** در مقیاس گزارش‌شده پروژه‌ها، جایگزینی **۱٫۲ میلیون تن سنگ‌آهن در سال** [۱۳۵] و کاهش **۸ تا ۴۰ درصدی** هزینه‌های مرتبط را به همراه داشته باشند. دامنه این اعداد و مرز محاسبات میان پروژه‌ها متفاوت است و نباید آن‌ها را به‌عنوان بازده ثابت هر خط سرباره‌سازی تلقی کرد.

نظام بازیافت سرباره امروز بر سه حوزه استوار است: **بازیابی فلز، استفاده به‌جای مواد ساختمانی و بازیافت انرژی**. بااین‌حال، ترکیب شیمیایی متغیر سرباره و محدودبودن کاربردهای با ارزش افزوده بالا همچنان چالش‌اند. توسعه شناورسازی و جدایش ترکیبی مغناطیسی–ثقلی برای تفکیک دقیق فاز فلزی و سیلیکاتی، شبیه‌سازی چندمقیاسی و ارزیابی چرخه عمر، و طراحی مواد کارکردی مبتنی بر سرباره مانند حامل‌های جذب CO و مواد کاتالیستی، از محورهای پژوهش آینده‌اند.

استانداردسازی ترکیب سرباره و افزایش مصرف آن در صنایع ساختمان، شیمیایی و محیط‌زیست به همکاری بین‌بخشی و کنترل هوشمند نیاز دارد. با ادامه نوآوری و ایجاد مشوق اقتصادی، سرباره می‌تواند از «پسماند انتهای خط» به **حامل ارزشمند منابع کم‌کربن** تبدیل شود. در سطح کل کوره قوس نیز بهینه‌سازی ترکیب شارژ، طراحی سامانه تغذیه ویژه، مدل‌سازی مصرف ماده و انرژی، کنترل هوشمند برق، شبیه‌سازی ذوب سریع تمام‌قراضه، بهبود هم‌زدن از کف و تنظیم دینامیکی عملیات در دستور کار است؛ اما حتی در این مسیر به‌ظاهر ساده نیز موانع فنی و سیاستی پنهان فراوانی وجود دارد.

۵. جمع‌بندی و چشم‌انداز

هدف‌های جهانی بی‌طرفی کربنی، فناوری‌های فولادسازی کم‌کربن را به محور اصلی تحول این صنعت تبدیل کرده‌اند. سه ویژگی در تحولات کنونی برجسته است: **پیشرفت هم‌زمان چند مسیر فناوری**، **سازگارشدن راهکارها با امکانات منطقه‌ای** و **همکاری میان صنایع و حلقه‌های زنجیره تأمین**. مسیر BF–BOF با بهبود عملیات و جذب کربن به سمت کاهش تدریجی انتشار حرکت می‌کند؛ مسیر EAF با بازیافت قراضه و برق پاک ظرفیت تغییر بنیادی‌تری دارد؛ و احیای سنگ‌آهن با هیدروژن سبز گزینه‌ای مهم برای کربن‌زدایی عمیق است.

بااین‌حال، هزینه بالای هیدروژن پاک، یکنواخت نبودن کیفیت قراضه، محدودیت دقت سامانه‌های کنترلی و ناهمخوانی زیرساخت مواد و انرژی در مناطق مختلف مانع توسعه سریع می‌شود. سیاست‌گذاری، سازوکارهای قیمت‌گذاری انتشار و همکاری بین‌المللی باید همراه پیشرفت فناوری حرکت کنند.

کاهش هزینه برق تجدیدپذیر، بلوغ زنجیره تأمین هیدروژن و گسترش دیجیتالی‌سازی می‌تواند گذار به سامانه‌های انرژی پاک، احیای هیدروژنی و چرخه‌های بسته مواد را تسریع کند. در مسیر بلند، ترکیب فناوری‌های دمش، جذب کربن و بازیافت منابع باید با هدف بیشینه‌کردن نتیجه کلی طراحی شود. در مسیر کوتاه، اولویت با آماده‌سازی قراضه، ترکیب برق تجدیدپذیر و ذخیره انرژی و اتصال عمیق آهن اسفنجی هیدروژنی به EAF است؛ به این ترتیب، چرخه‌ای از «بازیافت منابع–انرژی پاک–تولید پربازده» شکل می‌گیرد.

از نگاه نویسندگان، سیاست‌های ملی باید بر پروتکل‌های استاندارد بازیافت قراضه، قیمت‌گذاری روشن کربن و تأمین مالی سبزِ تحقیق و توسعه تأکید کنند. کارخانه‌ها نیز باید راهکارهای همکاری میان صنعت فولاد، ساختمان و شیمی را گسترش دهند؛ از ارزش‌آفرینی سرباره تا تولید مشترک هیدروژن و مواد شیمیایی. پژوهش بنیادی، همگرایی تخصص‌ها و استانداردهای معتبر جهانی برای گواهی فولاد سبز، اجزای مکمل این تحول‌اند.

اولویت کوتاه‌مدت: گسترش کوره‌های قوس با سهم بالای قراضه و برق پاک در مناطقی که تأمین مواد و انرژی مناسب دارند؛ زیرا فناوری به بلوغ بیشتری رسیده و منافع کاهش انتشار آن در پروژه‌های عملیاتی مشاهده

شده است.

اولویت میان‌مدت: توسعه CCUS در مسیرهای بلندِ متکی به کوره بلند، همراه با بهبود یکپارچگی انرژی و استفاده اقتصادی از کربن جذب‌شده.

اولویت بلندمدت: تکمیل و گسترش طرح‌های صنعتی احیای مستقیم با هیدروژن سبز (**H –DRI**) متصل به کوره قوس، با هدف دستیابی به کاهش بسیار عمیق انتشار.

سه دسته ریسک باید در برنامه‌ریزی دیده شوند: **فشار هم‌زمان هزینه و محدودیت منابع**، از جمله هیدروژن گران، ناخالصی قراضه و نبود سامانه جذب کربن اقتصادی؛ **ناهماهنگی سیاست و بازار**، از جمله قیمت‌گذاری ناکافی کربن و نبود تقاضای دارای صرفه اقتصادی برای فولاد سبز؛ و **شکاف منطقه‌ای توسعه**، زیرا کشورهای کم‌برخوردار از نظر شبکه انرژی، سرمایه و آمادگی فناوری ممکن است از جریان گذار جهانی عقب بمانند.

تحول نهایی از «متالورژی کربنی» به «متالورژی سبز»، بیش از تغییر یک کوره یا سوخت است: باید کل سامانه مواد اولیه، انرژی، کنترل، بازیافت و تأمین مالی به‌صورت هماهنگ بازطراحی شود.

پیوست الف ـ سطوح بلوغ فناوری

مقاله اصلی اصطلاح‌های بلوغ فناوری را در جدول A1 تعریف می‌کند تا تفاوت کاربرد صنعتی پایدار با پروژه پایلوت یا پژوهش آزمایشگاهی روشن باشد. هنگام مقایسه طرح‌ها باید این سطح بلوغ جدا از برآورد ظرفیت کاهش انتشار گزارش شود؛ یک فناوری با ظرفیت بالقوه بالا ممکن است هنوز برای سرمایه‌گذاری تجاری در مقیاس کامل آماده نباشد.

جدول A1. تعریف مراحل بلوغ و آمادگی صنعتی فناوری‌ها

Table A1. Technology maturity levels—definitions and status.

Term	Definition and Characteristics	Technical Status
Widely adopted	Broadly used across the industry; standardized and stable processes	Commercialized, stable operation
Mature application	Reliable with clear cost benefits; widely accepted by major firms	Commercial maturity
Promotion and validation phase	Technically validated; pilot trials ongoing at several sites	Industrial pilot + commercial assessment
Industrial trial stage	Under evaluation at specific plants; performance and cost not yet stable	Multiple test cycles required
Industrial adoption phase	Operating in select industrial lines; nearing full commercialization	Semi-standardized, developing infrastructure
Laboratory research stage	Limited to lab-scale or theoretical research; not yet industrially verified	High innovation potential, high risk

داده‌ها و اعداد جدول مطابق نسخه اصلی ناشر حفظ شده‌اند (CC BY 4.0).

اطلاعات تکمیلی مقاله اصلی

نقش نویسندگان: طبق اظهارنامه مقاله، جست‌وجوی منابع، تدوین اولیه متن و سازمان‌دهی داده‌ها بر عهده Jinghua Zhang بوده است؛ تحلیل داده‌ها با همکاری Haoyu Guo انجام شده و Gaiyan Yang، Wei Chen و Yan Wang در راهبری پژوهش نقش داشته‌اند. همه نویسندگان نسخه نهایی را تأیید کرده‌اند.

حمایت مالی: پروژه علم و فناوری محلی با هدایت دولت مرکزی چین، با شماره **236Z1017G**، و برنامه علم و فناوری شهر تانگشان، با شماره **24130204C**.

اخلاق پژوهش و رضایت آگاهانه: به دلیل ماهیت مروری پژوهش، طبق اظهار نویسندگان موضوعیت نداشته است. **دسترسی به داده‌ها:** داده تازه‌ای تولید یا تحلیل نشده و پرسش‌های بیشتر باید با نویسندگان مسئول مطرح شود. **تعارض منافع:** نویسندگان موردی اعلام نکرده‌اند.

اصطلاحات تخصصی: BF کوره بلند؛ BOF کنورتور اکسیژنی؛ EAF کوره قوس الکتریکی؛ DRI آهن احیای مستقیم؛ PSA جذب با نوسان فشار؛ CCUS جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن؛ BFG گاز کوره بلند؛ RDI شاخص تخریب گندله در احیا؛ CAS–OB تنظیم ترکیب مذاب با دمش آرگون آب‌بندی‌شده و اکسیژن؛ Tap-to-Tap زمان کل از تخلیه یک ذوب تا تخلیه ذوب بعدی.

منبع و حقوق نشر: Jinghua Zhang, Haoyu Guo, Gaiyan Yang, Yan Wang, Wei Chen. “Sustainable Transition Pathways for Steel Manufacturing: Low-Carbon Steelmaking Technologies in Enterprises.” *Sustainability* **2025**, 17(12), 5329. DOI: 10.3390/su17125329. منتشرشده تحت CC BY 4.0. این نسخه ترجمه و بازآرایی فارسی برای شبکه خبرگان صنعت فولاد است؛ نه متن رسمی فارسی ناشر. نام‌ها، اعداد، شواهد و ارجاعات بر اساس منبع اصلی نقل شده‌اند. برآوردهای آینده و نتایج عملکرد شرکت‌ها باید در چارچوب مطالعه اصلی تفسیر شوند.

یادداشت درباره جدول‌ها: برای جلوگیری از افتادن ستون‌ها یا تغییر اعداد، ۲۰ جدول مقاله در این نسخه از صفحه‌های PDF اصلی، بدون تغییر در داده‌های سلول‌ها، بازنمایی شده‌اند. عنوان و توضیح هر جدول فارسی است و داده‌های تفصیلی داخل تصاویر جدول، مطابق زبان نسخه اصلی، انگلیسی باقی مانده‌اند؛ بنابراین این بخش، ترجمه سلول‌به‌سلول جداول محسوب نمی‌شود. فایل‌های داده استخراجی نیز در بسته پژوهشی قرار دارند.

منابع علمی

1. Holappa, L. A general vision for reduction of energy consumption and CO_2 emissions from the steel industry. Metals **2020**, 10, 1117. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit
2. Zhang, X.Y. A review on low carbon emissions projects of steel industry in the [World. J. Cleaner Prod. **2021**, 306, 127259. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit
3. Tang, J.; Chen, M.; Li, F.; Zhou, Y.; Wang, J.; Li, S.; Liu, Z. Development status and future trend of hydrogen metallurgy in China. Hebei Metall. **2020**, 8, 1–6+51. [[Google Scholar
4. PEM electrolyser from Siemens for Salzgitter steelmaking hydrogen. Fuel Cells Bull. [**2019**, 2019, 10. [CrossRef] [Scilit
5. Sustainability Indicators of the Steel Industry. Worldsteel News 2024. Available online: https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024 (accessed on 3 .(December 2024
6. Hongming, N. Study on Energy Efficiency and CO_2 Emission of Typical Iron and Steel Manufacturing Process. Master's Thesis, Northeastern University, Shenyang, [China, 2022. [Google Scholar
7. Li, H.; Ge, C.; Wang, X.; Zhang, C.; Zheng, A.; Wang, X. Technical path analysis and development suggestion of blast furnace low carbon ironmaking. Iron Steel **2024**, [59, 56–70+101. [Google Scholar
8. Yin, R.; Shen, F. Pay attention to the flow of scrap steel and develop the electric furnace process—Outlook on the total output control of crude steel and the alternating evolution of manufacturing process structure. Resour. Recycl. **2025**, 2, [20–23. [Google Scholar
9. Chang, C. Process Technology-Economic Analysis and Carbon Reduction Potential Evaluation of Hydrogen-Enriched Blast Furnace Coupled with Coke Oven Gas Hydrogen Production Enhanced by Slag. Ph.D. Thesis, Shanxi University, Taiyuan,

[China, 2024. [Google Scholar

10. Xu, W.; Fan, L.; Yang, Y.; Tian, Q.; Li, C.; Wang, Y.; Zhu, T.; Hao, R. Research progress in low carbon smelting technology of blast furnace gas cycle coupling [carbon capture. Energy Environ. Prot. **2023**, 37, 175–184. [Google Scholar

11. Wang, Y.; Huang, Q. Analysis of low temperature reduction pulverization of fluxed [pellets. Sinter. Pelletizing **2024**, 49, 70–76. [Google Scholar

12. Zhang, C. Basic Research on Combined Injection of Natural Gas and Pulverized Coal in Blast Furnace Tuyere. Master's Thesis, University of Science and [Technology Beijing, Beijing, China, 2024. [Google Scholar

13. Wan, P.; Xu, Z.; Ding, L.; He, L.; Zhuo, R. Experimental study on the "Magnetic Separation-flotation" combined process for a refractory low-grade iron ore. J. [Jiamusi Univ. (Nat. Sci. Ed.) **2024**, 42, 139–142. [Google Scholar

14. Li, Q. Feasibility of new biofuel replacing traditional fuel. China Sci. Technol. Inf. [**2024**, 7, 116–118. [Google Scholar

15. Sitaraman, H. High-Fidelity Arc-Discharge Model for Hydrogen-Plasma-Smelting-Reduction of Iron Ore; Technical Report; National Renewable Energy Laboratory [(NREL): Golden, CO, USA, 2024. [Google Scholar

16. Gao, T. Application of plasma in metallurgical field. JOM **2024**, 77, 1475–1493. [[Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

17. Liu, Z.; Han, J.; Zhang, J.; Niu, L.; Wang, Y. Development and practice of high-pellet-proportion smelting technology of blast furnace. J. Univ. Sci. Technol. Liaoning [**2021**, 44, 85–91. [Google Scholar

18. Xin-min, C.; Yang, X.; Yu, X.; Xu, T.; Dong, X. Design and production practice of blast furnace based on high proportion pellet smelting in Tangsteel. South. Met. **2024**, 3, [38–41. [Google Scholar

19. Zhu, G. Research progress and prospects of low-carbon technologies in Shougang. In Proceedings of the 12th Youth Academic Annual Conference of the Chinese Society for Metals and the First "Carbon Neutrality" Metallurgical Youth Scientists

[Salon, Ganzhou, China, 28–29 July 2024. [Google Scholar

20. Ma, C.; Gao, A.; Cao, Y.; Liu, S.; Dong, X. Intensified smelting experience in Shougang Jingtang No. 1 BF under high percentage of pellet charge. Ironmaking [**2022**, 41, 7–11. [Google Scholar

21. Yuan, X.; Li, X.; Ke, H. Practice of high-proportion pelletizing in No. 2 blast furnace [of Tangsteel. Gansu Metall. **2023**, 45, 31–33. [Google Scholar

22. Matsui, Y. All pellets operation in Kobe No. 3 blast furnace under intensive coal [injection. ISIJ Int. **2003**, 43, 166–174. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

23. Zhang, C.; Zhang, T.; Xu, W. Production practice of high scrap ratio in Tangshan [Iron and Steel Company. Shanxi Metall. **2022**, 45, 189–191. [Google Scholar

24. Wu, B.; Xu, Z.; Song, S. Smelting process of 180 t converter with high scrap ratio under MHCC coupling model. J. Mater. Metall. **2024**, 23, 598–606. [Google [Scholar

25. Keysberg, K.; Müller, M.; Burkhard, O. ThyssenKrupp Steel Annual Report 2020; [ThyssenKrupp AG: Essen, Germany, 2020. [Google Scholar

26. Nippon Steel. Technical Overview 2019; Nippon Steel Corporation: Tokyo, Japan, [2020. [Google Scholar

27. Luo, Z. Vigorously promote technological innovation to support eaf steel industry [development. China Metall. News **2025**. [Google Scholar] [CrossRef

28. Liu, K. Application of three-dimensional temperature online detection system in [electrolysis workshop. Metall. Trans. B **2025**, 45, 83–85. [Google Scholar

29. Zhou, Z. Fundamental and Applied Research on Deep Vanadium Extraction and Carbon Retention in Vanadium-Bearing Hot Metal by Combined Blowing Converter. [Ph.D. Thesis, Chongqing University, Chongqing, China, 2019. [Google Scholar

30. Liu, J.; Li, H. A multi-directional weighted complex network model for flame image texture feature extraction aiming at predicting endpoint carbon content in converter [steelmaking. J. Iron Steel Res. Int. **2025**, 37, 151–163. [Google Scholar

SteelExperts.ir

.31 Peng, H. Research and Practice on Intelligent Factory Construction for Steel Metallurgical Enterprises Oriented by Digital Twins. Ph.D. Thesis, Kunming [University of Science and Technology, Kunming, China, 2023. [Google Scholar

.32 Zhao, X.; Ma, Z.; Hu, H. The progress of Baosteel RH setup and technology in recent [20 years. Baosteel Technol. **2024**, 4, 47–51. [Google Scholar

.33 Jia, G.; Zhang, Y.; Gao, F. Effect of pre-slagging on optimization of LF refining [process. Shanxi Metall. **2024**, 47, 192–194. [Google Scholar

.34 He, D. Practice and analysis of SPHC steel production via CAS-OB process at [Shougang Jingtang. Sci. Technol. Inf. **2015**, 13, 92. [Google Scholar

.35 Mo, L. Transforming AOD slag toward a highly reactive mineral admixture with appreciable CO_2 sequestration:Hydration behavior, microstructure evolution, and CO_2 footprint. Cem. Concr. Compos. **2025**, 156, 105863. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

.36 Fang, Y.; Yin, C.; Wang, C.; Liang, G.; Li, Y.; Duan, H. Thermodynamic analysis of decarburization and chromium preservation of stainless steel in oxygen blowing [process of VOD. Contin. Cast. **2022**, 1, 25–30+38. [Google Scholar

.37 Zhu, R. A review of carbon dioxide disposal technology in the converter steelmaking process. Int. J. Miner. Metall. Mater. **2020**, 27, 1421–1429. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

.38 Han, B. Energy saving analysis for CO_2-O_2 mixed injection technology in converter steelmaking. J. Iron Steel Res. Int. **2024**, 31, 1095–1103. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

.39 Institute of Bricks. Influence of bottom blowing CO_2 in LF on molten steel quality [and erosion of ventilated bricks. Chin. J. Eng. **2014**, 36, 226–229. [Google Scholar

.40 Li, Q.; Wang, H.; Zhu, R.; Shou, D.; Liu, R.; Gu, Y. Experimental research on using CO_2 as shielding gas in continuous casting. Contin. Cast. **2015**, 40, 5–9. [Google [Scholar

.41 Li, C.; Zhang, Y.; Yao, X.; Sun, H.; Shen, H.; Meng, X. Thermal decomposition

mechanism of small particle limestone at steelmaking temperature. China Metall. [**2023**, 33, 24–30. [Google Scholar

42. Kang, W.; Li, H.; Liao, X.; Zhu, X.; Yang, J. Application and development of inclusion control and removal technology in Ansteel. Contin. Cast. **2024**, 1, 78–84. [Google [Scholar

43. HBIS Group. HBIS Achieves Revolutionary Breakthrough in Steelmaking Technology: World's First "Converter Bottom Oxygen Blowing+Lime Powder Injection+Dry Dedusting" Process. 2024. Available online: http://hebgtgf.com/site/hggf/news/info/2024/40526.html (accessed on 21 .(February 2025

44. Angang Steel Co., Ltd. A bottom-Blowing Element Structure for Converters and Its [Application Method. China Patent CN220183322U, 5 May 2022. [Google Scholar

45. University of Science and Technology Beijing; Jiuquan Iron&Steel. Industrial experimental study on high-intensity bottom blowing CO_2 in converter steelmaking. In Proceedings of the China Iron&Steel Annual Conference, Beijing, China, 25–26 .October 2021

46. Baoshan Iron&Steel Co., Ltd. Baosteel Sustainability Report 2018; Baoshan [Iron&Steel Co., Ltd.: Shanghai, China, 2018. [Google Scholar

47. Zhu, R.; Ren, X.; Xue, B. Research progress of ultimate carbon emission in BOF [steelmaking process. Iron Steel **2023**, 58, 1–10. [Google Scholar

48. Li, H. Analysis of technological pathways and development suggestions for blast furnace low-carbon ironmaking. Metals **2024**, 14, 1276. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

49. Ujisawa, Y. Breakthrough topic:by COURSE50 CO_2 Program in Japanese Steel Industry Sector. In Energy Technology Roadmaps of Japan: Future Energy Systems Based on Feasible Technologies Beyond 2030; Springer: Tokyo, Japan, 2016; [pp. 431–450. [Google Scholar

50. Yang, Q.; Feng, L.; Yan, L. Oxidation kinetics of elements in hot metal under O_2-CO_2

[mixed injection. Mod. Transp. Metall. Mater. **2018**, 46, 7–11. [Google Scholar

.51 Chunqiang, Y. Application of converter bottom blowing carbon dioxide technology. [Hebei Metall. **2022**, 10, 35–38+44. [Google Scholar

.52 Wang, H. Enhanced carbon dioxide sequestration and Cr detoxification:Direct carbonation of AOD slag with additives under ambient conditions. J. Cleaner Prod. [**2024**, 443, 141181. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.53 Li, Q.; Liu, R.; Zhu, R.; Wang, H.; Wang, X.; Li, Z.; Shen, H. Research on decarburization and chromium conservation by blowing carbon dioxide. Ind. Heat. [**2015**, 44, 24–26. [Google Scholar

.54 Li, C.; Liu, X.; Wei, G.; Zhu, R.; Li, T.; Meng, L. Study on the influence of CO_2 injection process of 115 t quantum electric arc furnace. Steelmaking **2023**, 39, 1–7+22. [[Google Scholar

.55 Wang, B.; Li, W.; Han, Y.; Li, P. Design of CO2 absorption tower with the method of MEA for blast furnace gas. In Proceedings of the 14th China Iron&Steel Annual [Conference, Chongqing, China, 25–26 October 2023. [Google Scholar

.56 Rong, W.; Gu, S.; Han, B.; Zhang, C. Metallurgical reaction behavior of CO_2 as RH [lifting gas. Chin. J. Eng. **2020**, 42, 203–208. [Google Scholar

.57 Yunling, G. Exploratory research on bottom blowing CO_2 during the LF refining [process. Iron Steel **2013**, 48, 34–39. [Google Scholar

.58 Liu, Y. A review of physical and numerical approaches for the study of gas stirring in ladle metallurgy. Metall. Mater. Trans. B **2019**, 50, 555–577. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

.59 Yan, S. Research progress on carbon capture and utilization technology in steel [industry. Power Gener. Technol. **2025**, 1, 1–10. [Google Scholar

.60 McQueen, N. CCS in the Iron and Steel Industry; Technical Report; Global CCS [Institute: Melbourne, Australia, 2019. [Google Scholar

.61 Nygård, H.S. Techno-economic study of the CCMS Technology for CO2 capture

from ferro-silicon production. In Proceedings of the 10th Trondheim Conference on CO2 Capture, Transport and Storage, Trondheim, Norway, 17–19 June 2019. [[Google Scholar

62. Ravary, B. Towards a climate-friendly ferroalloy industry in Norway. In Proceedings of the 16th International Ferro-Alloys Congress(INFACON XVI), Trondheim, [Norway, 27–19 September 2021. [Google Scholar

63. Kennedy, G. WA Parish Post-Combustion CO_2 Capture and Sequestration Demonstration Project; Final Technical Report; Petra Nova Power Holdings LLC: [Thompsons, TX, USA, 2020. [Google Scholar

64. Jenkins, J. A Case Study of the Petra Nova Carbon Capture Project; The Paulson [Institute: Chicago, IL, USA, 2015. [Google Scholar

65. Li, Y.; Zhang, G.; Zhao, M.; Jia, C. Research on the domestic and foreign steel production process structure. Metall. Econ. Manag. **2023**, 3, 24–27. [Google [Scholar

66. Chaobin, L. Development status of high-efficiency energy-saving technology for [electric arc furnace steelmaking. Ind. Heat. **2024**, 53, 1–5. [Google Scholar

67. Zhiwei, D.; Yang, Z.; Ma, G. Status and technical challenges of hydrogen-based [ironmaking technology. Jiangxi Metall. **2025**, 45, 32–38. [Google Scholar

68. Yongpeng, L. Gas treatment technology of quantum electric furnace. Hebei Metall. [**2022**, 10, 63–66. [Google Scholar

69. Wang, C.; Xu, P.; Zhu, L.; Zhu, R. Intelligent acceptance model for steel scrap based on dense small object detection. China Metall. **2025**, 35, 155–167. [Google [Scholar] [CrossRef

70. Shengtao, H. Research on classification and measurement system and data collection method for steel scrap. Shanxi Metall. **2023**, 46, 192–194. [Google [Scholar

71. Yao, C.; Zhang, H.; Fan, X.; Wang, Y.; Yang, L.; Cao, J. Research on heat transfer behavior and efficiency improvement method of scrap in Consteel EAF. Ind. Heat.

[**2024**, 53, 6–12. [Google Scholar

.72 Jagtap, H.P. RAM analysis and availability optimization of thermal power plant water circulation system using PSO. Energy Rep. **2021**, 7, 1133–1153. [Google [Scholar] [CrossRef] [Scilit

.73 Li, J.; Yang, S.; Li, Y.; Wang, Z.; Wang, G. Development and application of low temperature uniform heating technology of tempering furnace for medium and [heavy plate. Steel Roll. **2024**, 41, 75–78. [Google Scholar

.74 Su, W.; Zhang, D. Opportunities and challenges of green electricity direct supply. [China Power Enterp. Manag. **2024**, 19, 8–9. [Google Scholar

.75 Wang, X. Research on high-efficiency and low-carbon development of iron and [steel enterprises. Pop. Stand. **2024**, 13, 99–101. [Google Scholar

.76 ArcelorMittal Publishes 2019 Integrated Annual Review. 2020. Available online: https://corporate.arcelormittal.com/media/news-articles/arcelormittal-publishes-2 .(019-integrated-annual-review-1# (accessed on 3 January 2025

.77 Nucor Corporation. Nucor 2020 Sustainability Report; Nucor Corporation: Charlotte, [NC, USA, 2020. [Google Scholar

.78 Xiaodi, W. 2018 Annual Report of Baosteel; Baosteel Group: Shanghai, China, 2019. [[Google Scholar

.79 Nippon Steel Corporation. Annual Report 2019; Nippon Steel Corporation: Tokyo, [Japan, 2019. [Google Scholar

.80 Wen, W. Practice and prospect of CISDI green electric arc furnace. Iron Steel **2024**, [59, 184–195. [Google Scholar

.81 World Steel Association. Steel Statistical Yearbook 2023; World Steel Association: [Brussels, Belgium, 2023; p. 45. [Google Scholar

.82 Primetals Technologies Limited. EAF Quantum Electric Arc Furnace Technology White Paper; Primetals Technologies Limited: London, UK, 2021; pp. 4, 32. [Google [Scholar

83. CISDI. Technical Report on EAF Grid Impact Control Technology; CISDI Electric [Technology Co., Ltd.: Chongqing, China, 2021; p. 11. [Google Scholar

84. TENOVA. Technical Manual for EAF Waste Heat Recovery System; Tenova Group: [Milan, Italy, 2020; p. 15. [Google Scholar

85. Danieli Group. Q-MELT Intelligent Steelmaking System Technical Description; [Danieli Group: Buttrio, Italy, 2023; p. 23. [Google Scholar

86. Jiangyin Xingcheng Special Steel. Data Analysis Report of DC Electric Arc Furnace Industrial Test; Jiangyin Xingcheng Special Steel: Jiangyin, China, 2020. [Google [Scholar

87. Yan, X. Current status and economic analysis of green hydrogen energy industry [chain. Processes **2024**, 12, 315. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

88. Suer, J.; Traverso, M.; Jäger, N. Carbon footprint assessment of hydrogen and [steel. Energies **2022**, 15, 9468. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

89. Wang, C. 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

90. Chen, Z.; Tian, B.; Jiang, X.; Wu, W.; Wei, G.; Zhu, R. Progress and prospects of low-carbon high-efficiency and intelligent steelmaking technologies for electric arc [furnaces. Iron Steel **2024**, 59, 167–183. [Google Scholar

91. Zhu, R.; Wang, G.; Zhang, H. Research and prospect of EAF steelmaking with near- [zero carbon emissions. Iron Steel **2022**, 57, 1–9. [Google Scholar

92. Walsh, S.D.C. Evaluating the economic fairways for hydrogen production in Australia. Int. J. Hydrogen Energy **2021**, 46, 35985–35996. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

93. Boldrini, A. The impact of decarbonising the iron and steel industry on European power and hydrogen systems. Appl. Energy **2024**, 361, 122902. [Google Scholar] [[CrossRef] [Scilit

.94 Kurecki, M. Recycling perspectives of electric arc furnace slag in the United States: [A review. Steel Res. Int. **2024**. Early View. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit

.95 Pareliussen, J.; Purwin, A. Climate Policies and Sweden's Green Industrial Revolution; Documents de travail du Département des Affaires économiques de [l'OCDE; OECD: Paris, France, 2023. [Google Scholar

.96 Ji, Y.; Chi, Z.; Yuan, S. Development and Application of Hydrogen-Based Direct Reduction Iron Process. Processes **2024**, 12, 1829. [Google Scholar] [CrossRef] [[Scilit

.97 Pei, M. 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

.98 Lechtenböhmer, S. Climate innovations in the steel industry. Reinvent Deliv. **2018**, 2. Available online: https://www.reinvent-project.eu/s/D22-Climate-innovations-in-the-steel-industry.pdf (accessed on 3 December 2024).

.99 Duarte, P. Trends in H2-based steelmaking. Steel Times Int. **2019**, 43, 27–32. [[Google Scholar

.100 Baowu Steel. Million-Ton Hydrogen-Based Shaft Furnace Ignition and [Commissioning; Baowu Group: Shanghai, China, 2023. [Google Scholar

.101 China Iron&Steel Research Institute Group. New Progress: Development and Application of Pure Hydrogen Metallurgy Technology; China Iron&Steel Research [Institute Group: Beijing, China, 2024. [Google Scholar

.102 Li, F.; Chen, M.; Tang, J.; Liu, Z. Environmental impact analysis of hydrogen shaft furnace-electric furnace process. China Metall. **2021**, 31, 104–109. [Google [Scholar

.103 Li, F.; Chen, M.; Tang, J.; Liu, Z.; Zhou, Y. Environmental performance analysis of coal gasification-shaft furnace-electric furnace process and BF-BOF process based on life cycle assessment. J. Iron Steel Res. Int. **2020**, 32, 577–583. [Google

[Scholar

104. User, S. Short-Process Revolution: Global Direct Reduction Iron Production Technology Status and Prospects. 2014. Available online: http://www.ral.neu.edu.cn/2014/1223/c4423a89076/page.htm (accessed on 24 January 2025).

105. Xie, Q.; Wu, J.; Zhu, J. Design of unmanned scrap charging system in intelligent steelmaking workshop. Metall. Ind. Autom. **2022**, 46, 427–432. [Google Scholar]

106. Hu, Y.; Yang, J.; Zhou, X.; Peng, S. Similarity comparison of scrap based on Siamese neural network. Metall. Ind. Autom. **2024**, 48, 67–72. [Google Scholar]

107. Ding, C.; Xu, S.; Chang, R.; Jiang, F.; Long, H.; Yu, Z. Application of plasma reduction technology in metallurgical processes. J. Iron Steel Res. Int. **2024**, 36, 568–579. [Google Scholar]

108. Rao, W.; Wang, W.; Cai, F.; Yang, J.; Li, W. Zero carbon metallurgy process energy supply and energy use technology and equipment development. Shanghai Energy Conserv. **2022**, 11, 1436–1446. [Google Scholar]

109. Liu, Y.; Yang, J.; Liu, J. Dynamic scheduling method of optical storage power generation resources based on intelligent algorithm. Comput. Simul. **2020**, 37, 53–57. [Google Scholar]

110. Gong, M.; Zhang, S.; Zhao, G. Application and practice of digital system in modern steelmaking workshop. China Foundry Mach. Technol. **2019**, 54, 68–71. [Google Scholar]

111. Deng, Y.; Liu, R.; Liu, X.; Li, A.; Li, T. Erosion process of carbon brick in hearth and control of interface reaction based on AHP. Iron Steel **2020**, 55, 175–180+186. [Google Scholar]

112. HBIS Xuanhua Technology successfully develops green high-end materials using short-process route. Jiangxi Build. Mater. **2023**, 6, 328.

113. Scipolo, V.; Zuliani, D. Industry 4.0 leading to the evolution of intelligent EAF steelmaking. In Proceedings of the AISTech 2018 Conference Proceedings,

[Philadelphia, PA, USA, 7–10 May 2018. [Google Scholar

.114 Pei, Z. The high efficiency and intelligence of modern EAF steelmaking. Hebei [Metall. **2022**, 6, 1–6. [Google Scholar

.115 Emi, T. Steelmaking technology for the last 100 years:Toward highly efficient mass production systems for high quality steels. ISIJ Int. **2015**, 55, 36–66. [Google [Scholar] [CrossRef] [Scilit

.116 Zheng, C.; Li, Q.; Zhang, H. R&D and application of intelligent one-key unmanned [steelmaking system. Ind. Metrol. **2024**, 34, 66–71. [Google Scholar

.117 Song, B.; Wang, J.; Shi, S. Industrial practice of smart steelmaking model. Henan [Metall. **2021**, 29, 40–43+56. [Google Scholar

.118 Feng, J.; Wang, J.; Liu, J.; Guo, N.; Wang, Y. Review of converter flue gas waste energy recycling technology. Sci. Technol. Eng. **2023**, 23, 7183–7193. [Google [Scholar

.119 Hu, Y.; Zhang, H.; Qi, P.; Ding, L.; Qian, L.; Long, H. Effect of adding steel plant sludge into sintering process on flue gas and production quality. Iron Steel **2024**, [59, 152–161. [Google Scholar

.120 Yang, J. Analysis on utilization of converter gas under dual-carbon target. Metall. [Mater. **2024**, 44, 46–48. [Google Scholar

.121 Yu, A.; Li, Z.; Xie, X.; Liu, Y. Research status and future prospect of carbon capture technology using steel slag in the context of carbon neutrality. Chin. J. Eng. **2025**, [47, 562–571. [Google Scholar

.122 Xing, W. Collaborative treatment and comprehensive utilization technology of copper-containing sludge combined with heating solid waste. World Nonferrous [Met. **2024**, 8, 14–16. [Google Scholar

.123 Du, J.; Wang, X.; Wang, J.; Zhao, A.; Mao, Z.; Kang, Z.; Cai, H. Study on product distribution regulation of non-thermal plasma CH_4-CO_2 reforming. Low-Carbon [Chem. Chem. Eng. **2025**, 50, 77–82+92. [Google Scholar

.124 Han, R.; He, Q.; Zhang, Z.; Sun, Y.; Qiao, Z. Coupling machine learning with high-throughput computing study the structure-performance correlation of hydrophobic MOFs for membrane-based CO_2/C_2H_2 separation. Membr. Sci. Technol. **2025**, [1–10. [Google Scholar

.125 Yu, G. Research progress of polymer membrane separation materials in the field of natural gas desulfurization and decarbonization. Chem. Eng. Oil Gas **2025**, 1–14. [[Google Scholar

.126 Wang, X.; Ma, Q.; Song, Z. Equipment selection and application of heat recovery [system of a 90t EAF. Ind. Heat. **2019**, 48, 48–52. [Google Scholar

.127 Guo, J.; Deng, W. Design and application of dust removal and waste heat recovery [system for 70 t electric arc furnace. Ind. Heat. **2016**, 45, 55–57. [Google Scholar

.128 Chunyan, L. Current situation and optimal and improvable direction of waste heat [heating in Laiwu Steel. Metallurgical Power **2022**, 1, 78–83. [Google Scholar

.129 Shen, Z. Waste heat recovery technology of electric furnace steelmaking. Hebei [Metall. **2020**, S1, 87–89. [Google Scholar

.130 Kohle, S. Improvements in EAF operating practices over the last decade. In Proceedings of the 57th Electric Furnace Conference, Pittsburgh, PA, USA, 14–16 [November 1999. [Google Scholar

.131 Biryukov, A.B.
o o o

134. Kobe Steel. Danieli Completes Spooler Line Modernization; Press Release: Kobe, Japan, 2020. [Google Scholar]

135. Teo, P.T.; Zakaria, S.K.; Salleh, S.Z.; Taib, M.A.A.; Mohd Sharif, N.; Abu Seman, A.; Mohamed, J.J.; Yusoff, M.; Yusoff, A.H.; Mohamad, M.; et al. Assessment of electric arc furnace (EAF) steel slag waste's recycling options into value added green products: A review. Metals **2020**, 10, 1347. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit]

136. Arribas, I. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. Constr. Build. Mater. **2015**, 90, 68–79. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit]

137. Yang, L.; Xu, B.; Song, J.; Wei, G.; Guo, Y.; Xie, X.; Liu, Q. Real-time prediction model of slag composition in electric arc furnace steelmaking. Chin. J. Eng. **2020**, 42, 39–46. [Google Scholar]

138. Yi, H. An overview of utilization of steel slag. Procedia Environ. Sci. **2012**, 16, 791–801. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit]

139. Yokoyama, S. Influence of amount of oxidizing slag discharged from stainless steelmaking process of electric arc furnace on elution behavior into fresh water. In Journal of Physics: Conference Series; IOP Publishing: Bristol, UK, 2012. [Google Scholar]

140. Liu, M.K. Preparation of black ceramic tiles using waste copper slag and stainless steel slag of electric arc furnace. Materials **2020**, 13, 776. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit]

نسخه آنلاین مقاله: https://landing.steelexperts.ir/2026/10/27/sx-r014-sustainable-transition-low-carbon-steel/