



iMat 2022



بررسی تاثیر پارامترهای کنترلی (دما و افزودنی‌ها) بر بازدهی فرایند تولید آهن اسفنجی به روش احیا مستقیم در کوره تونلی با استفاده از نرم‌افزار متلب

مریم کمایی^۱، محمدرضا شریفیان^۲، امید علی باقری^۳

Sharifian163@yahoo.com.

چکیده

امروزه با رشد روزافزون نیاز بشری به مواد اولیه، کارخانجات نوردی اقدام به بکارگیری روشی مقرون به صرفه برای تهیه پیش‌مواد بکار رفته می‌نمایند. براین اساس تولید آهن اسفنجی به روش کوره تونلی با توجه به فراهم‌آوری طیف وسیعی از مشخصات مطلوب همچون بکارگیری مواد اولیه ارزان قیمت، عدم وابستگی فرایند به نوع مواد اولیه، وسعت محدوده‌ی متغیرهای تاثیرگذار همچون دما و زمان فرایند و نوع بار ورودی، مورد توجه تولیدکنندگان این عرصه قرار گرفته است. در این پژوهش نمونه‌ها در مقیاس صنعتی در کوره تونلی بکار گرفته شده و بعد از عملیات تولید در شرایط دمایی و آتمسفر مناسب نیز دیو شدند و بعد از آن نمونه برداری از ترکیبات برای انجام آزمون‌های شیمی تر برای بررسی عوامل اثرگذار بر کیفیت محصول نهایی انجام شد. براساس نتایج بدست آمده بدلیل ماهیت جامد - جامد، واکنش احیا با استفاده از افزودنی‌های مناسب همچون کربنات‌های قلیایی بهبود میابد همچنین بکارگیری محدوده دمایی مناسب بر کیفیت محصول نهایی اثرگذار بوده و بهبود فرایند را فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: آهن اسفنجی، کوره تونلی، احیا مستقیم، کربنات‌های قلیایی.

^۲ کارشناسی ارشد مهندسی مواد، مدیر تحقیق و توسعه شرکت ایران غلتک
^۳ و ^۱ کارشناس ارشد مهندسی مواد، کارشناس تحقیق و توسعه شرکت ایران غلتک



iMat 2022



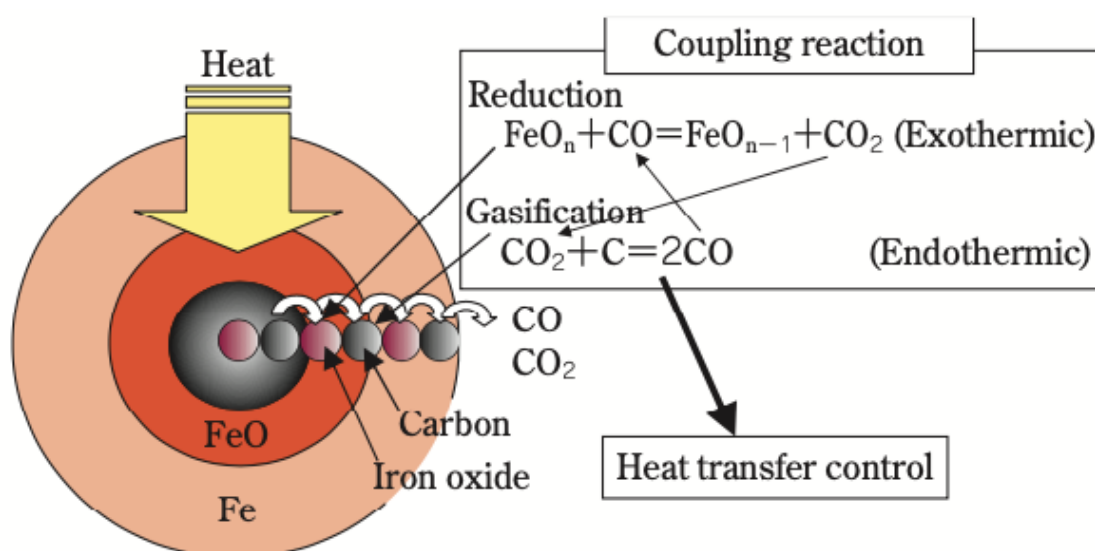
۱- مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون جوامع انسانی به ترکیبات حاوی آهن، بکارگیری روشی ارزان با هدف تولید محصول میانی از مواد اولیه سنگ معدن آهن مزایای فراوانی به همراه دارد. چراکه با افزایش هزینه قراضه و البته حضور ناخالصی‌های نامطلوب در آن بکارگیری ترکیب آهن اسفنجی بعنوان ترکیبی مطلوب مطرح می‌شود. از سوی دیگر امکان بکارگیری زغال سنگ کک نشو (بعنوان ترکیبی که در ایران یافت می‌شود) و نرمه سنگ معدن آهن/ ضایعات گندله/ پوسته‌های اکسیدی و عدم وابستگی به گندله بعنوان پیش‌ماده و بتبع آن عدم وابستگی به فرایندهای مربوط به ترکیب پیش‌سازها و همچنین هزینه گزاری اولیه پایین‌تر در مقایسه با سایر روش‌های تولیدی از مزیت‌های تولید آهن اسفنجی به روش احیا مستقیم در کوره تونلی *direct reduction iron in tunnel kilns* است. در این بین با توجه به مدت زمان نسبتاً طولانی فرایند و هزینه‌های سرشار در ارتباط با بازده انرژی، تاکنون پژوهش‌هایی انجام شده است که از طریق این پارامترها بتوان با افزایش بازده فرایند تولید آهن اسفنجی به روش کوره تونلی به نتایج بهتری دست یافت. [1,4]

با توجه به ماهیت جامد - جامد فرایند یادشده (چراکه در دمای پایین‌تر از نقطه ذوب واکنش احیا انجام می‌شود). مطالعات زیادی در مورد مکانیزم احیا در روش کوره تونلی انجام نشده است و براین اساس مطالعات نشان دهنده اثرگذاری میزان گازی شدن کربن و البته نفوذ آن (مطابق با شکل ۱) در مراحل مختلف احیا بعنوان دو پارامتر تعیین‌کننده و کنترل‌کننده فرایند است. از دیگر پارامترهای اثرگذار در این مطالعات به تاثیر افزایش سطح به دلیل ماهیت واکنش می‌توان اشاره کرد که محاسبات نشان‌دهنده بهبود احیا در شرایط بکارگیری بستر چندلایه احیایی است. البته موضوع مهم در این شرایط تعداد لایه‌های بستر احیایی مورد بررسی با در نظر گرفتن سایر پارامترهای کنترلی همچون دما و زمان و نسبت ماده احیا کننده به ترکیب حاوی آهن است. از دیگر عوامل تاثیرگذار می‌توان به دانه‌بندی ترکیبات مشارکت کننده در فرایند احیا اشاره کرد. کلیه موارد یادشده در مقدار اپتیمم در هم‌نشینی با سایر پارامترها موثر هستند و همچون سایر پارامترهای آزمایشگاهی موثر بر فرایند همواره رابطه خطی و صعودی بطور مثال بین افزایش در ضخامت لایه حاوی ترکیبات آهن و بهبود احیا وجود ندارد. با این همه مطالعات زیادی در مورد احیا به روش کوره تونلی بطور خاص انجام نشده است و بررسی‌ها نشان دهنده اهمیت بررسی دقیق‌تر موضوع با در نظر گرفتن پارامترهای کنترلی بیشتر است. بطور مثال از دیگر موارد کنترل‌کننده می‌توان به ترکیب شیمیایی ظروف نگهدارنده، ترکیبات متنوع از بار ورودی متشکل از کنسانتره و زغال، نحوه بارگیری و کاتالیزورهای فرایند حاوی عناصر قلیایی اشاره کرد که جهت استحصال نتیجه مطلوب ضروری است از ترکیبات متناسب و در هم‌نشینی با دیگر پارامترهای اثرگذار بر فرایند بهره گرفت. نحوه شارژ بستر احیا و نوع ترکیب زغال بکار رفته نیز از مواردی است که توسط محققان دیگر مورد مطالعه قرار گرفته است. براساس آنچه گفته شد می‌توان به طیف وسیعی از پارامترهای موثر بر فرایند احیاء به روش کوره تونلی اشاره کرد که در پژوهش



انجام شده به بررسی نقش برخی از آن‌ها همچون تاثیر دما و اجزاء کربناتی قلیایی در تقابل با یکدیگر پارامترها پرداخته شده است. [2,6]



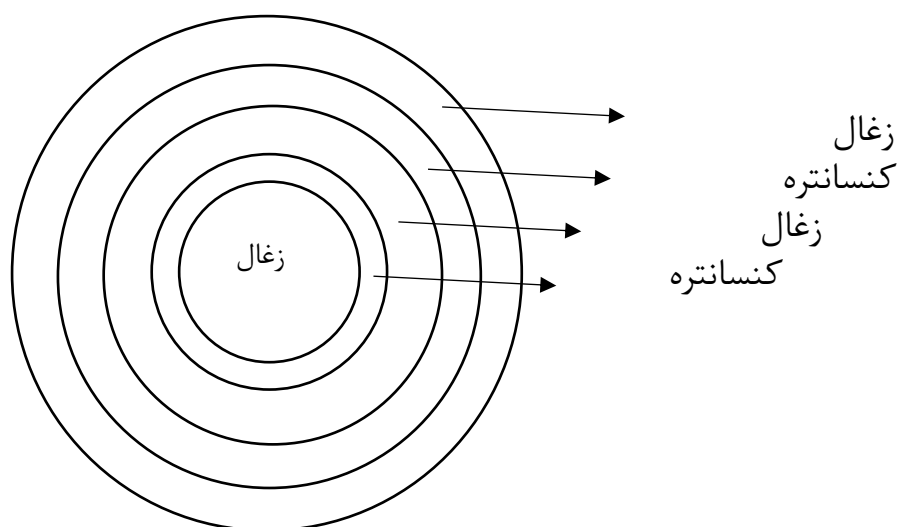
شکل ۱- مکانیزم احیاء جامد - جامد. [5]

۲- مواد و روش تحقیق

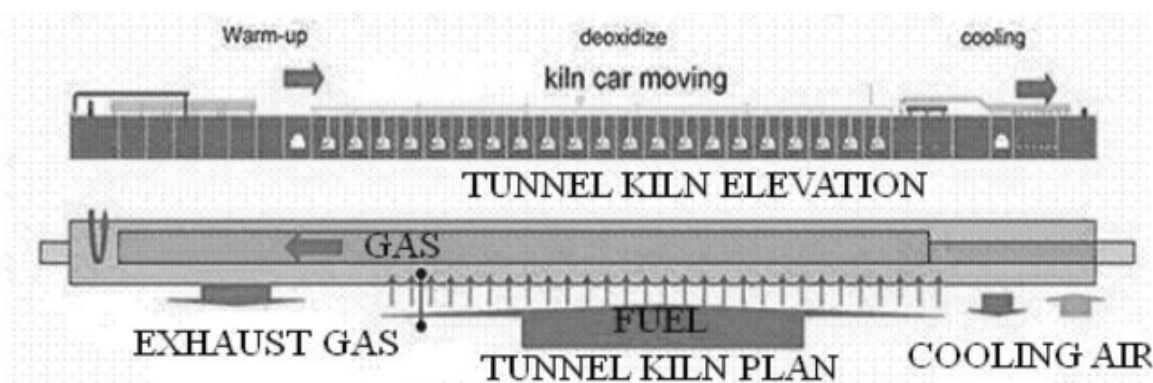
در این پژوهش ابتدا پیش مواد مطابق با آنالیز جداول ۱ و ۲ مورد ارزیابی قرار گرفتند. پیش مواد بکاررفته در محدوده قطر ۱۸ سانتی‌متر تا ۱۳ سانتی‌متر و ۹ سانتی‌متر تا ۴ سانتی‌متر در ظروف شاموت و در مقیاس صنعتی بارگیری شدند و در ادامه برای بررسی سرعت فرایند احیا نمونه‌ها به صورت لایه‌های ساندویچی مطابق با شکل ۲ بارگیری شدند و در نهایت بر روی بستر متحرک کوره تونلی مطابق با ۳ و ۴ قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی بکار رفته در پیش مواد حاوی آهن، ترکیبی متشکل از پوسته اکسیدی و کنسانتره است. در مورد ترکیب حاوی عامل احیاکننده هم زغال به همراه درصدی از خاکستر و ۳۰٪ کربنات‌های قلیایی بعنوان افزودنی‌ها در دسته‌ای از نمونه‌ها بکار رفته‌است. در این مطالعه جهت بررسی اثرگذاری افزودن زغال به ترکیب احیایی حاوی آهن مقدار ۴٪ زغال نیز افزوده شد. در این روند از پارامترهای اثرگذار بر کوره تونلی به فاصله منطقه جهنم می‌توان اشاره کرد. همچنین مدت زمان قرارگیری نمونه‌ها در این منطقه که در این مطالعه از ثوابت و به مقدار ۱۶ ساعت در نظر گرفته شده‌است و البته دمای منطقه جهنم از موارد اثرگذار بر کیفیت محصول تولیدی است. در این بررسی دمای احیایی را در سه دمای ۱۲۰۰ و ۱۱۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفتیم. از طرفی شرایط دمایی کوره بر تعداد سیکل بکارگیری ظروف نگهدارنده و دیگر اجزا آن موثر است.



iMat 2022



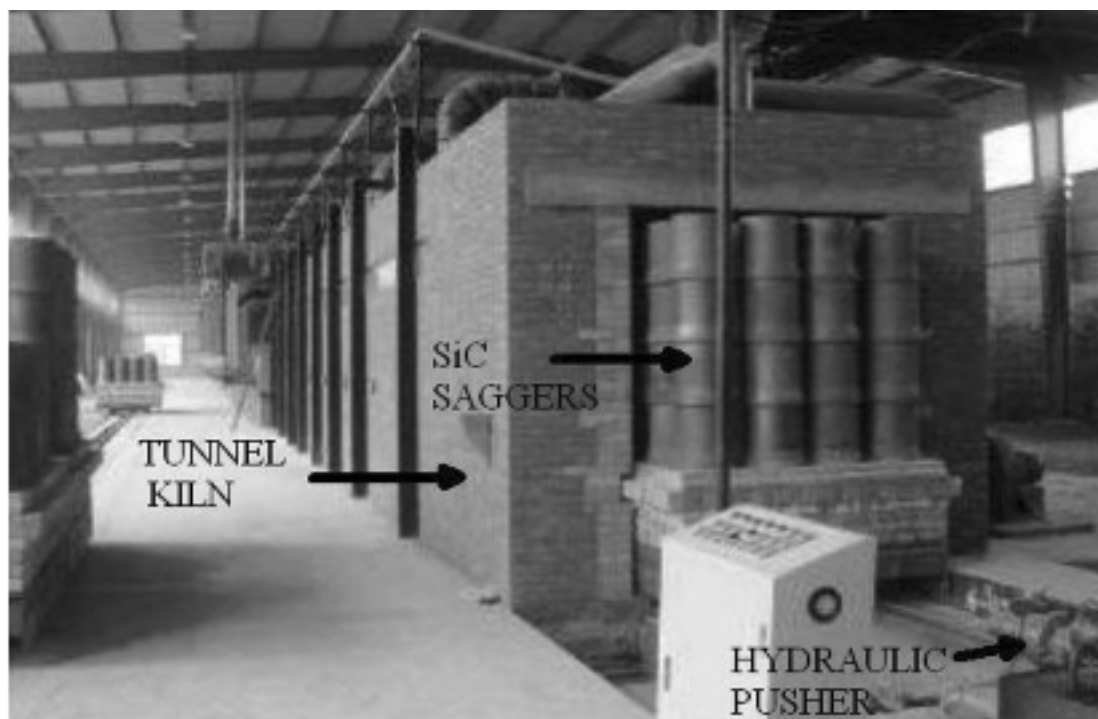
شکل ۲- نحوه بارگیری زغال و کنسانتره.



شکل ۳- شماتیک خط تولید آهن اسفنجی به روش کوره تونلی [7]



iMat 2022



شکل ۴- بارگیری ظروف در خط تولید آهن اسفنجی به روش کوره تونلی. [7]

در این فرایند احیایی مواد به شکل دو استوانه توخالی در درون یگدیگر بارگیری می‌شوند که در حدفصل لایه‌های حاوی ترکیبات اکسید آهنی، زغال قرار می‌گیرد. برای حرکت لوله‌ها در داخل کوره از یک کشنده استفاده می‌شود و برای استفاده از آن لازم است در زیر واگن‌ها ریل تعبیه شده و واگن‌های حاوی ظروف از طریق کشنده در سرتاسر طول کوره با سرعت مناسبی حرکت کنند.

همچنین جهت تامین دمای کوره از مشعل‌های گازسوز در تعداد متناسب با طول کوره استفاده شده‌است. با توجه به شرایط دمایی ضروری است نسوزکاری کوره به خوبی انجام شود. برای بررسی روند تولید از طریق آزمون‌های مربوط به شیمی تر مقدار آهن کلی و آهن فلزی اندازه‌گیری می‌شود. همچنین برای بررسی رفتار زغال از طریق آزمون زغال نسبت به بررسی فعالیت و بازده زغال اقدام می‌گردد.

در نهایت با توجه به طیف وسیع پارامترهای اثرگذار، در این پژوهش به بررسی تاثیر دما و مواد افزودنی به زغال و کنسانتره اقدام نمودیم و نتایج را براساس آزمون‌های شیمی تر براساس مقدار Fe total و Fe metal مطابق با آنچه در ادامه آمده است ارائه دادیم. همچنین رابطه ۱ وابستگی مقدار Fe metal از دما و ترکیبات افزودنی را نشان می‌دهد.

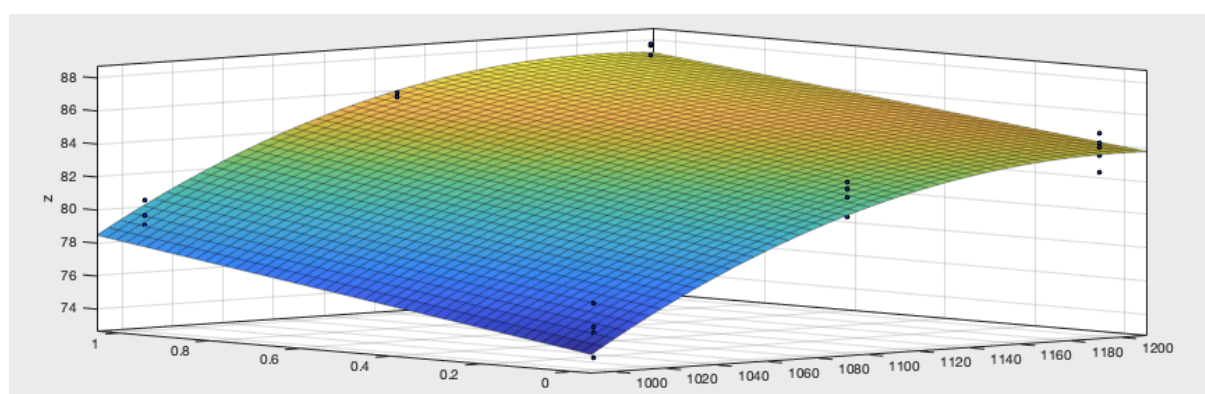

iMat 2022


مطابق با رابطه ۱ مقدار x مرتبط با مقدار y برابر با مقدار مشارکت ترکیبات افزودنی است به این صورت که مقدار ۰ نمایانگر عدم مشارکت ترکیبات افزودنی و مقدار ۱ نشان دهنده افزودن کربنات کلسیم به زغال به مقدار ۳۰٪ وزنی زغال است و مقدار ۲ بیانگر مشارکت هر دو ترکیب افزودنی کلسیم کربنات ۳۰٪ وزن زغال و البته افزوده شدن ۴٪ وزنی زغال به کنسانتره می باشد و در نهایت مقدار z نمایش دهنده Fe metal است که مطابق با شکل ۵ رویه مرتبط با فرمول وابستگی این مقادیر قابل ملاحظه است.

رابطه (۱):

$$z = C_1 + C_2 * x + C_3 * y + C_4 * x^2 + C_5 * x * y$$

$$C_1 = 83.64, C_2 = 3.538, C_3 = 1.865, C_4 = -1.593, C_5 = -0.2112$$



شکل ۵- رویه مربوط به فرمول وابستگی دما از پارامترهای افزودنی و زغال ترکیبی.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آهک، براده آهن، پوسته سبک و پوسته سنگین

ترکیب شیمیایی	درصد ترکیب شیمیایی اجزا تشکیل دهنده آهک	درصد ترکیب شیمیایی اجزا تشکیل دهنده براده آهن	درصد ترکیب شیمیایی اجزا تشکیل دهنده پوسته سبک	درصد ترکیب شیمیایی اجزا تشکیل دهنده پوسته سنگین
SiO ₂	0.11%	2.24%	<0.1%	1.69%
Al ₂ O ₃	0.097%	0.44%	0.14%	1.04%
Fe total	-	67.02%	74.62%	62.45%
FeO	-	18.22%	72.58%	47.47%
Fe ₂ O ₃	0.45%	-	-	-
Fe ₃ O ₄	-	-	-	-



MnO	0.003%	0.015%	0.37%	0.35%
TiO ₂	0.006%	0.09%	0.01%	0.06%
CaO	54.96%	0.57%	1.12%	2.63%
MgO	0.83%	0.32%	<0.1%	0.7%
Na ₂ O	0.043%	0.1%	0.046%	0.13%
K ₂ O	0.032%	0.066%	0.042%	0.11%
P ₂ O ₅	0.007%	0.025%	0.068%	0.065%
SO ₃	0.1%	0.55%	<0.1%	0.16%

جدول ۲- ترکیب شیمیایی زغال و خاکستر (=آنالیز زغال بعد از بکارگیری آن در فرایند احیا).

ترکیب شیمیایی	درصد ترکیب شیمیایی اجزا تشکیل دهنده زغال نوع یک	درصد ترکیب شیمیایی اجزا تشکیل دهنده زغال نوع دو	درصد ترکیب شیمیایی اجزا تشکیل دهنده خاکستر
Fixed carbon	38.98%	61.08%	29.02%
sulfur	0.46%	2.08%	1.06%
Volatile matter	25.84%	12.88%	3.6%
moisture	2.86%	0.28%	<0.1%
ash	34.63%	23.85%	66.23%
Thermal quality	4671Kcal/Kg	6205/6Kcal/Kg	2809.8Kcal/Kg

۳- نتایج و بحث

در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های بدست آمده از بررسی عملی و صنعتی در کوره تولید آهن اسفنجی به روش تونلی اقدام به بررسی طیفی از پارامترها همچون دما، مقدار و نوع افزودنی‌ها بر مقدار نهایی آهن فلزی پرداختیم بر این اساس نتایج با تقریب خوبی منطبق با رابطه شماره ۱ است. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر مقدار وزنی زغال بکار رفته ۴٪ وزنی مجموع وزن ترکیبات حاوی آهن است و مدت زمان احیا ۱۶ ساعت در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر بارگیری در ظروف نگهدارنده به قطر داخلی ۲۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر به روش



ساندویچ دو لایه انجام شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده از رابطه ریاضی حاصل از ۳۰ داده عملی از طریق مدل سازی در نرم افزار متلب می توان تاثیر پارامتر دما و افزودنی ها در تغییر مقدار احیا را بدست آورد. نکته حایز اهمیت در این مورد آن است که تاثیر افزودنی ها در محدوده دمایی ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ سانتی گراد مشهود است و بعنوان کاتالیزور عمل کرده و کمبود دمایی را جبران می کند اما در دماهای بالاتر تاثیر مقادیر افزودنی اثر کمتری در بهبود شرایط احیایی دارد.

۴- نتیجه گیری

بطور کلی تاثیر پارامتر دما از وزن بیشتری در مقایسه با افزودن ترکیبات حاوی فلزات قلیایی برخوردار است و از طرفی تاثیر تغییر محدوده دمایی یادشده در بازه ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد در حضور کاتالیزور تاثیر گذاری کمتری بر بهبود نتایج مربوط به آهن فلزی در مقایسه با محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد در حضور کاتالیزور را نشان می دهد.

۵- مراجع

1. S. M. A. Haghi, A. Zabett, M. Mirjalili, 'Mechanism of reduction of hematite- magnetite hollow cylindrical pellet by graphite- calcium carbonate mixture', Metallurgical and Materials Transactions B.
2. Srinibash Mishra, 'Review on Reduction Kinetics of Iron Ore-Coal Composite Pellet in Alternative and Sustainable Ironmaking' Journal of Sustainable Metallurgy 6(12)
3. M I Martín, F A López, J M Torralba, 'Production of sponge iron powder by reduction of rolling mill scale' Ironmaking & Steelmaking, Processes, Products and Applications. Volume 39, 2012 - Issue 3
4. S. MOOKHERJEE, A. M UKHERJEE, B. K. DHINDA W and H. S. RAY, 'Reduction of iron ore fines with coal fines by statistical design of experiment' Materials Science(2013)
5. Haruyasu MICHISHITA * 1, Hidetoshi TANAKA * 2, 'Prospects for coal based direct reduction process' KOBELCO Technology Review 29(1)
6. José Carlos Chere11 . Eduarda Martinho1, 'The process of producing sponge iron in rotary furnaces from a mechanical and chemical point of view.' International Research Science and Development Journal Vol. 1, No. 1, 2020, pp. 60-71.
7. S. C. Khattoi, G. G. Roy, 'Reduction Efficiency of Iron Ore-Coal Composite Pellets in Tunnel Kiln For Sponge Iron Production' Transactions of the Indian Institute of Metals, 2015, 68, 5, 683-692.