مرکز دانش شبکه خبرگان صنعت فولاد

منابع کربنی جایگزین برای پفکی‌سازی سرباره در فولادسازی با کوره قوس الکتریکی؛ مرور جامع

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

بررسی فنی پفکی‌سازی سرباره کوره قوس، شاخص کف‌سازی و اثر ترکیب شیمیایی سرباره؛ ارزیابی بیوچار، پسماند کشاورزی، لاستیک و پلیمر و ایده افزودنی‌های نانوهیبرید کربنی-اکسیدی.

Slag Chemical Composition	Point [1]	Point [2]
CaO (%)	36.2	32.165
SiO_2 (%)	15.1	17.869
MgO (%)	8.5	8.5
Al_2O_3 (%)	5.8	6.864
MnO (%)	5.3	5.3
P_2O_5 (%)	1	1.183
Cr_2O_3 (%)	1.3	1.3
S (%)	0.1	0.118
Weight (kg)		
Weight (kg/ton)	93.37	78.9

References	
Input Data	Calculated Data

Basicity	Point [1]	Point [2]
B2 = CaO/SiO_2	2.40	1.80
B3 = $CaO/(SiO_2+Al_2O_3)$	1.73	1.30
B4 = $(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)$	2.14	1.64

Temperature	Point [1]	Point [2]
Slag temperature (°C)	1600	1600

Slag Properties	Point [1]	Point [2]
Density (kg/m^3)	3282.74	3304.20
Surface Tension (N.m/s)	0.9378	0.9221
Viscosity (Pa.s)	0.0889	0.0920
Effective Viscosity (Pa.s)	0.1194	0.0989
Foaming Index (s)	2.149	1.790
f (second phase particles fraction)	0.082	0.021

ترجمه فارسی مقاله پژوهشی **SX-R013** — Gabriel Evangelista Medeiros، Mario Dayvid Carbajal Ccoyllo، Rogério Navarro Correia de Siqueira و Anupama Ghosh؛ نشریه *Minerals*، سال ۲۰۲۶، DOI: 10.3390/min16020152. ترجمه با حفظ اعداد، منابع، جداول و معادلات انجام شده است؛ تصاویر اقتباسی فاقد اجازه بازنشر، آگاهانه حذف شده‌اند.

چکیده

صنعت فولاد مسئول حدود ۷ تا ۹ درصد از انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از فعالیت‌های انسانی در جهان است. در روش متداول کوره بلند ـ کنورتور اکسیژنی (BF–BOF)، انتشار می‌تواند به ۱٫۸ تن CO به ازای هر تن فولاد برسد. در مقابل، فولادسازی با کوره قوس الکتریکی (EAF)، به‌ویژه در ترکیب با آهن اسفنجی تولیدشده به روش احیای مستقیم با هیدروژن، قابلیت کاهش انتشار به میزان بیش از ۴۰ درصد را دارد؛ ازاین‌رو یکی از مسیرهای اصلی گذار به متالورژی کم‌کربن به‌شمار می‌رود. بااین‌حال، فرایند EAF با وجود انتشار مستقیم کمتر، همچنان برای پفکی‌سازی سرباره و احیای FeO به منابع کربن فسیلی وابسته است؛ دو کاری که در پایداری قوس و بهره‌وری انرژی نقشی اساسی دارند. تشکیل سرباره پفکی با پوشاندن قوس الکتریکی، کاهش اتلاف حرارت تابشی و تثبیت رفتار قوس، بازده حرارتی کوره را کنترل می‌کند. این مقاله مروری، سازوکار تشکیل کف سرباره را با اتکا به مدل‌های تجربی بررسی می‌کند که در آن‌ها شاخص پفکی‌شدن ( ) و نرخ تشکیل کف از پارامترهای کلیدی‌اند؛ همچنین اثر خواص فیزیکی، ازجمله گرانروی، کشش سطحی و چگالی سرباره، بر ماندگاری حباب‌های گاز تشریح می‌شود. مقاله ظرفیت منابع کربنی جایگزین، مانند بیوچار، زیست‌توده و مواد حاصل از پسماند، ازجمله پلاستیک و لاستیک، را برای جانشینی عوامل احیاکننده و کف‌زای فسیلی در EAF ارزیابی می‌کند. در ادامه، استفاده از مواد زیست‌پایه نوظهور نظیر نانوسلولز نیز مطرح است: نانوسلولز می‌تواند الگوی واکنش‌پذیری برای ساخت نانوهیبریدهایی باشد که هم اکسیدهای مؤثر بر بازیسیته سرباره ـ مانند MgO و CaO ـ و هم فاز کربنی فعال حاصل از تجزیه حرارتی الیاف آلی را در خود دارند. چنین موادی ممکن است هم پفکی‌شدن سرباره را تقویت کنند و هم بخشی از خوراک سوخت فسیلی کوره را کاهش دهند. در این چارچوب، توسعه و شناسایی مواد کربنی تجدیدپذیری که بتوانند به‌طور هم‌زمان FeO را احیا و تشکیل کف سرباره را تسهیل کنند، برای حرکت به‌سوی فولادسازی با انتشار خالص صفر و افزایش پایداری فرایندهای EAF ضروری است.

۱. مقدمه

گرمایش جهانی و تغییر اقلیم موضوع بسیاری از مجامع و توافق‌نامه‌های بین‌المللی، ازجمله پیمان کیوتو، بوده‌اند؛ توافق‌هایی که بر تعیین هدف و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای تأکید دارند [1]. طبق داده‌های مجمع جهانی اقتصاد [2]، حدود ۸ درصد از انتشار بخش صنعت به فولادسازی اولیه یا ثانویه مربوط می‌شود. این سهم به انرژی‌بری بالای فولادسازی و مصرف گسترده مواد اولیه کربن‌دار، عمدتاً با منشأ فسیلی، ارتباط دارد؛ موادی مانند کک متالورژی، کک نفتی خام و آنتراسیت که در فرایندهای مختلف نقش منبع کربن را ایفا می‌کنند.

کربن‌زدایی صنعت فولاد اهمیت زیادی دارد؛ زیرا تولید فولاد، به‌ویژه در مناطق درحال‌توسعه آمریکای جنوبی و

آسیا، همچنان رو به افزایش است. گزارش سالانه انجمن جهانی فولاد [3] نشان می‌دهد تولید جهانی از حدود ۲۰۰ میلیون تن در سال ۱۹۵۰ به بیش از ۱٫۸ میلیارد تن در سال ۲۰۲۳ رسیده است. با وجود نقش حیاتی فولاد در اقتصاد و زیرساخت، پیامدهای انتشار CO از تولید آهن و فولاد را نمی‌توان نادیده گرفت. شدت انتشار ویژه طی ده سال گذشته از ۱٫۸۲ به ۱٫۹۲ تن CO به ازای هر تن فولاد افزایش یافته و نیاز به توسعه مسیرهای پایدارتر را پررنگ‌تر کرده است.

از دیدگاه ماده اولیه می‌توان دو مسیر اصلی فولادسازی را از هم تفکیک کرد. در مسیر نخست، یا فولادسازی اولیه، سنگ‌آهن احیا می‌شود: این کار یا در کوره بلند (BF) و فرایند احیای ذوبی (SR) با کربن جامد انجام می‌گیرد و محصول مذاب، یعنی چدن، تولید می‌کند؛ یا در فرایند احیای مستقیم (DR) با احیاکننده گازی مانند گاز طبیعی یا هیدروژن صورت می‌گیرد و محصولی جامد با درصد بالای آهن فلزی به دست می‌دهد. مسیر دوم از قراضه به‌تنهایی یا مخلوطی از قراضه، آهن اسفنجی (DRI) و چدن جامد استفاده می‌کند که در کوره قوس الکتریکی (EAF) ذوب و پالایش می‌شوند [4].

فولادسازی EAF، به‌ویژه همراه با احیای مستقیم برای تأمین آهن اسفنجی، یکی از مسیرهای مهم تولید فولاد پایدارتر و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، به‌خصوص زغال‌سنگ و کک، است. روش‌های BF–BOF و EAF به‌ترتیب ۷۱ و ۲۹ درصد تولید فولاد خام را تشکیل می‌دهند و طبق منبع [3]، مسیر DRI–EAF در مقایسه با مسیر کوره بلند، ۴۱ درصد انتشار کمتری دارد. این اختلاف عمدتاً ناشی از به‌کارگیری گاز طبیعی یا هیدروژن ـ که استفاده صنعتی از آن هنوز درحال‌توسعه است ـ به‌عنوان عامل احیاکننده و انرژی‌بری کمتر فرایند احیاست.

با وجود انتشار کمتر در مسیر EAF، مرحله پالایش همچنان به کربنی نیاز دارد که به‌صورت شارژ یا تزریق به کوره وارد می‌شود. این کربن با اکسیژن واکنش می‌دهد، بخشی از انرژی شیمیایی را تأمین می‌کند، FeO اضافی سرباره را احیا می‌کند و با تولید گاز به تشکیل سرباره پفکی کمک می‌رساند. پوشیده‌شدن قوس به‌وسیله سرباره در مرحله پالایش از شاخص‌های مهم بهره‌وری است، زیرا از اتلاف انرژی تابشی جلوگیری می‌کند [5].

ازاین‌رو، برای حرکت به‌سوی صنعتی با انتشار خالص صفر باید جایگزین‌های کربن فسیلی مصرفی در EAF بررسی شوند. مواد کربنی حاصل از پسماندها، زیست‌توده‌ها یا دیگر مواد زیستی می‌توانند به‌جای کک و زغال‌سنگ در پفکی‌سازی سرباره به کار روند، مشروط بر آنکه عملکردشان به‌صورت مستمر بهبود یابد و برای شرایط عملیاتی کوره مناسب‌سازی شوند.

۲. مبانی عملیاتی کوره قوس الکتریکی

در کوره قوس الکتریکی، انرژی الکتریکی از طریق الکترودهای گرافیتی به خوراک جامد منتقل می‌شود؛ خوراکی که

می‌تواند شامل قراضه فولادی، چدن، آهن اسفنجی یا دیگر مواد آهن‌دار باشد. قوس الکتریکی میان الکترود و ماده فلزی شکل می‌گیرد و عمده انرژی را به‌صورت تابش منتقل می‌کند. برای افزایش بازده، از مشعل‌های اکسیژن‌سوخت در دیواره جانبی و لانس‌های اکسیژن استفاده می‌شود که مجموعاً حدود ۴۰ درصد انرژی ورودی کوره را تأمین می‌کنند [6]. اکسیداسیون عناصری مانند C، Al، Si و P در مرحله پالایش نیز به دلیل گرمازا بودن واکنش‌هایشان، در تأمین این انرژی شیمیایی نقش دارد [7].

مراحل اصلی فرایند EAF عبارت‌اند از شارژ، ذوب، پالایش و تخلیه مذاب. بسته به چگالی حجمی قراضه، معمولاً دو یا سه نوبت شارژ و ذوب پیش از آغاز پالایش با دبی بالای اکسیژن لازم است [8]. شکل ۱ موازنه کلی مواد ورودی و خروجی کوره را برای تولید یک تن فولاد خام نشان می‌دهد [9]. علاوه بر قراضه و آلیاژها، مصرف سوختی مانند گاز طبیعی، زغال و اکسیژن را نیز نمایش می‌دهد که با هدف کاهش نیاز به انرژی الکتریکی و افزایش بهره‌وری به کوره افزوده می‌شوند.

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 1. ورودی‌ها و خروجی‌های متداول مواد در کوره قوس الکتریکی؛ اقتباس‌شده از منبع [8]. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

سرباره در وهله نخست از اکسیدهای موجود در ناخالصی‌های خوراک تشکیل می‌شود؛ ازجمله CaO، MgO، SiO_2، Al_2O_3 و اکسیدهای آهن (FeO). بخش دیگری از سرباره از واکنش عناصر باقیمانده در قراضه با اکسیژن تزریقی شکل می‌گیرد و شامل MnO، Cr_2O_3، Al_2O_3، SiO_2 و P_2O_5 است. اکسیژن با آهن نیز واکنش می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که در ارتباط با فرایند کربن‌زدایی فولاد، حدود ۳۰ درصد FeO تشکیل می‌شود.

افزودن آهک با حدود ۹۰ درصد CaO و آهک دولومیتی با حدود ۶۰ درصد CaO و ۳۵ درصد MgO، ترکیب سرباره را از نظر این دو اکسید تنظیم می‌کند. انحلال آن‌ها شرایط مناسب برای کنترل سایش نسوز، مقدار فاز جامد و فسفرزدایی را فراهم می‌سازد. فسفرزدایی برای تثبیت P_2O_5 در سرباره به CaO و تشکیل ترکیب اکسیدی $CaO{\cdot}P_2O_5$ نیاز دارد [10]. باید توجه داشت آهک معمولاً مقداری $CaCO_3$ باقیمانده دارد که همراه با مشعل‌ها به انتشار بیشتر CO_2 می‌انجامد.

پایداری قوس و اعوجاج هارمونیکی کل (THD)

در EAF، دست‌کم ۶۰ درصد انرژی کل از طریق قوس الکتریکی منتقل می‌شود؛ به همین دلیل رفتار جریان الکتریکی نشانه‌ای مهم از شرایط فرایند و بازده قوس است. در آغاز مرحله ذوب، ناپایداری قوس هارمونیک‌های فراوانی ایجاد می‌کند که می‌توان آن‌ها را با شاخص اعوجاج هارمونیکی کل (THD) اندازه گرفت [11]. این

هارمونیک‌ها مؤلفه‌های ولتاژ یا جریان با فرکانس‌هایی برابر با مضرب صحیح فرکانس اصلی شبکه ـ معمولاً ۵۰ یا ۶۰ هرتز ـ هستند و با نوسان قوس ارتباط دارند. گانداره و لولکار [12] هنگام اندازه‌گیری نوسان ولتاژ در یک کوره قوس ۴۰ مگاولت‌آمپری در آلمان، در مرحله ذوب مقدار THD را تا ۲۰٫۹ درصد گزارش کردند.

THD را می‌توان هم شاخص کیفیت توان و هم معیاری از بازده عملیات دانست. با پیشرفت ذوب و غالب‌شدن حمام فلز مایع، نبود قطعات سرد قراضه، ریزش ناگهانی آن‌ها و حرکت‌های شدید الکترود سبب کاهش چشمگیر این ناپایداری می‌شود. در مرحله پالایش، بازده حرارتی قوس تا حد زیادی به کیفیت سرباره و میزان پوشانندگی آن بستگی دارد؛ سرباره ممکن است طول قوس را به‌طور کامل یا جزئی بپوشاند و به پایداری آن کمک کند [13]. شکل ۲ اثر ارتفاع سرباره پفکی بر بازده انرژی را نمایش می‌دهد. در کار با قوس کوتاه و غوطه‌ور، تابش اندک است اما توان ورودی نیز پایین می‌ماند. با افزایش طول قوس و ولتاژ، بازده تنها در صورتی بالا می‌ماند که ارتفاع سرباره پفکی متناسب افزایش یابد؛ در این شرایط سهم انرژی منتقل‌شده به فلز می‌تواند از ۹۰ درصد فراتر رود.

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 2. بازده قوس برحسب طول قوس پوشیده‌شده با سرباره؛ اقتباس‌شده از [13]. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

با توجه به این مباحث، بازده قوس در مرحله ذوب پایین‌تر است و تا حدی به پوشیده‌شدن قوس با مواد جامد وابسته است. در مقابل، در مرحله پالایش رابطه مستقیمی میان تشکیل سرباره پفکی، میزان پوشش قوس و بازده حرارتی وجود دارد. در بخش بعدی، رفتار سرباره و پارامترهای مؤثر بر قابلیت پفکی‌شدن آن بررسی می‌شود.

۳. تشکیل سرباره پفکی و تزریق کربن

نیروی محرک اصلی تشکیل سرباره پفکی در EAF، فشار گاز CO حاصل از واکنش‌های پالایش درون لایه سرباره است. واکنش‌های تولید CO در جدول ۱ آمده‌اند [14]. واکنش‌های ۱ و ۲ مستقیماً در سرباره رخ می‌دهند و سهم اصلی را در پفکی‌سازی دارند. واکنش ۳ مکمل و کم‌شدت‌تر است؛ زیرا پس‌سوزی عمدتاً در مسیر خروج گاز اتفاق می‌افتد و در مرحله ذوب، هنگامی که دما پایین‌تر است و حرارت تولیدشده می‌تواند ستون قراضه جامد را پیش‌گرم کند، اهمیت بیشتری دارد.

جدول 1. واکنش‌های تولید CO در فولادسازی با کوره قوس الکتریکی [14]

نوع واکنش	معادله	شرح فرایند
کربن‌زدایی یا تزریق کربن	۱) $C(s) + ½\ O\ (g) \rightarrow CO(g)$	کربن با اکسیژن واکنش می‌دهد و مونوکسیدکربن تولید می‌کند.
کنترل FeO با تزریق کربن	۲) $FeO(l) + C(s) \rightarrow Fe(l) + CO(g)$	کربن، اکسید آهن را به آهن فلزی و گاز CO احیا می‌کند.
پس‌سوزی	۳) $CO(g) + ½\ O\ (g) \rightarrow CO\ (g)$	CO اکسید می‌شود و CO تولید می‌کند.

واکنش‌های دیگری نیز در فصل مشترک سرباره ـ گاز و کربن ـ گاز روی می‌دهند که در روابط ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. سینتیک این واکنش‌ها عمدتاً تحت کنترل انتقال جرم CO ، O و CO از میان لایه گازی میان کربن و سرباره است [15].

4) $(FeO_{(l)} + CO_{(g)} \rightarrow Fe_{(l)} + CO_{2(g)})$

5) $(C_{(s)} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)})$

ماهیت منبع کربن افزوده‌شده در کارایی فرایند، به‌ویژه در احیای FeO، نقشی تعیین‌کننده دارد. شرایط مصرف ماده می‌تواند متفاوت باشد ـ شارژ نوبتی یا تزریق ـ اما سرعت واکنش باید به‌اندازه‌ای باشد که تولید پیوسته CO و در نتیجه پفکی‌شدن مطلوب سرباره حفظ شود. جدول ۲ خواص کلیدی منابع کربنی معدنی را برای راهنمایی در کاربردهای احیا و سوخت نشان می‌دهد [16].

جدول 2. ویژگی‌های اصلی منابع کربنی معدنی در کاربردهای متالورژیکی مختلف؛ برگرفته از [16]

فرایند متالورژیکی	اندازه دانه (میلی‌متر)	کربن ثابت (%)	مواد فرار (%)	خاکستر (%)
کوره بلند	۲۵ تا ۸۰	بیش از ۹۰	کمتر از ۰٫۵	کمتر از ۹٫۰
آگلومراسیون/سینتر سنگ‌آهن	کمتر از ۳؛ ۸۵ تا ۹۰٪	بیش از ۷۶	بیش از ۲٫۵	کمتر از ۱۶
کنورتور اکسیژنی (BOF)	۶ تا ۲۵	بیش از ۷۰	کمتر از ۱۲، در صورت تزریق حین دمش	کمتر از ۱۲
تزریق سوخت پودری (PFI)	۰٫۱ تا ۰٫۷	—	کمتر از ۰٫۵	کمتر از ۹٫۰ (کک)
تولید فروآلیاژ	۵ تا ۲۵ یا ۱۰ تا ۲۵	—	کمتر از ۱	کمتر از ۱۱
تولید آهن اسفنجی (DRI)	۶ تا ۱۵	بیش از ۴۰	بیش از ۳۴	۵ تا ۲۰

در فرایندهای مبتنی بر شارژ مستقیم کربن، ذرات درشت‌تر ترجیح دارند؛ زیرا جرم و استحکام بیشتری دارند و کمتر همراه گازهای خروجی از کوره خارج می‌شوند. در مقابل، برای تزریق، ذرات ریزتر مناسب‌ترند، چون نفوذ بهتر و واکنش‌پذیری بالاتری دارند.

هدف پالایش در EAF از جهاتی به کنورتور اکسیژنی (BOF) شباهت دارد؛ زیرا در هر دو، مقدار FeO می‌تواند بالا باشد. کربن علاوه بر احیای اکسید آهن، به دلیل تزریق هم‌زمان اکسیژن گازی نقش سوخت را نیز ایفا می‌کند.

ازاین‌رو کربن ثابت بیش از ۷۰ درصد و اندازه ذره کمتر از ۲۵ میلی‌متر مطلوب دانسته شده است. مورالس و همکاران [17] نشان دادند در یک کوره ۱۲۵ مگاولت‌آمپری، با افزایش نسبت آهن اسفنجی به قراضه از ۸۰ به ۹۸٫۲ درصد و تزریق گرافیت به میزان ۲۵ کیلوگرم بر دقیقه، سرباره پفکی مطلوب حاصل شد و مصرف انرژی از ۷۳۰ به ۶۴۰ کیلووات‌ساعت بر تن کاهش یافت. در این شرایط، کربن ثابت و واکنش‌پذیری بالای گرافیت، همراه با FeO فراوان ناشی از DRI، سرعت احیای FeO و تولید CO را افزایش داد و در نتیجه هم تشکیل کف و هم پایداری قوس را بهبود بخشید.

تأثیر ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی سرباره

ازآنجاکه تشکیل سرباره پفکی در بهینه‌سازی انرژی EAF بسیار مهم است، باید شاخصی برای سنجش تمایل سرباره به کف‌کردن وجود داشته باشد. ایتو و فروهان [18] رابطه ۶ را برای «شاخص پفکی‌شدن» ( ) پیشنهاد کردند؛ در آن L ارتفاع لایه کف برحسب سانتی‌متر و Vg سرعت ظاهری گاز برحسب سانتی‌متر بر ثانیه است. این شاخص از نظر فیزیکی میانگین زمان عبور گاز از لایه سرباره را برحسب ثانیه نشان می‌دهد. اندازه حباب بر سرعت ظاهری گاز اثر مثبت دارد [19]؛ بااین‌حال، همان بررسی [19] تأکید می‌کند که ارتباط میان هر یک از واکنش‌های مولد CO و اندازه حباب‌های حاصل هنوز به‌خوبی شناخته نشده است.

(6 (= L / V_g

شاخص پفکی‌شدن را می‌توان به خواص فیزیکی سرباره مرتبط کرد و پژوهشگران مدل‌های گوناگونی در این زمینه ارائه کرده‌اند که نمونه‌هایی از آن‌ها در جدول ۳ آمده است. حتی ساده‌ترین مدل، گرانروی ( )، کشش سطحی ( ) و چگالی ( ) سرباره را عوامل اصلی کنترل تشکیل و پایداری حباب می‌داند. از مقایسه مدل‌ها می‌توان دریافت که افزایش گرانروی معمولاً شاخص پفکی‌شدن را بالا می‌برد، حال آنکه اثر چگالی و کشش سطحی در جهت مخالف است.

جدول 3. مدل‌های ارائه‌شده در منابع علمی برای برآورد شاخص پفکی‌شدن سرباره

رابطه مدل	متغیرهای منظورشده	مرجع
(= 115 / √( )	گرانروی، کشش سطحی و چگالی سرباره	[20]
(= 115 ۱٫۲ / (۰٫۲ D ۰)	گرانروی، کشش سطحی و چگالی سرباره و قطر حباب D	[21]
(= 3950 ۱٫۱ / (۰٫۱ D ۰)	گرانروی، کشش سطحی و چگالی سرباره و قطر حباب	[22]

چینش کسر و توان‌های روابط جدول ۳ از استخراج متنی منبع بازسازی شده است؛ برای استفاده محاسباتی یا طراحی صنعتی، صورت اصلی معادلات در نسخه ناشر باید کنترل شود.

ژانگ و همکاران [21] با تزریق آرگون از نازلی چندسوراخه حباب‌هایی کوچک‌تر از نازل تک‌سوراخه ایجاد کردند: ۷٫۵ میلی‌متر در برابر ۱۳٫۵ میلی‌متر. آنان اثر گوگرد فولاد را نیز بررسی کردند؛ گوگرد با تغییر کشش سطحی فاز فلزی و افزایش زاویه تماس، اندازه حباب را بزرگ‌تر می‌کند. بیشترین شاخص پفکی‌شدن، برابر ۵۶، با ارتفاع سرباره ۱۶ سانتی‌متر، در کمترین مقدار گوگرد (۰٫۰۰۲ درصد وزنی) و کمترین قطر میانگین حباب (۰٫۷۰ میلی‌متر) به دست آمد. نتایج این آزمایش‌ها مبنای رابطه دوم جدول ۳ قرار گرفت.

سون و همکاران [22] نیز ضرایب متفاوتی برای سرباره‌های اسیدی با FeO بیشتر تعیین کردند، اما در اثر منفی افزایش اندازه حباب بر شاخص پفکی‌شدن به نتیجه مشابهی رسیدند. شاخص اندازه‌گیری‌شده بین ۴ و ۶ بود؛ بازیسیته دوتایی (CaO/SiO) نزدیک یک، MgO حدود ۱۰ درصد وزنی و FeO تقریباً ۲۵ درصد وزنی بود. این مقدار FeO روانی سرباره را افزایش داد و با شاخص پایین‌تر سازگار بود؛ نتیجه‌ای که وابستگی پایداری کف به گرانروی سرباره را تأیید می‌کند.

باید توجه کرد گرانروی، چگالی و کشش سطحی سرباره فقط تابع درصد FeO نیستند، بلکه به ترکیب شیمیایی کل آن وابسته‌اند. چانگ و همکاران [23] سرباره EAF را سامانه‌ای چندجزئی شامل CaO–SiO –Al O –MgO–FeO در نظر گرفتند و قابلیت پفکی‌شدن را برحسب بازیسیته دوتایی CaO/SiO و با ۵ یا ۱۰ درصد وزنی Al O بررسی کردند. افزایش سهم SiO و Al O، گرانروی و توان کف‌سازی را بالا برد. در مقابل، CaO و MgO به‌ویژه در تشکیل فازهای جامدی مانند MgO و سیلیکات کلسیم (CaO) ·SiO مؤثرند؛ وجود همین فازها نقش مهمی در پایداری کف دارد.

راسکو و همکاران [24] برای گرانروی ظاهری سیالی که ذرات جامد کروی در آن معلق‌اند، مدل رابطه ۷ را ارائه کردند؛ مدلی که برای سرباره EAF نیز قابل استفاده است. در شرایط اشباع MgO، با تشکیل فاز جامد بیشتر MgO و افزایش گرانروی ظاهری، انتظار می‌رود تشکیل کف بهبود یابد. گرانروی ظاهری در اینجا فقط گرانروی ذاتی مذاب نیست، بلکه پارامتری است که مقاومت جریان ناشی از حضور ذرات جامد معلق در زمینه مذاب را نیز در بر می‌گیرد. بنابراین رفتار رئولوژیکی ترکیبی مایع و جامد را بیان می‌کند و مستقیماً بر پایداری سرباره پفکی اثر می‌گذارد.

7) $(_a = (1 - 1.35)^{-5/2}$

پرتوریوس و کارلایل [25] با استفاده از داده‌های ترمودینامیکی انحلال‌پذیری MgO در نسبت‌های مختلف بازیسیته سه‌تایی (B =CaO/(SiO +Al O و مقادیر مختلف FeO، سهم فازهای جامد و مایع تعادلی را محاسبه و به توان کف‌سازی سرباره مرتبط کردند. آنان ترکیب‌های مختلف سرباره را در قالب نمودارهای هم‌دما بررسی کردند و تصویری از تغییر شاخص پفکی‌شدن برحسب بازیسیته، FeO و MgO ارائه دادند. این رابطه در شکل ۳ دیده می‌شود.

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 3. شاخص پفکی‌شدن برحسب بازیسیته و درصد وزنی FeO و MgO؛ اقتباس‌شده از [25]. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

شکل ۳ نشان می‌دهد برای هر مقدار بازیسیته B و غلظت MgO، درصدی بهینه از FeO برای تشکیل کف وجود دارد. FeO مهم‌ترین اکسید گدازآور است: دمای لیکوئیدوس را به‌طور محسوسی پایین می‌آورد و سهم فاز مایع را بیشتر می‌کند. مقدار متوسط FeO با احیا به‌وسیله کربن، CO لازم برای کف‌سازی تولید می‌کند؛ اما FeO اضافی سرباره را به ناحیه کاملاً مایع سامانه FeO–CaO–MgO–SiO می‌برد، گرانروی ظاهری را کاهش می‌دهد و ذرات فاز دومِ لازم برای پایداری کف را از میان می‌برد. در سوی دیگر، نسبت CaO و SiO بازیسیته B و در نتیجه انحلال‌پذیری MgO و تشکیل فازهای جامد مانند منیزیووستیت یا سیلیکات کلسیم را کنترل می‌کند. این ذرات جامد مراکز جوانه‌زنی حباب گاز هستند و شاخص پفکی‌شدن را افزایش می‌دهند. در بازیسیته پایین‌تر ـ یعنی CaO کمتر یا SiO بیشتر ـ انحلال‌پذیری MgO به‌شدت افزایش می‌یابد و برای رسیدن به اشباع به افزودن MgO بیشتری نیاز است. در بازیسیته بالاتر، انحلال‌پذیری MgO کمتر و حساسیت سرباره به تغییرات FeO نیز پایین‌تر می‌شود؛ بنابراین پنجره عملیاتی مناسب تشکیل کف گسترده‌تر خواهد بود.

شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی هم‌دما با نرم‌افزار شبیه‌ساز سرباره فولادسازی گردائو برزیل را برای دو سرباره در ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد: سرباره ۱ با B =۲٫۴ و سرباره ۲ با B =۱٫۸. مقدار MgO و FeO به‌ترتیب در ۸٫۵ و ۲۶٫۷ درصد وزنی ثابت نگه داشته شد. سرباره ۲ با بازیسیته کمتر، سهم پایین‌تری از فاز دوم جامد MgO برابر ۰٫۰۲۱ درصد، گرانروی مؤثر کمتر برابر ۰٫۰۹۸۹ پاسکال‌ثانیه و شاخص پفکی‌شدن ۱٫۷۹ ثانیه داشت. این یافته‌ها بر ضرورت تنظیم شرایط اشباع و رسوب MgO در کنار کنترل FeO نسبت به مرز لیکوئیدوس تأکید می‌کنند؛ به‌نحوی که هم روانی لازم برای شکل‌گیری حباب و هم سهم فاز جامد کافی برای پایداری کف تأمین شود.

SteelExperts.ir

Slag Chemical Composition	Point [1]	Point [2]
CaO (%)	36.2	32.165
SiO_2 (%)	15.1	17.869
MgO (%)	8.5	8.5
Al_2O_3 (%)	5.8	6.864
MnO (%)	5.3	5.3
P_2O_5 (%)	1	1.183
Cr_2O_3 (%)	1.3	1.3
S (%)	0.1	0.118
Weight (kg)		
Weight (kg/ton)	93.37	78.9

References	
Input Data	Calculated Data

Basicity	Point [1]	Point [2]
B2 = CaO/SiO_2	2.40	1.80
B3 = $CaO/(SiO_2+Al_2O_3)$	1.73	1.30
B4 = $(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)$	2.14	1.64

Temperature	Point [1]	Point [2]
Slag temperature (°C)	1600	1600

Slag Properties	Point [1]	Point [2]
Density (kg/m^3)	3282.74	3304.20
Surface Tension (N.m/s)	0.9378	0.9221
Viscosity (Pa.s)	0.0889	0.0920
Effective Viscosity (Pa.s)	0.1194	0.0989
Foaming Index (s)	2.149	1.790
f (second phase particles fraction)	0.082	0.021

شکل 4. داده‌های شبیه‌ساز سرباره گردائو، بر پایه داده‌های واقعی دو سرباره EAF در ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد. منبع: مقاله اصلی؛ بازنشر بر پایه CC BY 4.0.

۴. منابع کربنی جایگزین

تزریق کربن از طریق احیای FeO به بازیابی آهن کمک می‌کند و با تولید CO یا CO، تشکیل کف سرباره را تقویت می‌کند؛ اما هم‌زمان منشأ انتشار CO در فولادسازی EAF است. برای نمونه، تزریق ۵ کیلوگرم کک نفتی کلسینه‌شده با ۹۸٫۶۳ درصد کربن ثابت [26] به ازای هر تن فولاد خام ـ حد پایین مصرف کربن در موازنه شکل ۱ ـ در صورت سوختن کامل استوکیومتری با اکسیژن، حدود ۱۸٫۱ کیلوگرم CO ایجاد می‌کند. محاسبات در جدول ۴ آمده است. به همین دلیل پژوهش‌های بسیاری جایگزین‌های زیست‌توده‌ای و دیگر منابع غیرفسیلی را برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در این فرایند بررسی کرده‌اند [27]. در ادامه، نمونه‌هایی از این راهکارها مرور می‌شود.

جدول 4. محاسبه انتشار CO ناشی از ۵ کیلوگرم کک نفتی کلسینه‌شده با ۹۸٫۶۳ درصد کربن ثابت [27]

مورد	کربن C	اکسیژن O	دی‌اکسیدکربن CO
واکنش شیمیایی	(C(s) + O (g) CO (g	–	–
جرم استوکیومتری	۱۲ کیلوگرم	۳۲ کیلوگرم	۴۴ کیلوگرم
رابطه محاسبه	W_C = I_C × F_C	W_O = 32 × W_C / 12	W_CO = 44 × W_C / 12

مورد	کربن C	اکسیژن O	دی‌اکسیدکربن CO
نتیجه برای ۵ کیلوگرم کک نفتی	۵ × ۰٫۹۸۶۳ = ۴٫۹۳۱۵ کیلوگرم	۳۲ × ۴٫۹۳۱۵ / ۱۲ = ۱۳٫۱۵۰۷ کیلوگرم	۴۴ × ۴٫۹۳۱۵ / ۱۲ = ۱۸٫۰۸۲۲ کیلوگرم

در این جدول I_C جرم کک تزریق‌شده، F_C سهم وزنی کربن ثابت و W_C جرم واقعی کربن است. فرض محاسبه، اکسیداسیون کامل استوکیومتری کربن است.

۴.۱. ترکیب پسماندهای کشاورزی با کک

استفاده از زیست‌توده به‌عنوان منبع کربن در EAF، عمدتاً به دلیل تجدیدپذیربودن آن، جذاب است؛ بااین‌حال، اکسیژن زیاد و باقیمانده‌های معدنی (خاکستر) در آن چالش‌هایی ایجاد می‌کند. تیمار زیست‌توده، به‌صورت تولید هیدروچار با کربونیزاسیون هیدروترمال، تولید بیوچار از راه پیرولیز، یا حتی برشته‌سازی در دمای پایین‌تر، می‌تواند این مشکلات را کاهش دهد؛ برای مثال با حذف بخشی از خاکستر و مواد فرار، افزایش چگالی انرژی و درصد کربن و کاهش درصد اکسیژن [28–30].

پسماندهای کشاورزی و جنگلی به‌طور گسترده برای جایگزینی بخشی از کربن فسیلی در تولید کک و فرایند EAF بررسی شده‌اند. ریداک و همکاران [31] افزودن زیست‌توده خام یا کربونیزه، شامل تراشه چوب راش و توسکا، خاک‌اره کاج، هسته زیتون و پوست فندق، به مخلوط زغال مورد استفاده در کک‌سازی را بررسی کردند.
کربونیزاسیون در ۵۰۰ تا ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد و در محیط نیتروژن، خواص زیست‌توده را به‌طور قابل‌توجهی بهبود داد: مواد فرار از ۷۳ تا ۸۰ درصد به کمتر از ۱۳ درصد کاهش یافت و کربن ثابت به بیش از ۸۰ درصد رسید؛ رقمی بالاتر از مبنای ۶۱٫۹ درصدی مخلوط زغال. با وجود این بهبود، افزودن زیست‌توده بر شاخص‌های مهم کک‌سازی، ازجمله سیالیت و شاخص روگا، اثر منفی داشت. آزمون سیالیت گیزلر، روشی استاندارد است که با همزن گشتاورثابت در نمونه زغال گرم‌شونده تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. زیست‌توده کربونیزه در نسبت‌های جایگزینی پایینِ ۵ تا ۱۰ درصد عملکرد مناسب‌تری داشت و سیالیت را در محدوده قابل‌قبول ۲۵۵ تا ۳۴۷ ddpm حفظ کرد؛ اما با افزایش سهم آن به ۲۰ درصد، افت محسوس بود. در آزمون روگا (RI)، که سنجشی با درام استاندارد برای استحکام مکانیکی کک تولیدشده در شرایط کربونیزاسیون مشخص است، الگوی مشابهی مشاهده شد: زیست‌توده خام افت شدید و زیست‌توده کربونیزه افت محدودتری ایجاد کرد. این نتایج نشان می‌دهند استفاده از زیست‌توده برای کربن‌زدایی ممکن است، مشروط به آنکه محدودیت‌های فیزیکی و شیمیایی آن با مشخصه‌یابی و پیش‌تیمار مناسب برطرف شوند.

عبدالرشید و همکاران (۲۰۱۴) [32] گزارش کردند که جایگزینی ۲۰ درصد کربن فسیلی با پوسته هسته نخل (PKS)، هنگام احیای گندله سنگ‌آهن کم‌عیار با ۴۰ درصد آهن، انتشار CO را ۱۸٫۶۹ درصد و مصرف کربن را ۱۹٫۷۸ درصد کاهش داد. پیرولیز PKS گازهای CO ، H و هیدروکربن‌هایی آزاد کرد که خود می‌توانند در احیا و

تأمین انرژی فرایند نقش داشته باشند.

فیدالگو و همکاران (۲۰۱۵) [7] دو نوع چار صنعتی حاصل از دانه انگور و دانه کدو را با چهار نوع زغال تجاری مخصوص شارژ یا تزریق در EAF مقایسه کردند. آزمون گرماوزن‌سنجی (TGA) در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و اتمسفر CO نشان داد چار دانه کدو پایداری بسیار بیشتری دارد و رفتارش به زغال‌های متداول نزدیک است؛ بیشینه کاهش جرم آن پس از ۱۵۰ دقیقه حدود ۹۵ درصد بود. در مقابل، چار دانه انگور واکنش‌پذیری بالاتری نشان داد که احتمالاً به شرایط پیرولیز، ساختار فیزیکی و ترکیب شیمیایی متفاوت آن مربوط می‌شد: ۲۷/۱ درصد وزنی مواد فرار، ۱۲/۴ درصد خاکستر و ۷۲/۹ درصد کربن ثابت. سنجش واکنش‌پذیری نسبی در آزمون TGA برای چار دانه انگور نرخ کاهش جرم ۱۳/۵ درصد در دقیقه را ثبت کرد، درحالی‌که این مقدار برای نمونه‌های دیگر ـ زغال‌ها و چار دانه کدو ـ تنها ۰/۵ تا ۲ درصد در دقیقه بود. با توجه به دما و اکسیژن بالای EAF، اگر چار دانه انگور به‌صورت شارژ مستقیم اضافه شود احتمال واکنش زودهنگام آن وجود دارد؛ بنابراین تزریق، گزینه مناسب‌تری به نظر می‌رسد.

مجموع مطالعات، امکان‌پذیری فنی استفاده از چار و بیوکک تولیدشده از پسماندهای کشاورزی را تأیید می‌کند، اما ضرورت بررسی پیوسته گزینه‌ها و ارتباط میان کربن ثابت، مواد فرار، مشخصات نهایی چار و عملکرد عملیاتی را نیز نشان می‌دهد. در EAF، کنترل واکنش‌پذیری برای جلوگیری از سوختن زودهنگام و واکنش‌های کنترل‌نشده بسیار مهم است. بریکت‌سازی چار نهایی، با کاهش سطح ویژه در دسترس واکنش و افزایش استحکام مکانیکی، می‌تواند در مهار این مشکل مؤثر باشد [30].

۴.۲. پلیمرها و لاستیک

پسماندهای پلیمری مانند پلی‌اتیلن سنگین (HDPE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) و تایرهای فرسوده به‌عنوان جایگزین‌های مؤثر برای پفکی‌سازی سرباره EAF مطرح شده‌اند. کنگ‌کارات و همکاران (۲۰۱۱) [33] برهم‌کنش کربن و سرباره را در دمای ۱۵۵۰ درجه سانتی‌گراد با مخلوط کک متالورژی و پلیمرهای دورریز ـ PET و پلی‌یورتان (PU) ـ بررسی کردند. آنان در یک کوره افقی، بسترهای فشرده از کک خالص و مخلوط کک/پلیمر ساختند و قطره‌ای از سرباره مذاب EAF با ۳۰/۵ درصد وزنی FeO را روی بستر و نگهدارنده آلومینایی قرار دادند تا اندازه حباب‌ها و رفتار واکنش را مقایسه کنند. نتیجه نشان داد مخلوط‌های پلیمری در مقایسه با کک خالص، پفکی‌شدن بهتری دارند: نسبت حجمی برای PET/کک نزدیک ۱/۲ و پایدار بود، برای PU/کک بین ۰/۸ تا ۱/۲ تغییر کرد، اما برای کک خالص تا محدوده ۰/۷ تا ۱ افت داشت. گرچه حجم تجمعی CO در مخلوط‌ها حدود ۰/۹ لیتر و در کک نزدیک ۱/۲ لیتر بود ـ به دلیل کربن ثابت کمتر و مواد فرار و هیدروژن بیشتر ـ رهاسازی آهسته‌تر گاز سبب به‌دام‌افتادن بهتر آن در سرباره و پایداری کف شد؛ موضوعی که برای کاربرد EAF امیدبخش است. تحلیل گاز خروجی با کروماتوگراف گازی مدل SRI 8610C نشان داد مواد فراری مانند H و CH حاصل

از تجزیه پلیمر در احیای FeO مشارکت کرده‌اند. افزایش قله O H در مخلوط PET/کک به ۱۴٫۰۶ درصد، در برابر ۷٫۷۶ درصد برای کک، شاهد این نقش بود. جدول ۵ ترکیب شیمیایی پلیمرها را با لاستیک و کک مقایسه می‌کند و حضور هیدروژن هیدروکربنی و اکسیژن مواد فرار را نشان می‌دهد [34،35].

جدول 5. مقایسه ترکیب شیمیایی پلیمرها و منابع کربنی دیگر؛ برگرفته از [34،35]

منبع کربن	کربن (% وزنی)	هیدروژن (% وزنی)	گوگرد (% وزنی)	نیتروژن (% وزنی)	اکسیژن (% وزنی)
پلیمر PET	۶۲٫۵	۴٫۲	–	–	۳۳٫۳
لاستیک	۸۵٫۵	۷٫۰	۱٫۷	۰٫۲	۶٫۷
کک متالورژی	۷۷٫۷	۱٫۱	۰٫۳	۱٫۲	–
بیوچار	۸۹٫۲	۰٫۸	۰	۰٫۵	۳٫۲

زهاریا و همکاران (۲۰۰۹) [36] نشان دادند مخلوط لاستیک/کک در تماس با قطرات سرباره، با تسریع احیای FeO و تولید مقادیر زیاد CO و H، پفکی‌شدن را بهبود می‌دهد. این گازها از خروج سریع مواد فرار و پیرولیز لاستیک حاصل می‌شوند. لاستیک حدود ۶۳ درصد مواد فرار و ۷٫۶ درصد هیدروژن دارد؛ در مقایسه با ۳ درصد مواد فرار و ۱٫۱ درصد هیدروژن در کک متالورژی. هیدروژن از نظر سینتیکی مزیت دارد، زیرا سرعت احیای FeO با H یک تا دو مرتبه بزرگی بیشتر از واکنش با CO است؛ بنابراین گاززایی شدیدتر و برهم‌کنش بهتر سرباره و فلز حاصل می‌شود. آزمون‌های گرماوزن‌سنجی و کوره لوله‌ای سقوطی نشان دادند در مخلوط دارای ۳۰ درصد لاستیک، بازده احتراق تقریباً دو برابر می‌شود و درصد سوختن از حدود ۴۰ درصد برای کک به نزدیک ۸۰ درصد برای مخلوط‌های غنی از لاستیک می‌رسد. بررسی‌های SEM و XRD نیز تغییر ساختار را تأیید کردند: با افزودن لاستیک، سطح ریزحفره‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یافت و چگالی توده‌ای مخلوط ۳۰ درصدی تا ۰٫۷۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش پیدا کرد؛ تغییراتی که نفوذ اکسیژن و واکنش‌پذیری چار را بالا می‌برند. آزمایش‌های صنعتی نیز کاهش ۲ تا ۴ درصدی مصرف انرژی الکتریکی و کاهش مصرف کربن تزریقی تا ۱۵ درصد را بدون افت کیفیت فولاد گزارش کردند [37]. در آزمایش قطره ساکن با کوره لوله‌ای افقی در ۱۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت حجم سرباره هنگام افزودن ۲۰ تا ۳۰ درصد لاستیک به کک تا ۲٫۲ برابر افزایش یافت؛ نشانه‌ای از حبس بهتر گاز و پایداری بیشتر کف [38].

بااین‌حال، چالش‌های عملیاتی پابرجاست. لاستیک می‌تواند ورود گوگرد ـ تا ۲ درصد ـ و کلر را افزایش دهد و بر پایداری سرباره و تصفیه گاز خروجی اثر بگذارد. گوگرد با بزرگ‌ترکردن حباب‌های CO ممکن است پایداری کف را کاهش دهد؛ کلر ناشی از حضور PVC نیز کنترل دقیق ترکیب خوراک را ضروری می‌سازد. علاوه بر این، باید سینتیک احتراق کنترل شود تا سامانه گاز خروجی بیش از حد داغ نشود. ارزیابی چرخه عمر نشان می‌دهد

بازیافت تایر، از نظر استفاده از ارزش حرارتی و کاهش مصرف زغال یا کک فسیلی، در مقایسه با دفع آن مزایای زیست‌محیطی متوسطی دارد [39].

۴.۳. مواد زیست‌پایه

بیوچار به‌عنوان منبع کربن تجدیدپذیر برای پفکی‌سازی سرباره مورد توجه قرار گرفته است. دی‌جیووانی و همکاران (۲۰۲۳) [35] نمونه‌های بیوچار را در شرایط شبیه‌سازی‌شده EAF از نظر توان ایجاد کف رتبه‌بندی کردند. بریکت‌های زیستی ساخته‌شده از بیوچار متراکم و روغن زیستی، بیشینه افزایش ارتفاع کف معادل ۱۵۸ درصد داشتند؛ بهتر از بیوچار فله‌ای با ۲۰ درصد، ولی پایین‌تر از کک دانه‌ای با ۳۶۹ درصد. عملکرد بهتر بریکت‌ها به مواد فرار بیشتر ـ حدود ۳۱ درصد ـ و یکپارچگی بالاتر ذرات مربوط می‌شود؛ عواملی که خروج گاز و تماس آن با سرباره را در شرایط کشش سطحی مناسب تسهیل می‌کنند. TGA نشان داد بیوچار در برابر CO و هوا واکنش‌پذیرتر است و گازسازی آن از ۲۷۴ تا ۳۰۳ درجه سانتی‌گراد آغاز می‌شود؛ درحالی‌که این دما برای کک بیش از ۴۰۰ درجه است. این ویژگی اگرچه احیای FeO را سرعت می‌بخشد، خطر احتراق زودهنگام هنگام تزریق، دمش شدید و پاشش سرباره و فولاد مذاب را نیز افزایش می‌دهد.

بیوچار افزون بر مزایای زیست‌محیطی، ازجمله منشأ تجدیدپذیر و گوگرد کم، قابلیت مهندسی خواص دارد. با کنترل نرخ گرمایش و ترکیب خوراک در پیرولیز، افزودن چسباننده و تنظیم اندازه ذرات می‌توان واکنش‌پذیری و کف‌سازی آن را بهینه کرد. بیانکو و همکاران (۲۰۱۳) [40] پس از آزمایش‌های صنعتی کاربرد زغال چوب در EAF، بریکت‌سازی نرمه بیوچار را پیشنهاد کردند تا به کمک افزایش چگالی ذرات، واکنش‌پذیری بهتر کنترل و کف پایدارتر شود. دموس و همکاران (۲۰۱۶) [41] نیز گزارش کردند مخلوط‌های متراکم بیوچار تماس سرباره و فلز را بهتر می‌کنند، پفکی‌شدن را مدت بیشتری ادامه می‌دهند و سرعت تولید CO را در مقایسه با نمونه‌های متراکم‌نشده تا ۴۰ درصد افزایش می‌دهند. هر دو پژوهش تأکید دارند بریکت‌سازی، علاوه بر افزایش استحکام مکانیکی، آزادسازی مواد فرار را منظم‌تر می‌کند و نوسان عملکرد را کاهش می‌دهد.

کیوش و شنک (۲۰۲۳) [42] عملکرد بیوچار، کک و مخلوط آن‌ها را در ترکیب‌های مختلف سرباره EAF بررسی کردند. بیوچار خالص تنها در محدوده بازیسیته ۱٫۲ تا ۳٫۴ کف پایدار ایجاد کرد و ارتفاع کف به ۱۰ سانتی‌متر و حجم آن به ۳۱۱٫۶ سانتی‌متر مکعب رسید؛ بااین‌حال عملکرد آن عموماً پایین‌تر از کک بود. مواد فرار زیاد بیوچار ـ حدود ۴۱ درصد وزنی ـ و تخلخل آن باعث واکنش سریع و ایجاد کف کنترل‌نشده در FeO بیش از ۳۰ درصد وزنی شد. در مقابل، کک در بازیسیته ۱٫۲ تا ۲٫۷ و FeO بین ۱۵ تا ۳۰ درصد وزنی بهترین نتیجه را داشت؛ با ارتفاع کف ۱۱ سانتی‌متر و حجم ۳۴۲٫۷ سانتی‌متر مکعب. مؤثرترین نتیجه از مخلوط یک‌به‌یک کک و بیوچار به دست آمد: دامنه مناسب تشکیل کف تا FeO برابر ۱۵ تا ۴۰ درصد گسترش یافت و حتی در بازیسیته پایین ۱ نیز پایداری حفظ شد. ارتفاع کف تا ۱۰٫۶ سانتی‌متر، حجم آن تا ۳۳۰٫۳ سانتی‌متر مکعب و زمان پفکی‌بودن ۶ تا ۹

دقیقه بود؛ درحالی‌که بیوچار خالص ۳ تا ۴ دقیقه کف پایدار داشت. این هم‌افزایی نشان می‌دهد جایگزینی بخشی از کک با بیوچار می‌تواند واکنش‌های مهارنشده را کاهش دهد، ارتفاع و پایداری کف را تقویت کند و انعطاف عملیاتی فرایند را برای استفاده از منابع کربنی تجدیدپذیر بیشتر سازد.

در مجموع، بیوچار ظرفیت قابل‌توجهی برای پفکی‌سازی سرباره دارد، اما چگالی پایین، پایداری حرارتی و دشواری کنترل واکنش در عمل هنوز چالش‌اند. پژوهش‌های آینده باید بر تدوین روش‌های استاندارد سنجش توان کف‌سازی، تولید مخلوط‌های بیوچار ـ پلیمر ـ کک برای بهینه‌کردن گاززایی و مدل‌سازی رفتار در مقیاس صنعتی تمرکز کنند.

مواد مشتق از نانوسلولز

سلولز فراوان‌ترین ترکیب تجدیدپذیر زیست‌کره است و در گیاهان، جلبک‌ها، تونیکات‌ها و برخی باکتری‌ها یافت می‌شود [43]. به دلیل داشتن کربن، می‌تواند ماده‌ای زیست‌پایه برای جایگزینی بخشی از منابع کربن فسیلی در EAF باشد. نانوسلولز، ماده‌ای پایدار و مشتق از سلولز، بلورینگی بالا، سطح ویژه زیاد و شیمی سطح قابل‌تنظیم دارد و از مسیرهای مختلفی تولید می‌شود:

هیدرولیز با اسید سولفوریک: روشی متداول که در آن آلفاسلولز با H_2SO_4 غلیظ و در دمای کنترل‌شده حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد تیمار می‌شود. محصول، نانوکریستال‌های سولفاته سلولز با شکل میله‌ای و گروه‌های سولفات سطحی است که پراکندگی در آب را بهبود می‌دهند [44].

اکسیداسیون با میانجی TEMPO: این روش گروه‌های کربوکسیلات (COO^-) را روی نانوفیبریل‌های سلولز ایجاد می‌کند و واکنش‌پذیری و ظرفیت جذب آن‌ها را افزایش می‌دهد. فرایند در محیط قلیایی با NaBr و کاتالیزور TEMPO انجام می‌شود و پس از آن جداسازی مکانیکی الیاف صورت می‌گیرد [45].

روش‌های سبز جایگزین: استفاده از مایعات یونی، حلال‌های یوتکتیک عمیق و هیدرولیز با آب زیربحرانی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش قابلیت مقیاس‌پذیری بررسی شده است [43].

تیشیرا و همکاران (۲۰۲۱) [44] گزارش کردند نانوسلولز سولفاته (S-CNC) و الیاف نانوسلولز اکسیدشده با TEMPO (TCNF) برای بازیابی یون کبالت Co^{2+} از محلول آبی، به‌ترتیب ۸۷ و ۹۰ درصد بازیابی در pH برابر ۶ و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد داشتند. تعادل جذب در کمتر از ۳۰ تا ۴۵ دقیقه برقرار شد که نشان‌دهنده سینتیک مناسب است. TCNF همچنین ظرفیت جذب ۱۶۷ میلی‌گرم بر گرم برای Cr^{3+} ، ۱۱۰۴ میلی‌گرم بر گرم برای Ni^{2+} و ۶۶ میلی‌گرم بر گرم برای Zn^{2+} نشان داد [46]. مطالعه‌ای تازه [47] بازیابی قابل‌توجه یون‌های سمی دیگری مانند Hg^{2+} را نیز گزارش کرده است. به گفته نویسندگان، نوع عامل‌دارکردن سطح تعیین‌کننده است؛ برای Hg^{2+} ، جذب در pH برابر ۵ و دمای محیط با TCNF بسیار بهتر از S-CNC بود و مقدار بازیابی به‌ترتیب ۸۹/۳ و ۳۵/۲

درصد به دست آمد.

نویسندگان همچنین با آزمون‌های دقیق TGA نشان دادند حضور فلز می‌تواند رفتار حرارتی نانوالیاف را در اتمسفر خنثی تغییر دهد. در TCNF تغییر محسوسی دیده نشد، اما در S-CNC یک رویداد حرارتی تازه در حدود ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد ظاهر شد که از تغییر سازوکار تجزیه حرارتی حکایت داشت. هر دو نوع نانوسلولز در مقایسه با آلفاسلولز اولیه پایداری حرارتی کمتری داشتند؛ ویژگی‌ای که می‌تواند به ماهیت نانومتری آن‌ها، مطابق تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) در شکل ۵، مربوط باشد.

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 5. تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) از TCNF در بخش (الف) و S-CNC در بخش (ب) [44]. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

تمایل زیاد گروه‌های کربوکسیلات (R–COO TCNF) به یون‌های فلزات واسطه در محلول آبی، امکان ساخت نانومواد اکسیدی پیشرفته را فراهم می‌کند. نمونه آن اسپینل فریت روی (Fe ZnO) است که به‌تازگی با این روش تولید و ظرفیت شبه‌خازنی چشمگیر ۲۰۳۱٫۸۱ فاراد بر گرم برای آن گزارش شده است [48]. کنترل ترکیب و ریخت‌شناسی محصول مناسب بود و نانوذرات کروی Fe ZnO تشکیل شدند. شکل ۶، بلورینگی و ابعاد بسیار کوچک این نانوکریستال‌ها را در تصاویر TEM و HRTEM نشان می‌دهد؛ حلقه‌های پراش در تصویر درج‌شده نیز با صفحات بلوری ساختار مکعبی فریت روی مطابقت دارند.

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 6. تصاویر میدان‌روشن TEM (چپ) و HRTEM (راست) از نانوکریستال‌های فریت روی [48]. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

در کاربردی تازه از همین راهبرد سنتز، نمونه‌های حاوی اسپینل فریت کبالت (Fe CoO) با استفاده از TCNF به‌عنوان الگوی واکنش‌پذیر تولید شدند [49]. نانوکریستال‌های تقریباً کروی با اندازه متوسط ۱۹ ± ۰٫۲ نانومتر (شکل ۷)، در واکنش هیدرولیز سدیم بورهیدرید (NaBH) در محیط قلیایی برای تولید هیدروژن فعالیت کاتالیستی امیدوارکننده‌ای نشان دادند. نرخ ویژه تولید هیدروژن (HGR) در ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر ۱٫۸۹ لیتر بر گرم در دقیقه بود که در مقایسه با نانوکاتالیزورهای مشابه گزارش‌شده در منابع، رقابتی ارزیابی شده است.

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 7. تصویر TEM نانوذرات تقریباً کروی فریت کبالت سنتزشده با الگوی واکنش‌پذیر TCNF [49]. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

با تغییر اتمسفر فرایند از اکسیدکننده (هوا) به خنثی (آرگون) می‌توان خانواده‌ای دیگر از مواد ساخت که در آن‌ها یک زمینه کربنی همراه با نانوکریستال‌های اکسیدی حضور دارد. نمونه‌ای از این روش در ساخت مواد حاوی اکسید آهن گزارش شده است [50]: یون‌های آهن با غلظت اولیه ۷۰ گرم بر لیتر در محلول آبی روی نانوالیاف TCNF جذب شدند و سپس ماده در جریان آرگون، به مدت دو ساعت در ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تیمار حرارتی شد. تحلیل پراش پرتو ایکس به روش ریتولد حضور آهن فلزی، ووستیت (FeO)، مگنتیت (Fe O)، هماتیت (Fe O) و ماگهمیت (Fe O) را نشان داد. مقدار قابل‌توجهی فاز کربنی نیز مشاهده شد (شکل ۸) که در برازش ریتولد به‌صورت گرافیت لحاظ شده بود.

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 8. نتیجه برازش ریتولد نمونه نانوهیبرید حاوی اکسید آهن، سنتزشده در ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت در آرگون [50]. خط خاکستری اختلاف داده‌های تجربی (آبی) و مدل (قرمز) است. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

شاخص نیکویی برازش (GOF) در تحلیل ریتولد ۱٫۹۵ به دست آمد که کیفیت برازش را تأیید می‌کرد. اندازه‌های متوسط بلورک محاسبه‌شده در جدول ۶ نیز سهم مهم ساختارهای نانومتری را نشان می‌دهد. بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل ۹، همراه با طیف‌سنجی و تفکیک طیف EDS در شکل ۱۰، وجود زمینه کربنی (قله کربن) را تأیید کرد که بلورهای اکسید آهن (قله‌های آهن و اکسیژن) بر روی آن پراکنده‌اند.

جدول 6. اندازه متوسط بلورک فازهای شناسایی‌شده در نانوهیبرید حاوی اکسید آهن [51]

فاز بلوری	سهم جرمی (%)	اندازه متوسط بلورک (نانومتر)
هماتیت (Fe O)	۲۷٫۳۰	۱۲۷٫۳
مگنتیت (Fe O)	۶٫۱۶	۳۴٫۳
ماگهمیت (Fe O)	۲۷٫۱۸	۵۳٫۲
آهن (Fe)	۱٫۴۱	۳۳٫۹
ووستیت (FeO)	۱٫۹۸	۱۱٫۷

فاز بلوری	سهم جرمی (%)	اندازه متوسط بلورک (نانومتر)
گرافیت (C)	۳۶٫۵۴	۹٫۱

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 9. تصویر SEM نانوهیبرید حاوی اکسید آهن و فاز کربنی، ساخته‌شده با الگوی TCNF در آرگون، ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و طی ۲ ساعت [50]. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 10. طیف EDS ناحیه‌ای از تصویر SEM که در زیرنویس منبع اصلی به شکل ۵ ارجاع داده شده است [50]. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

هم‌نشینی نزدیک این فازها در طیف رامان (شکل ۱۱) نیز مشاهده شد: قله‌های شاخص اکسید آهن در ناحیه ۲۱۸ تا ۴۸۹ سانتی‌متر معکوس و قله‌های فاز کربنی در محدوده ۱۱۰۰ تا ۳۲۶۰ سانتی‌متر معکوس قابل شناسایی بودند. نوارهای معمول G، D و 2D دیده شدند؛ به‌ویژه نوارهای G و 2D نشانه حضور کربن گرافیتی‌اند.

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 11. طیف رامان نانوهیبرید حاوی اکسید آهن و فاز کربنی تولیدشده از الگوی TCNF در آرگون، ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و طی ۲ ساعت [51]. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

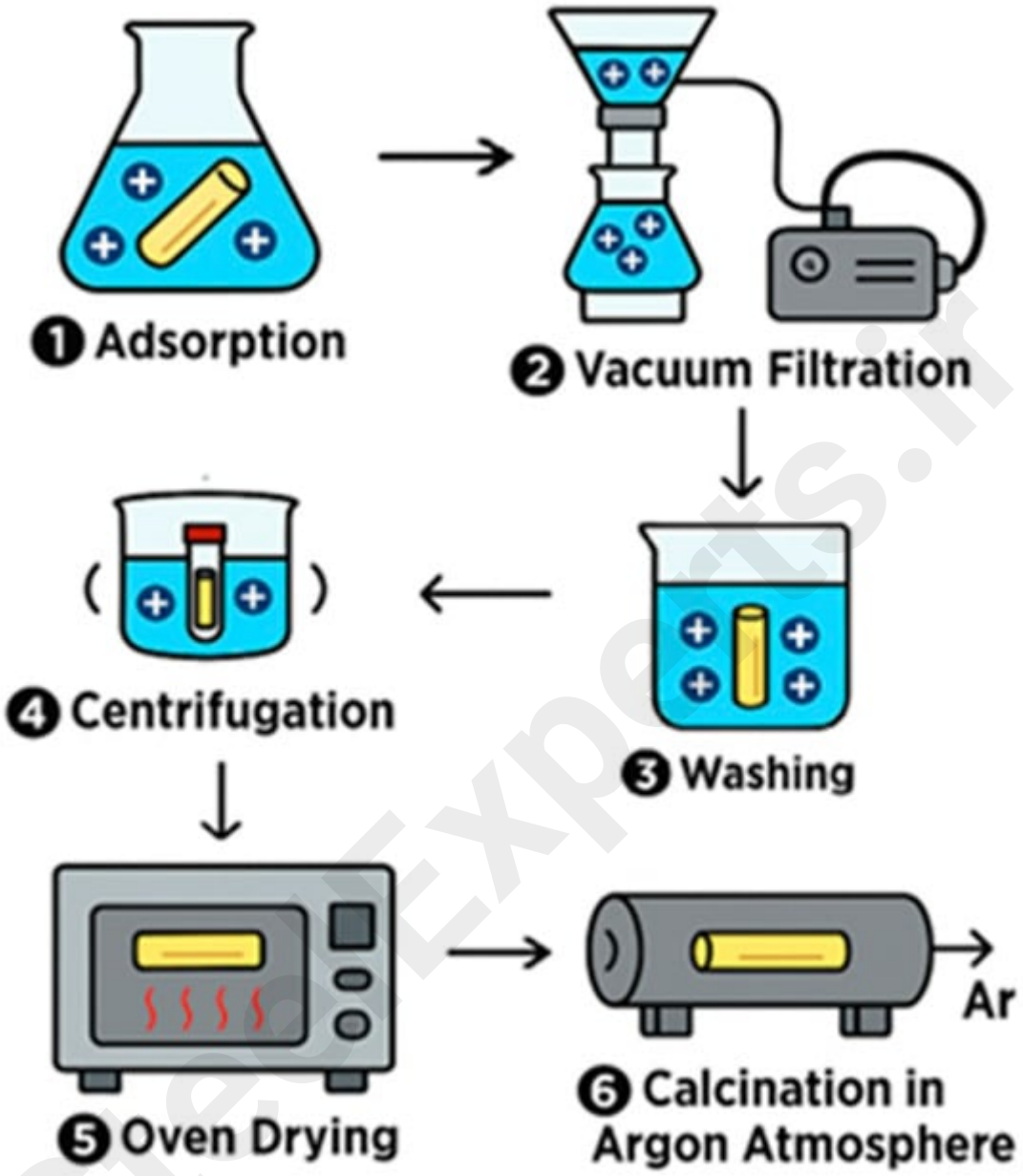
این نتایج نشان می‌دهند که با تغییری نسبتاً ساده در اتمسفر تیمار ـ از اکسیدکننده به خنثی ـ می‌توان نانوهیبریدهای دومنظوره تولید کرد: فاز کربنی در تماس نزدیک با نانوکریستال‌های اکسیدی قرار می‌گیرد؛ اکسیدهای نانومتری از واکنش اکسیژن فاز گاز با فلزات جذب‌شده روی TCNF و فاز کربنی از تخریب حرارتی همان الیاف ایجاد می‌شوند.

این فناوری در آینده می‌تواند برای تولید افزودنی‌های مؤثر در فولادسازی EAF بررسی شود؛ افزودنی‌هایی که هم عامل احیاکننده کربنی و هم اکسیدهای تنظیم‌کننده خواص فیزیکی سرباره، ازجمله گرانروی ظاهری و بازیسیته، را به‌صورت یکجا تأمین کنند. فاز کربنی می‌تواند احیاکننده درجا برای FeO باشد و همراه با اکسیژن تزریقی، تولید CO را تقویت کند. در سوی دیگر، اکسیدهای کلسیم و منیزیم به بازیسیته و گرانروی ـ دو عامل حیاتی برای بهبود کف سرباره و پایداری قوس ـ کمک می‌کنند. واکنش‌پذیری فاز کربنی حتی ممکن است با تیمار اکسیدکننده

پس از ساخت، مانند قرارگیری در محلول KOH یا NaOH، افزایش یابد [51،52]. از نظر نوع اکسید نیز CaO و MgO، به دلیل بازی‌بودن و نقش احتمالی در تشکیل ذرات جامد معلق، گزینه‌های مناسبی‌اند. ازاین‌رو تزریق نانوهیبریدهای کربنی ـ اکسیدی به EAF برای جایگزینی بخشی از کک یا زغال‌سنگ، یک زمینه پژوهشی قابل‌توجه است.

شکل ۱۲ یک مسیر نمونه ساخت چنین ماده‌ای را نشان می‌دهد. برای تولید نانوهیبرید حاوی نانوذرات CaO و MgO می‌توان ابتدا ۱ گرم نانوالیاف TCNF را در سوسپانسیونی با محلول رقیق حاوی مقادیر تقریباً برابر نیترات کلسیم شش‌آبه ($Ca(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) و نیترات منیزیم شش‌آبه ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) قرار داد. مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط پیوسته هم زده می‌شود. سپس فاز جامد با فیلتراسیون خلأ از محلول جدا، شست‌وشو و سانتریفیوژ و در نهایت ۲۴ ساعت در ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شود. در مرحله بعد، الیاف خشک و آغشته به یون‌های فلزی در جریان ثابت آرگون صنعتی و دمای ثابت تیمار حرارتی می‌شوند. غلظت اکسیژن جریان باید آن‌قدر پایین باشد که موجب اکسیداسیون شدید الیاف و اتلاف کربن به‌صورت ترکیبات فرار نشود؛ درعین‌حال باید برای ایجاد نیروی محرک ترمودینامیکی تشکیل CaO و MgO از یون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} موجود کافی باشد.

SteelExperts.ir



شکل 12. روند سنتز نانوهیبرید کربن‌دار حاوی نانوذرات MgO و CaO. منبع: مقاله اصلی؛ بازنشر بر پایه CC BY 4.0.

برای جلوگیری از باقی‌ماندن نیترات پس از خشک‌کردن، شست‌وشو و سانتریفیوژ الیاف TCNF حاوی یون‌های فلزی ضروری است تا آنیون‌های ناخواسته NO حذف شوند.

وجود نیترات ممکن است فرایند ساخت را دشوار کند، زیرا تشکیل اکسید مطلوب را از نظر ترمودینامیکی به دماهای بالاتری وابسته می‌سازد. تبدیل می‌تواند از طریق واکنش مستقیم با اکسیژن موجود (روابط ۸ و ۹) یا با تجزیه حرارتی (روابط ۱۰ و ۱۱) انجام شود. روابط شیمیایی زیر همان صورت درج‌شده در منبع اصلی را حفظ می‌کنند و پیش از استفاده برای طراحی فرایند باید از نظر موازنه استوکیومتری راستی‌آزمایی شوند.

8) $(2Ca(NO_3)_2 + O_{2(g)} = 2CaO + 4NO_{3(g)}$

9) $(2Mg(NO_3)_2 + O_{2(g)} = 2MgO + 4NO_{3(g)}$

10) $(Ca(NO_3)_2 = CaO + NO_{2(g)} + O_{2(g)}$

11) $(Mg(NO_3)_2 = MgO + NO_{2(g)} + O_{2(g)}$

در مسیر واکنش مستقیم با O، نیروی محرک ترمودینامیکی بسیار اندک است؛ چنان‌که نمودار تغییر انرژی آزاد گیبس استاندارد واکنش (G°) در شکل ۱۳ نشان می‌دهد. برای هر دو رابطه ۸ و ۹، مقدار مثبت و بزرگ G° در محدوده ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ کلوین نشان می‌دهد ثابت تعادل بسیار کوچک است. در تجزیه حرارتی (روابط ۱۰ و ۱۱)، نیروی محرک بیشتر خواهد بود؛ موضوعی که در نمودار شکل ۱۴ دیده می‌شود. طبق آن، برای نیترات منیزیم باید دمای کلسیناسیون از حدود ۶۰۰ کلوین و برای نیترات کلسیم از حدود ۹۰۰ کلوین بالاتر باشد تا G° منفی شود.

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 13. تغییر انرژی آزاد گیبس استاندارد واکنش با دما برای روابط ۸ و ۹ [53]. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

تصویر اصلی به دلیل مشخص‌نبودن مجوز بازنشرِ اثر اقتباسی در این نسخه درج نشده است. مشاهده تصویر در مقاله ناشر.

شکل 14. تغییر انرژی آزاد گیبس استاندارد واکنش با دما برای روابط ۱۰ و ۱۱ [53]. توضیح شکل برای حفظ ارجاع علمی ترجمه شده است.

این دماها در مراحل پیش از احیا در EAF به‌آسانی قابل دستیابی‌اند؛ بااین‌حال برای حذف اکسیدهای نیتروژن تولیدشده در گاز خروجی، به فرایندهای شیمیایی ویژه تصفیه گاز نیاز است.

۵. چشم‌اندازهای پژوهشی آینده

در این بخش، زمینه‌های پژوهشی آینده برای استفاده از مواد معرفی‌شده به‌عنوان افزودنی‌های ارتقادهنده عملکرد کوره قوس الکتریکی مطرح می‌شوند.

۵.۱. افزودنی‌های کربنی پایدار

پژوهش‌های فراوانی منابع کربن، از زیست‌توده‌های مختلف تا پسماند پلیمرها، را مشخصه‌یابی و با کک مقایسه کرده‌اند. در شماری از این مطالعات، آزمایش‌های آزمایشگاهی با کوره لوله‌ای برای شبیه‌سازی شرایط EAF و ارزیابی برهم‌کنش سرباره و توان کف‌سازی مواد کربنی انجام شده است [33]. بااین‌حال، هنوز برای مدل‌سازی

سینتیک آزادسازی گاز و تأثیر آن بر سرعت احیای FeO، به‌ویژه در حضور مقدار قابل‌توجه هیدروکربن‌ها، جای کار زیادی وجود دارد. این موضوع هنگام مقایسه مواد با میزان مواد فرار و درجه کربونیزاسیون متفاوت اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. چنین مدل‌هایی به درک بهتر نتایج آزمون‌ها و طراحی روش‌های فرآوری کمک می‌کنند تا مشکلات عملیاتی، مانند ارزش حرارتی پایین یا واکنش‌پذیری زودهنگام، کاهش یابد.

همچنین انجام آزمون‌های بلندمدت برای برآورد ردپای کربنی کل زنجیره، از تیمار منبع کربن ـ برشته‌سازی، پیرولیز و بریکت‌سازی ـ تا مصرف آن در EAF، ضروری است [27]. در استفاده از لاستیک و پلیمرهای پسماند، این ارزیابی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا باید آلایندگی جوی ناشی از مصرف آن‌ها در EAF با سناریوی سوزاندن پسماند مقایسه شود [38].

در نهایت، ارزیابی اقتصادی شرط لازم برای ترسیم نقشه راه پایداری و اطمینان از امکان گذار در مقیاس صنعتی است؛ زیرا مواد جایگزین اغلب به سبب نیاز به فرآوری و محدودیت دسترسی، گران‌تر از منابع مرسوم‌اند [30].

۵.۲. نانوهیبریدهای کربن‌دار

برای ارزیابی امکان استفاده از نانوهیبریدهای ساخته‌شده به‌عنوان افزودنی EAF، باید دو موضوع هم‌زمان بررسی شود: فعالیت فاز کربنی و اثر احتمالی اکسیدهای موجود بر پفکی‌شدن سرباره. اثر دوم مستقیماً به ماهیت شیمیایی اکسید و غلظت آن در کامپوزیت نهایی وابسته است.

واکنش‌پذیری فاز کربنی را می‌توان با گرماوزن‌سنجی (TGA) و گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) سنجید و آن را با روشی مطمئن برای مدل‌سازی سینتیک تولید CO و CO هنگام برهم‌کنش کربن و اکسیژن تلفیق کرد. برای نمونه، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [54،55] می‌تواند برای برآورد پارامترهای سینتیکی ـ مرتبه واکنش، انرژی فعال‌سازی و ضریب پیش‌نمایی ـ به کار رود. کنترل واکنش‌پذیری از راه تنظیم دمای کوره در مرحله کلسیناسیون یا تیمار شیمیایی پس از ساخت نیز ممکن است [51،52]. در نهایت، باید فعالیت فاز کربنی سنتزشده در چرخه واقعی EAF، از طریق آزمایش‌های مقیاس آزمایشگاهی مشابه آزمون‌های معرفی‌شده برای سایر افزودنی‌ها [35–37]، به‌دقت ارزیابی شود.

در کنار این موضوع، باید اثر نوع اکسید بر تشکیل کف سرباره EAF هم از نظر نظری و هم تجربی مشخص شود. در بخش نظری می‌توان با شبیه‌سازی ترمودینامیکی اثر تشکیل فازهای جامد را تعیین و سپس شاخص پفکی‌شدن را محاسبه کرد.

برای ترکیب‌های نانوهیبرید امیدوارکننده‌تر، لازم است عملکرد افزودنی در شرایط شبیه‌سازی‌شده EAF و در مقیاس آزمایشگاهی به‌طور کمی سنجیده شود تا اثر آن بر پایداری قوس و شاخص‌های تولید فولاد مشخص

شود.

۶. نتیجه‌گیری

گذار به فولادسازی کم‌کربن فقط به استفاده از انرژی پاک‌تر محدود نیست؛ بلکه مستلزم جایگزینی کربن فسیلی است که در عملیات کوره قوس الکتریکی، هم برای احیا و هم برای ایجاد کف سرباره مصرف می‌شود. این مرور نشان داد سرباره پفکی همچنان یکی از عوامل تعیین‌کننده بازده انرژی است و بهینه‌سازی آن به شیمی سرباره و ماهیت منبع کربنی وابسته است.

منابع کربنی جایگزین، ازجمله بیوچار، پسماند کشاورزی، پلیمرها و لاستیک، در آزمون‌های آزمایشگاهی و صنعتی نتایج امیدوارکننده‌ای داشته‌اند. مخلوط لاستیک/کک و پسماندهای پلیمری می‌توانند پفکی‌شدن سرباره را بهبود دهند، مصرف انرژی الکتریکی را ـ طبق جمع‌بندی نویسندگان ـ تا ۶ درصد کاهش دهند و نیاز به کربن تزریقی را بدون آسیب به کیفیت فولاد کم کنند. بیوچار، به‌ویژه در حالت بریکت‌شده، مزایای محیط‌زیستی و عملکرد کف‌سازی بهتری دارد؛ هرچند خطر احتراق زودهنگام و تغییرپذیری خواص آن پابرجاست. مطالعات اخیر تأیید می‌کنند که مخلوط کک و بیوچار می‌تواند پنجره عملیاتی تشکیل کف را در طیف گسترده‌تری از ترکیب‌های سرباره باز کند.

با وجود این پیشرفت‌ها، به‌کارگیری موفق کربن تجدیدپذیر در EAF به تحقیق بیشتر درباره مهندسی مواد، راهبردهای تزریق و مدل‌سازی ترمودینامیکی نیاز دارد. تدوین دستورالعمل‌های استاندارد ارزیابی توان کف‌سازی برای اثبات کارایی فنی و منافع زیست‌محیطی ضروری است. در آینده باید راهکارهای ترکیبی، مانند کامپوزیت‌های بیوچار ـ پلیمر، و حتی نانوکامپوزیت‌های شامل فاز کربنی و اکسیدی نیز بررسی شوند. این دو فاز می‌توانند هم‌زمان با تیمار حرارتی الیاف نانوسلولز حاوی یون‌های فلزی جذب‌شده، در اتمسفر خنثی ایجاد شوند. تمایل زیاد نانوسلولز اکسیدشده با TEMPO (TCNF) به کاتیون‌های فلزی، امکان جست‌وجوی ترکیب بهینه فاز اکسیدی را فراهم می‌کند؛ فازی که بتواند هم پفکی‌شدن سرباره و هم واکنش‌پذیری کربن را بهتر کند و تشکیل CO را در دمای کمتر و با سرعت مطلوب تسهیل سازد.

در جمع‌بندی، جایگزینی کربن فسیلی با منابع پایدار از نظر فنی امکان‌پذیر است و برای تحقق هدف انتشار خالص صفر در صنعت فولاد ضرورت راهبردی دارد. نوآوری پیوسته شرط بهره‌گیری کامل از این راهکارها و کاهش انتشار در فولادسازی با کوره قوس الکتریکی است.

سهم نویسندگان

سهم نویسندگان: G.E.M. در مفهوم‌پردازی، تهیه پیش‌نویس و بازبینی و ویرایش؛ M.D.C.C. در بازبینی و ویرایش؛ R.N.C.d.S. در مفهوم‌پردازی، سرپرستی، بازبینی و ویرایش؛ و A.G. در بازبینی و ویرایش مشارکت داشته‌اند. همه نویسندگان نسخه منتشرشده مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

حمایت مالی

ماریو کاربخال (M. Carbajal) از برنامه منابع انسانی آژانس ملی نفت، گاز طبیعی و سوخت‌های زیستی (PRH-ANP) بابت اعطای بورسیه در پروژه «تیمار حرارتی الیاف سلولزی عامل‌دارشده با آهن برای سنتز پایدار نانومواد اکسیدی آهن و کربن» قدردانی کرده است.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و دستاوردهای اصلی این پژوهش در متن مقاله ارائه شده‌اند. برای دریافت اطلاعات بیشتر می‌توان با نویسندگان مسئول مکاتبه کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان از برنامه منابع انسانی آژانس ملی نفت، گاز طبیعی و سوخت‌های زیستی (PRH-ANP؛ شماره 3-2025/02828) و بنیاد پژوهش سائوپائولو (FAPESP) برای پشتیبانی و مدیریت قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام کرده‌اند که در ارتباط با انتشار این مقاله تعارض منافعی ندارند.

منابع و مآخذ

فهرست ۵۵ مرجع، با رسم‌الخط و مشخصات کتاب‌شناختی مقاله اصلی حفظ شده است.

1. Kim, Y.; Tanaka, K.; Matsuoka, S. Environmental and economic effectiveness of the Kyoto Protocol. PLoS ONE 2020 , 15 , e0236299. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

2. World Economic Forum. Net-Zero Industry Tracker 2024 ; World Economic Forum: Davos, Switzerland, 2024; Available online: https://www.weforum.org/publications/net-zero-industry-tracker-2024/steel-net-zero-tracker-2024/ (accessed on 15 April 2025).

3. Worldsteel Association. Sustainability Indicators 2023 Report ; Worldsteel Association: Brussels, Belgium, 2023; Available online: https://worldsteel.org/media/press-releases/2023/sustainability-indicators-2023/ ((accessed on 24 February 2024).

4. Wei, R.; Zhang, L.; Cang, D.; Li, J.; Li, X.; Xu, C.C. Current status and potential of biomass utilization in ferrous metallurgical industry. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017 , 68 , 511–524. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

5. Echterhof, T. Review on the Use of Alternative Carbon Sources in EAF Steelmaking. Metals 2021 , 11 , 222. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

6. Sung, Y.; Lee, S.; Han, K.; Koo, J.; Lee, S.; Jang, D.; Oh, C.; Jang, B. Improvement of Energy Efficiency and Productivity in an Electric Arc Furnace through the Modification of Side-Wall Injector Systems. Processes 2020 , 8 , 1202. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

7. Fidalgo, B.; Berrueco, C.; Millan, M. Chars from agricultural wastes as greener fuels for electric arc furnaces. J. Anal. Appl. Pyrolysis 2015 , 113 , 274–280. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

8. Odenthal, H.; Kemminger, A.; Krause, F.; Sankowski, L.; Uebber, N.; Vogl, N. Review on Modeling and Simulation of the Electric Arc Furnace (EAF). Steel Res. Int. 2017 , 89 , 1700098. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

9. Kirschen, M.; Pfeifer, H.; Wahlers, F.-J.; Mees, H. Off-gas Measurements for Mass and Energy Balances of a Stainless Steel EAF. In Proceedings of the 59th Electric

[Furnace Conference, Phoenix, AZ, USA, 11–14 November 2001. [Google Scholar

10. Urban, W.; Weinberg, M.; Cappel, J. De-Phosphorization strategies and modelling in [oxygen steelmaking. Iron Steel Technol. 2014 , 134 , 27–39. [Google Scholar

11. Vieira, D.; Almeida, R.A.M.; Bielefeldt, W.V.; Vilela, A.C.F. Slag evaluation to reduce energy consumption and EAF electrical instability. Mater. Res. 2016 , 19 , 1127–1131. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

12. Gandhare, W.Z.; Lulekar, D.D. Analyzing electric power quality in arc furnaces. Renew. Energy Power Qual. J. 2007 , 1 , 286–290. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

13. Pfeifer, H.; Kirschen, M.; Simoes, J.-P. Thermodynamic analysis of EAF electrical energy demand. In Proceedings of the EEC 2005, Birmingham, UK, 9–11 May [2005. [Google Scholar

14. Liu, X.; Yan, W. Current advances in slag foaming processes toward reduced CO 2 for electric arc furnace steelmaking. J. CO 2 Util. 2024 , 90 , 102979. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

15. Luz, A.P.; Tomba Martinez, A.G.; López, F.; Bonadia, P.; Pandolfelli, V.C. Slag foaming practice in the steelmaking process. Ceram. Int. 2018 , 44 , 8727–8741. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

16. Koveria, A.; Kieush, L.; Svietkina, O.; Perkov, Y. Metallurgical coke production with biomass additives. Part 1. A review of existing practices. Can. Metall. Q. 2020 , 59 , 417–429. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

17. Morales, R.D.; Lule, R.; López, F.; Camacho, J.; Romero, J. The Slag Foaming Practice in EAF and Its Influence on the Steelmaking Shop Productivity. ISIJ Int. 1995 , 35 , 1054–1062. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

18. Fruehan, J.; Ito, K. Slag foaming in smelting reduction processes. Steel Res. 1989 , 60 , 151–156. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

19. Almeida, R.; Bielefeldt, W.; Vilela, A.C. Slag Foaming Fundamentals—A Critical Assessment. Mater. Res. 2017 , 20 , 474–480. [Google Scholar] [CrossRef] [

Scilit] DOI

20. Jiang, R.; Fruehan, R.J. Slag Foaming in Bath Smelting. Metall. Mater. Trans. B 1991 , 22 , 481–489. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

21. Zhang, Y.; Fruehan, R.J. Effect of the bubble size and chemical reactions on slag foaming. Metall. Mater. Trans. B 1995 , 26 , 803–812. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

22. Son, W.Y.; Kee, S.H.; Kang, Y. Influence of Bubble Size on the Foaming Behavior of Molten Slag Containing FeO. Metall. Mater. Trans. B 2021 , 52 , 2951–2959. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

23. Chang, Y.-E.; Wu, W.; Shen, J.-M.; Luo, S.-F.; Yu, K.-W.; Lin, C.-M. Relationship between viscosity, foaming, and structure of CaO–SiO 2 –Al 2 O 3 –MgO–FeO slag with the addition of SiO 2 and Al 2 O 3 . J. Mater. Res. Technol. 2024 , 29 , 3738–3748. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

24. Roscoe, R. The viscosity of suspension of rigid spheres. Br. J. Appl. Phys. 1952 , 3 , 267. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

25. Pretorius, E.B.; Carlisle, R. Foamy Fundamentals and their Practical Application to Electric Arc Furnace Steelmaking. In Proceedings of the 56th Electric Arc Furnace [Conference, Orlando, FL, USA, 15–18 November 1998. [Google Scholar

26. Kieush, L.; Schenk, J.; Koveria, A.; Rantitsch, G.; Hrubiak, A.; Hopfinger, H. Utilization of Renewable Carbon in Electric Arc Furnace-Based Steel Production: Comparative Evaluation of Properties of Conventional and Non-Conventional Carbon-Bearing Sources. Metals 2023 , 13 , 722. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

27. Echterhof, T.; Demus, T.; Schlinge, L.; Schliephake, H.; Pfeifer, H. Use of palm kernel shells as a substitute for charge coal in a 140 t DC electric arc furnace. In Proceedings of the SCANMET V–5th International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, Luleå, Sweden, 12–15 June 2013. [Google [Scholar

28. Ighalo, J.O.; Akaeme, F.C.; Georgin, J.; de Oliveira, J.S.; Franco, D.S.P. Biomass

Hydrochar: A Critical Review of Process Chemistry, Synthesis Methodology, and Applications. Sustainability 2025 , 17 , 1660. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

.29 Sukor, M.Z.; Daud, A.R.M.; Jamaludin, S.I.S.; Muhamad, S.H.A.; Samah, N.A.A.; Sanusi, S.N.A.; Annuar, N.H.R. Biomass Wastes Hydrothermal Carbonization: A Mini-Review on Hydrochar Properties and Combustion Performance. Chem. Eng. Trans. 2023 , 106 , 451. [Google Scholar] [CrossRef] DOI

.30 Cirilli, F.; Baracchini, G.; Bianco, L. EAF long term industrial trials of utilization of char from biomass as fossil coal substitute. La Metall. Ital. 2017 , 1 , 13–17. [[Google Scholar

.31 Rejdak, M.; Wojtaszek-Kalaitzidi, M.; Gałko, G.; Mertas, B.; Radko, T.; Baron, R.; Książek, M.; Yngve Larsen, S.; Sajdak, M.; Kalaitzidis, S. A Study on Bio-Coke Production—The Influence of Bio-Components Addition on Coke-Making Blend Properties. Energies 2022 , 15 , 6847. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

.32 Rashid, R.Z.A.; Salleh, H.M.; Ani, M.H.; Yunus, N.A.; Akiyama, T.; Purwanto, H. Reduction of low grade iron ore pellets using palm kernel shell. Renew. Energy 2013 , 63 , 617–623. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

.33 Kongkarat, S.; Khanna, R.; Koshy, P.; O'Kane, P.; Sahajwalla, V. Recycling Waste Polymers in EAF Steelmaking: Influence of Polymer Composition on Carbon/Slag Interactions. ISIJ Int. 2012 , 52 , 385–393. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

.34 Sahajwalla, V.; Zaharia, M.; Kongkarat, S.; Khanna, R.; Rahman, M.; Saha-Chaudhury, N.; Kane, P.; Dicker, J.; Skidmore, C.; Knights, D. Recycling End-of-Life Polymers in an Electric Arc Furnace Steelmaking Process: Fundamentals of Polymer Reactions with Slag and Metal. Energy Fuels 2012 , 26 , 58–66. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

.35 DiGiovanni, C.; Li, D.; Ng, K.W.; Huang, X. Ranking of Injection Biochar for Slag Foaming Applications in Steelmaking. Metals 2023 , 13 , 1003. [Google Scholar] [

CrossRef] [Scilit] DOI

36. Zaharia, M.; Sahajwalla, V.; Kim, B.-C.; Khanna, R.; Saha-Chaudhury, N.; O'Kane, P.; Dicker, J.; Skidmore, C.; Knight, D. Recycling of Rubber Tires in Electric Arc Furnace Steelmaking: Simultaneous Combustion of Metallurgical Coke and Rubber Tires Blends. Energy Fuels 2009 , 23 , 2467–2474. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

37. Sahajwalla, V.; Zaharia, M.; Rahman, M.; Khanna, R.; Saha-Chaudhury, N.; O'Kane, P.; Dicker, J.; Skidmore, C.; Knights, D. Recycling Rubber Tires and Waste Plastics in EAF Steelmaking. Steel Res. 2011 , 82 , 566–572. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

38. Zaharia, M.; Sahajwalla, V.; Khanna, R.; Koshy, P. Carbon/Slag Interactions between Coke/Rubber Blends and EAF Slag at 1550 °C. ISIJ Int. 2009 , 49 , 1513–1521. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

39. Zhao, Q.; Wu, Y.; Xu, J.; Xu, J.; Zhu, H.; He, W.; Li, G. Pathways to Carbon Neutrality: A Review of Life Cycle Assessment-Based Waste Tire Recycling Technologies and Future Trends. Processes 2025 , 13 , 741. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

40. Bianco, L.; Baracchini, G.; Cirilli, F.; Di Sante, L.; Moriconi, A.; Moriconi, E.; Agorio, M.M.; Pfeifer, H.; Echterhof, T.; Demus, T.; et al. Sustainable Electric Arc Furnace Steel Production: GREENEAF. BHM Berg-Hüttenmännische Monatshefte 2013 , 158 , 17. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

41. Demus, T.; Reichel, T.; Schulten, M.; Echterhof, T.; Pfeifer, H. Increasing the sustainability of steel production in the electric arc furnace by substituting fossil coal with biochar agglomerates. Ironmak. Steelmak. 2016 , 43 , 564–570. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

42. Kieush, L.; Schenk, J. Investigation of the Impact of Biochar Application on Foaming Slags with Varied Compositions in Electric Arc Furnace-Based Steel Production. Energies 2023 , 16 , 6325. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

43. Trache, D.; Tarchoun, A.; Derradji, M.; Hamidon, T.S.; Masruchin, N.; Brosse, N.; Hussin, M.H. Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Applications. Front. Chem. 2020 , 8 , 392. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

44. Teixeira, L.T.; Braz, W.F.; Navarro, R.C.S.; Pandoli, O.G.; Geraldes, M.C. Sulfated and carboxylated nanocellulose for Co +2 adsorption. J. Mater. Res. Technol. 2021 , 15 , 434–447. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

45. Nechyporchuket, O.; Belgacem, M.N.; Bras, J. Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. Ind. Crops Prod. 2016 , 93 , 2–25. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

46. Sehaqui, H.; Larraya, U.P.; Liu, P.; Pfenninger, N.; Mathew, A.P.; Zimmermann, T.; Tingaut, P. Enhancing adsorption of heavy metal ions onto biobased nanofibers from waste pulp residues for application in wastewater treatment. Cellulose 2014 , 21 , 2831–2844. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

47. Braz, W.F.; Teixeira, L.T.; Navarro, R.; Pandoli, O.G. Nanocellulose Application for Metal Adsorption and Its Effect on Nanofiber Thermal Behavior. Metals 2025 , 15 , 832. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

48. Teixeira, L.T.; Lima, S.L.S.; Rosado, T.F.; Liu, L.; Vitorino, H.A.; Santos, C.C.; Mendonça, J.P.; Garcia, M.A.S.; Navarro, R.C.S.; Silva, A.G.M. Sustainable Cellulose Nanofibers-Mediated Synthesis of Uniform Spinel Zn-Ferrites Nanocorals for High Performances in Supercapacitors. Int. J. Mol. Sci. 2023 , 24 , 9169. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] [PubMed] DOI

49. Teixeira, L.T.; Medeiros, M.; Liu, L.; Park, V.N.; Valente-Rodriguez, C.; Letichevsky, S.; Fajardo, H.V.; Navarro, R.C.S.; Costa, M.E.H.M.; Botelho, A.B.J. Sustainable Synthesis of CoFe 2 O 4 /Fe 2 O 3 Catalyst for Hydrogen Generation from Sodium Borohydride Hydrolysis. Catalysts 2025 , 15 , 943. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

50. Carbajal, M.; Ghosh, A.; Navarro, R.C.S. Chemical and Materials Engineering . Department, Rio de Janeiro, Brazil, 2025; manuscript in preparation

51. Da Silva Lima, P.N.; Ghosh, A.; Nascimento, A.; Vieira, L.H.S.V.; Costa, R.S.; Ferreira, O.P.; Abreu, G.J.P.; Fujisawa, K.; Silva-Filho, E.C.; De Souza Filho, A.G.; et al. Advanced sustainable carbon material from babassu coconut biomass. J. Phys. Chem. Solids 2023 , 192 , 139–150. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

52. Ghosh, A.; Da Silva Santos, A.M.; Cunha, J.R.; Dasgupta, A.; Fujisawa, K.; Ferreira, O.P.; Lobo, A.O.; Terrones, M.; Terrones, H.; Viana, B.C. CO2 Sensing by in-situ Raman spectroscopy using activated carbon generated from mesocarp of babassu coconut. Vib. Spectrosc. 2018 , 98 , 111–118. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

53. [Roine, A. HSC Chemistry 10 ; Outotec: Pori, Finland, 2018. [Google Scholar

54. Rego, A.S.C.; Navarro, R.C.S.; Brocchi, E.A.; Souza, R.F.M. Kinetic Modeling of the Thermal Decomposition of Zinc Sulfate Through a Global Optimization Method. Metall. Mater. Trans. B 2022 , 53 , 4105–4113. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

55. Rego, A.S.C.; Navarro, R.C.S.; Brocchi, E.A.; Souza, R.F.M. Kinetic study on the thermal decomposition of iron (II) sulfate using a global optimization approach. Mater. Chem. Phys. 2024 , 327 , 129869. [Google Scholar] [CrossRef] [Scilit] DOI

یادداشت ناشر: دیدگاه‌ها، نظرات و داده‌های مطرح‌شده در مقالات، صرفاً متعلق به نویسندگان و مشارکت‌کنندگان آن‌هاست و نه MDPI یا سردبیران. ناشر و سردبیران مسئولیتی در قبال خسارت‌های احتمالی ناشی از ایده‌ها، روش‌ها، دستورالعمل‌ها یا محصولات مطرح‌شده در متن نمی‌پذیرند.

اطلاعات نشر و حقوق استفاده

عنوان اصلی: Alternative Carbon Sources as Foaming Agents for Electric Arc Furnace Steelmaking Slags: A Comprehensive Review. نویسندگان: Medeiros, Gabriel Evangelista, Carbajal Ccoyllo, Mario Dayvid, de Siqueira, Rogério Navarro Correia, Ghosh, Anupama. منتشرشده در *Minerals* در ۲۹ ژانویه ۲۰۲۶. منبع اصلی: مقاله ناشر. مجوز متن و تصاویر مجاز: Creative

Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0). این نسخه ترجمه فارسی و قالب‌بندی سازگار با WordPress است؛ تغییرات شامل ترجمه متن و زیرنویس‌ها، بازآرایی جداول و حفظ تصاویر مجاز است. تصاویر اقتباسیِ فاقد مجوز مستقل بازنشر نشده‌اند.

نسخه آنلاین مقاله: https://landing.steelexperts.ir/2026/10/27/sx-r013-alternative-carbon-eaf-slag-foaming/

SteelExperts.ir