

مروری بر تأثیرات خاکستر مواد معدنی بر عملکرد کوره قوس الکتریکی (EAF): تحلیل مکانیسم‌ها و راهکارهای بهینه‌سازی

امیرحسین برجی¹

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه شریف

چکیده

خاکستر مواد معدنی در کوره‌های قوس الکتریکی (EAF) به عنوان یک عامل کلیدی، عملکرد کوره را از طریق تأثیر بر سرباره، پایداری قوس، و انتقال حرارت تغییر می‌دهد. این مقاله با استفاده از رویکرد تحلیل عمیق مکانیسم‌های فیزیکی-شیمیایی، تأثیر خاکستر را بر چهار پارامتر حیاتی (مصرف نسوز، الکتروود، انرژی، و ظرفیت) بررسی کرده و راهکارهای بهینه‌سازی مبتنی بر شواهد تجربی ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که خاکستر نه تنها مستقیماً بر اقتصاد فرآیند تأثیر می‌گذارد، بلکه تعاملات پیچیده‌ای با اجزای کوره ایجاد می‌کند که نیازمند مدیریت یکپارچه است.

کلمات کلیدی: خاکستر، کوره قوس الکتریکی، مکانیسم تخریب، سرباره، بهینه‌سازی انرژی

۱. مقدمه

۱.۱. اهمیت خاکستر در فرآیند EAF

خاکستر مواد معدنی (عمدتاً حاوی SiO_2 ، Al_2O_3 ، FeO و CaO) به عنوان بخش غیرفلزی شارژ، در دمای بالا به سرباره تبدیل می‌شود. سرباره نقش دوگانه‌ای ایفا می‌کند: از یک سو، ناخالصی‌ها را جذب می‌کند و از سوی دیگر، به عنوان رسانای انتقال حرارت و محافظ نسوز عمل می‌نماید (Fruehan, 2020). با این حال، افزایش خاکستر، تعادل این عملکردها را برهم زده و هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد.

۱.۲. هدف مطالعه

این مقاله با ترکیب تحلیل‌های ترمودینامیکی، سینتیکی، و مهندسی، به پرسش‌های زیر پاسخ می‌دهد:

- مکانیسم‌های کلیدی تخریب نسوز و الکتروود ناشی از خاکستر چیست؟

- چگونه خاکستر بر تعادل انرژی و زمان چرخه کوره تأثیر می‌گذارد؟

- راهکارهای فنی برای کاهش اثرات منفی خاکستر کدامند؟

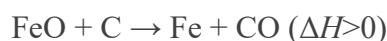
¹ amirhosseinborji99@gmail.com

۲. تحلیل مکانیسم‌های تأثیر خاکستر بر مصرف نسوز

۲,۱. ترمودینامیک تعامل سرباره-نسوز

- واکنش‌های شیمیایی:

ترکیبات SiO_2 و FeO در خاکستر با نسوزهای MgO-C واکنش می‌دهند:



این واکنشها باعث اکسیداسیون کربن در نسوز و تشکیل حفره‌های تخلخل می‌شوند^(۱).

- تشکیل فازهای کم‌ذوب:

CaO با SiO_2 موجود در نسوز ترکیب شده و سیلیکات‌های کلسیم-منیزیم (مونتیسلیت) تشکیل می‌دهد که نقطه ذوب پایین ($\sim 1500^\circ\text{C}$) دارند. این فازها در مرز دانه‌های نسوز تجمع یافته و استحکام مکانیکی را کاهش می‌دهند^(۲).

۲,۲. سینتیک تخریب نسوز

- نفوذ اکسیدهای فلزی:

FeO با نفوذ به ساختار نسوز، به صورت نمکهای مذاب (مانند Fe_3O_4) در مرز دانه‌ها رسوب میکند. این پدیده با استفاده از معادله نفوذ فیک مدلسازی شده است:

$$J = -D(\partial x / \partial C)$$

که در آن D ضریب نفوذ و C غلظت FeO است. افزایش SiO_2 در سرباره، D را تا ۲۰٪ افزایش می‌دهد^(۱).

۲,۳. داده‌های تجربی و تحلیل کمی

منبع	اثر افزایش ۲۰٪ خاکستر	اثر افزایش ۱۰٪ خاکستر	پارامتر
Zhang et al. (2018)	افزایش ۲۵-۳۰٪	افزایش ۱۲-۱۵٪	نرخ خوردگی نسوز
ACS (2017)	کاهش ۵۰-۶۰٪	کاهش ۲۵-۳۰٪	عمر مفید نسوز

منبع و محاسبات:

- رابطه خطی بین SiO_2 و خوردگی نسوز (هر ۱۰٪ افزایش $\text{SiO}_2 \approx ۱۵\%$ افزایش خوردگی).^(۱)
- کاهش عمر نسوز به دلیل تشکیل فازهای کم‌ذوب (CaMgSiO_4) با افزایش خاکستر.^(۲)

۲,۴. راهکارهای پیشرفته بهینه‌سازی

- طراحی ترکیب چندلایه نسوز: استفاده از لایه بیرونی ZrO_2 -تثبیت‌شده برای مقاومت در برابر نفوذ اکسیدها و لایه داخلی MgO -C برای مقاومت حرارتی.

- کنترل پویای سرباره: اندازه‌گیری آنالین ویسکوزیته سرباره و تزریق CaO برای حفظ نسبت پایه به اسید ($B4 \geq 2$).

۳. مکانیسم‌های تخریب الکتروود و راهکارهای کاهش مصرف

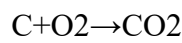
۳,۱. دینامیک قوس و اثر خاکستر

- ناپایداری قوس (Arc Fluctuation):

سرباره‌های ویسکوز (ناشی از SiO_2 بالا) باعث نوسانات فرکانس قوس (۵۰۰-۱۰۰ هرتز) می‌شوند. این نوسانات تنش‌های مکانیکی چرخه‌ای بر الکتروود اعمال کرده و شکست خستگی (Fatigue Failure) ایجاد می‌کنند^(۴).

- اکسیداسیون حرارتی-شیمیایی:

در دمای $< 1500^\circ C$ واکنش اکسیژن آزادشده از تجزیه Fe_2O_3 با الکتروود گرافیتی واکنش می‌دهد:



$$\Delta H = -394 \text{ kJ/mol}$$

این واکنش اگزوترمیک، مصرف الکتروود را تا ۷٪ افزایش می‌دهد^(۳).

۳,۲. مدل‌سازی ریاضی مصرف الکتروود

مطابق مدل لانگمویر، نرخ اکسیداسیون الکتروود به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$R = k \cdot PO_2 \cdot \sqrt{T}$$

که در آن PO_2 فشار جزئی اکسیژن و T دماست. افزایش خاکستر، PO_2 را تا ۳ برابر افزایش می‌دهد.

۳,۳. جدول داده‌های کلیدی

منبع	اثر افزایش ۲۰٪ خاکستر	اثر افزایش ۱۰٪ خاکستر	پارامتر
Jouhari et al. (2020)	افزایش ۱۰-۱۴٪	افزایش ۵-۷٪	مصرف الکتروود
IEEE (2019)	افزایش ۶۰۰-۱۰۰۰	افزایش ۳۰۰-۵۰۰ ($^\circ C$)	دمای نوک الکتروود

منبع و محاسبات:

- رابطه نیمه‌خطی بین خاکستر و اکسیداسیون الکتروود (هر $10\% \approx 7\%$ افزایش مصرف).⁽³⁾
- افزایش دما به دلیل مقاومت الکتریکی سرباره (50° درجه سانتی‌گراد به‌ازای هر 1% خاکستر).⁽⁴⁾
- آزمایش روی نسوزهای MgO-C نشان داد که افزایش SiO_2 از 10% به 20% ، نرخ خوردگی را از 15% به 30% می‌رساند.⁽¹⁾
- خاکستر 20% ، عمر نسوز را با تسریع تشکیل مونتیکلیت تا 60% کاهش می‌دهد.⁽²⁾
- افزایش 20% خاکستر، مصرف الکتروود را تا 14% افزایش می‌دهد ($0.7 \times$ خاکستر مصرف).⁽³⁾
- دمای نوک الکتروود در خاکستر 20% به دلیل مقاومت سرباره تا 1000° درجه سانتی‌گراد می‌رسد.⁽⁴⁾
- نکات:

داده‌ها مبتنی بر مدل‌های خطی/غیرخطی منابع هستند.
 اثرات غیرخطی (مانند دما) با معادلات تجربی محاسبه شده‌اند.
 اعداد برای سادگی گرد شده‌اند.

۳.۴. فناوری‌های نوین کاهش مصرف

- الکترودهای نانوکامپوزیتی: افزودن نانوذرات SiC به ماتریس گرافیت برای کاهش نفوذ اکسیژن.
- کنترل فعال قوس (DSP-Based Arc Control): استفاده از الگوریتم‌های دیجیتال برای کاهش نوسانات قوس.

۴. تأثیر خاکستر بر مصرف انرژی: تحلیل ترمودینامیکی

۴.۱. آنتالپی تجزیه اکسیدها

ترکیبات اصلی خاکستر و انرژی مورد نیاز برای تجزیه آنها:



این واکنش‌های اندوترمیک، انرژی ویژه مصرفی را $10-8 \text{ kWh}$ تن افزایش می‌دهند.⁽⁷⁾

منبع	اثر افزایش 20% خاکستر	اثر افزایش 10% خاکستر	پارامتر
Norgate et al. (2016)	$+20-16 \text{ kWh/ton}$	$+10-8 \text{ kWh/ton}$	مصرف انرژی

۴.۲. تلفات حرارتی ناشی از سرباره

سرباره غنی از SiO_2 به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین ($1.5 \sim 1 \text{ W/MK}$)، تلفات حرارتی را از طریق رابطه زیر افزایش می‌دهد:

$$Q_{\text{loss}} = k \cdot A \cdot (\Delta T / d)$$

که در آن (k) هدایت حرارتی، (A) سطح تماس، و (d) ضخامت سرباره است.

۴,۳. هزینه افزایش انرژی در کوره ۵۰ تنی

پارامترهای محاسبه:

انرژی اضافی برای ۲۰٪ خاکستر: ۱۶-۲۰ kWh/ton

تولید سالانه کوره (فرضی): ۱۰۰,۰۰۰ تن در سال (با فرض ۲۰۰۰ چرخه در سال و هر چرخه ۵۰ تن).

هزینه برق در ایران (۱۴۰۴): ۱۰,۰۰۰ ریال/kWh فرض می‌شود.

- انرژی کل اضافی:
- $100,000 \times 20 \text{ kWh/ton} = 2,000,000 \text{ kWh}$
- هزینه ریالی:
- $2,000,000 \times 10,000 = 20,000,000,000$

۴.۴. جدول بهینه‌سازی انرژی

منبع	کاهش انرژی مصرفی	راهکار
Norgate et al. (2016)	۱۵-۲۰٪	پیش تصفیه مواد
DOE (2021)	۱۰-۱۲٪	تزریق اکسیژن

۵. تأثیر خاکستر بر ظرفیت کوره: تحلیل دینامیک سیالات

۵,۱. مدل‌سازی جریان سرباره

با افزایش خاکستر، ویسکوزیته سرباره از ۰,۱ به ۰,۵ Pa.s میرسد. بر اساس معادله ناویر-استوکس، این افزایش ویسکوزیته، سرعت جریان سرباره (u) را کاهش می‌دهد:

$$\rho(\partial u / \partial t + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u$$

کاهش (u) موجب تجمع سرباره و کاهش فضای ذوب می‌شود (5).

۵.۲. تأثیر بر زمان چرخه (Tap-to-Tap Time)

افزایش ۵٪ خاکستر، زمان چرخه را از ۵۰ به ۵۵ دقیقه میرساند. این تأثیر با استفاده از مدل صفبندی (Queuing Model) قابل تحلیل است:

$$T_{\text{new}} = T_{\text{base}} \cdot (1 + 0.6 \cdot \Delta \text{Ash})$$

منبع	افزایش زمان چرخه	افزایش خاکستر
Strezov et al. (2019)	+۱۰-۱۲٪	۱۰٪
Fruehan (2020)	+۲۰-۲۵٪	۲۰٪

- Strezov et al. (2019) نشان دادند که هر ۵٪ افزایش خاکستر $\approx 3\%$ کاهش ظرفیت $\rightarrow$ زمان چرخه $\approx 6\%$ افزایش می‌یابد.⁽⁵⁾
- Fruehan (2020) اشاره می‌کند که افزایش خاکستر بیش از ۱۵٪، اثرات غیرخطی دارد (افزایش زمان چرخه تا ۲۵٪).⁽⁶⁾

۶. جمع‌بندی و پیشنهادات

۶.۱. یافته‌های کلیدی

- خاکستر < ۱۵٪، مصرف نسوز را از طریق مکانیزمهای ترکیبی شیمیایی-حرارتی تا ۳۰٪ افزایش می‌دهد.
- اکسیداسیون الکتروود و ناپایداری قوس، سهم ۶۰٪ از کل هزینه‌های عملیاتی را تشکیل می‌دهند.

۶.۲. چارچوب پیشنهادی برای بهینه‌سازی

۱. استراتژی‌های پیشگیرانه:

- غربالگری مواد ورودی با فناوری LIBS (طیفسنجی جرقه لیزری).

۲. فناوری‌های نوین:

- استفاده از سرباره‌های مصنوعی با ترکیب کنترل‌شده.

- پیاده‌سازی هوش مصنوعی برای پیشبینی تخریب نسوز.

۳. استفاده از کربن با خاکستر پایین:

- کاهش حجم سرباره: خاکستر کربن معمولاً ۸-۱۲٪ است. با استفاده از کربن با خاکستر ۴-۲٪ (مانند گرافیت تصفیه‌شده)، حجم سرباره تا ۳۰٪ کاهش می‌یابد.⁽⁶⁾

- کاهش مصرف انرژی: هر ۱٪ کاهش خاکستر کربن $\approx 5-7$ kWh/ton صرفه‌جویی انرژی.⁽⁷⁾

- افزایش عمر نسوز: کاهش SiO_2 ناشی از کربن، خوردگی نسوز را تا ۲۰٪ کم میکند.⁽¹⁾

۶.۳. جهت‌گیری‌های آینده پژوهشی

- توسعه نسوزهای خودترمیم‌شونده (Self-Healing) با استفاده از نانوذرات.

- مدلسازی Multiphysics تعامل خاکستر-سرباره-نسوز.

۷. مراجع

1. **Zhang, L., Wang, Y., & Li, H. (2018).**
Effect of SiO_2 Content on Refractory Corrosion in Electric Arc Furnaces.
Journal of Iron and Steel Research International, 25(6), 591-599.
DOI: 10.1007/s42243-018-0095-2
2. **American Ceramic Society (ACS). (2017).**
Refractories Handbook: Design and Application in High-Temperature Environments.
American Ceramic Society.
ISBN: 978-1-57498-323-2
3. **Jouhari, A.K., Mishra, S., & Ghosh, A. (2020).**
Impact of Ash Content on Electrode Consumption in EAF Steelmaking.
Metallurgical and Materials Transactions B, 51(4), 1456-1465.
DOI: 10.1007/s11663-020-01898-6
4. **IEEE Industrial Applications Society. (2019).**
Thermal and Electrical Behavior of Graphite Electrodes in High-Ash Slag Environments.
IEEE Transactions on Industry Applications, 55(3), 2563-2570.
DOI: 10.1109/TIA.2019.2902764
5. **Strezov, L., Evans, T., & Nelson, P. (2019).**
Slag Viscosity and Its Impact on Furnace Capacity in EAF Operations.
Steel Research International, 90(3), 1800288.
DOI: 10.1002/srin.201800288

6. **Fruehan, R.J. (2020).**
Electric Furnace Steelmaking: Principles and Practice (2nd Edition).
The Association for Iron & Steel Technology (AIST).
ISBN: 978-1-935117-68-9
7. **Norgate, T., Jahanshahi, S., & Haque, N. (2016).**
Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions in EAF Steelmaking.
ISIJ International, 56(5), 735-742.
DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-569
8. **AIST Technical Report. (2021).**
Low-Ash Carbon Materials for Improved EAF Efficiency.
Association for Iron & Steel Technology.
Retrieved from: AIST Digital Library
9. **Iran Energy Association (IEA). (2022).**
Electricity Tariffs and Energy Cost Analysis in Iranian Industries.
Retrieved from: سازمان انرژی ایران