METALLURGICAL ENGINEERING
The Journal of Iranian Metallurgical and Materials Engineering Society

Winter 2026, Volume 28, Nummber 4

Recovery of Zinc and Iron from Electric Arc Furnace Dust by Magnetic Separation and Leaching

Mohammad Saleh Bakhtiari[1], *Sadegh Firoozi[2]

1- MSc, Materials Science and Metallurgical Engineering (Extractive Metallurgy), Amirkabir University of Technology
2- Associate Professor, Faculty of Materials Science and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology

Citation: Bakhtiari M.S, Firoozi S. Recovery of Zinc and Iron from Electric Arc Furnace Dust by Magnetic Separation and Leaching, Metallurgical Engineering, 2026: 28(4): 246-255 https://doi.org/10.22076/me.2026.743588

doi: https://doi.org/10.22076/me.2026.743588

ABSTRACT

In this research, the recovery of iron and zinc from electric arc furnace dust by magnetic separation and residue leaching was investigated. The main objective was to recover iron by magnetic separation and then zinc from the non-magnetic residue. First, water leaching was performed to remove alkali metals, and then, at a magnetic field intensity of 4000 gauss, iron was recovered in the concentrate with a recovery of 61.7% and a grade of 40.3%. Subsequently, zinc leaching from the residue with a mixture of sulfuric acid and oxalic acid was optimized. Using the central composite design method, the optimal conditions were determined to be 1.1 M sulfuric acid, 0.2 M oxalic acid, and a temperature of 75 °C, at which a zinc recovery of 90.2% was obtained. The proposed method, with the potential for industrial-scale implementation, provides acceptable recovery for both metals with optimal solvent consumption.

Keywords: *Magnetic separation, zinc leaching, sulfuric acid, oxalic acid.*

Received: May 6, 2025 | Accepted: November 14, 2025

Corresponding Author:
Sadegh Firoozi, PhD
Address: Faculty of Materials Science and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology
Tel: +98 (21) 64542991
E-mail: s.firoozi@aut.ac.ir

بازیابی روی و آهن از غبار کوره قوس الکتریکی به روش جدایش مغناطیسی و لیچینگ

محمدصالح بختیاری[۱]، *صادق فیروزی[۲]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، گرایش استخراج فلزات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این تحقیق، بازیابی آهن و روی از غبار کوره قوس الکتریکی با روش جدایش مغناطیسی و لیچینگ پسماند بررسی شد. هدف اصلی، بازیابی آهن توسط جدایش مغناطیسی و سپس روی از پسماند غیرمغناطیسی بود. ابتدا لیچینگ با آب برای حذف فلزات قلیایی صورت گرفت و سپس در شدت میدان ۴۰۰۰ گوس، آهن با بازدهی ۶۱/۷٪ و عیار ۴۰/۳٪ در کنسانتره بازیابی گردید. در ادامه، لیچینگ روی از پسماند با مخلوط سولفوریک اسید و اگزالیک اسید بهینه‌سازی شد. با روش طراحی کامپوزیت مرکزی، شرایط بهینه در غلظت ۱/۱ مولار سولفوریک اسید، ۰/۲ مولار اگزالیک اسید و دمای ۷۵ درجه سلسیوس تعیین شد که بازدهی روی ۹۰/۲٪ به‌دست آمد. روش پیشنهادی با قابلیت اجرا در مقیاس صنعتی بازدهی قابل قبول برای هر دو فلز را با مصرف بهینه حلال فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: جدایش مغناطیسی، لیچینگ روی، سولفوریک اسید، اگزالیک اسید.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶ | پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۳

مقدمه

با پیشرفت صنعت فولادسازی و افزایش تولید جهانی آن به بیش از ۵۲۳ میلیون تن در سال ۲۰۱۹ با روش کوره قوس الکتریکی [۱]، مدیریت پسماندهای جامد نظیر غبار کوره قوس الکتریکی به یکی از چالش‌های اصلی زیست‌محیطی و اقتصادی تبدیل شده است. این غبار، که حدود ۱۵ تا ۲۰ کیلوگرم به ازای هر تن فولاد تولید می‌شود [۲]، حاوی فلزات سنگین مانند آهن، روی، سرب، منگنز و کادمیوم است و از یک سو تهدیدی برای آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به شمار می‌رود و از سوی دیگر به دلیل وجود فلزات ارزشمند، پتانسیل بازیابی اقتصادی دارد. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که جدایش مغناطیسی می‌تواند آهن را با بازیابی مناسب جدا کند [۳، ۴]، در حالی که روش‌های هیدرومتالورژی اسیدی برای انحلال روی از فاز مقاوم فریت روی کارایی محدودی دارند و نیاز به احیاکننده برای شکستن ساختار فریت روی احساس می‌شود [۵، ۶، ۷].

هدف این تحقیق، در مرحله اول بررسی میزان بازیابی آهن توسط جدایشگر مغناطیسی تر با تغییر شدت میدان مغناطیسی، و بازیابی روی در فاز باطله جدایش مغناطیسی است. در مرحله دوم، بروش لیچینگ احیایی در محیط سولفوریک اسید، تمرکز بر انحلال حداکثری روی است که با تغییر متغیرهای غلظت سولفوریک اسید، احیا کننده (اگزالیک اسید) و دما مورد بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت سینتیک انحلال روی از فاز غیرمغناطیسی برای شناخت مرحله کنترل‌کننده انحلال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

* نویسنده مسئول:
دکتر صادق فیروزی
نشانی: دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
تلفن: ۶۴۵۴۲۹۹۱ (۲۱) ۹۸+
پست الکترونیکی: s.firoozi@aut.ac.ir

روش پژوهش

مواد و ابزار بکار رفته

ماده ورودی در این تحقیق، غبار کوره قوس الکتریکی دریافتی از دو کارخانه فولادسازی جهان فولاد سیرجان و مجتمع صنعتی چادرملو است. این غبار در فرایند فولادسازی کوره قوس الکتریکی که شارژ آن عمدتا آهن اسفنجی است تولید شده است. سایر مواد مورد استفاده شامل سولفوریک اسید (دکتر مجللی)، اگزالیک اسید (نوترون) هر دو با خلوص آزمایشگاهی و آب دیونیزه بودند. ابزار بکار رفته در این تحقیق: هیتر استیرر، همزن مکانیکی، دستگاه جدایش مغناطیسی بام مکس، لوله دیویس[1]، دستگاه فیلتر خلأ، آون، پی‌اچ متر، و ظروف استاندارد آزمایشگاه شیمی است.

پیش عملیات

بعد از یکنواخت کردن غبار با هاون، لیچینگ اولیه با آب برای حذف عناصر قلیایی سدیم و پتاسیم انجام شد. در این مرحله، پس از آزمون و خطا، نسبت جامد به مایع ۰/۱، دمای ۷۵ درجه سلسیوس و زمان ۲ ساعت و برای حذف ناخالصی‌ها درنظر گرفته شد. در ادامه غبار لیچ شده توسط آب، در دمای ۹۰ درجه سلسیوس در آون به مدت ۲ ساعت خشک شد و تقلیل وزن غبار ملاحظه شد.

جدایش مغناطیسی

در ابتدا برای بررسی اثر شدت میدان مغناطیسی بر عیار آهن و راندمان جدایش آهن و روی، از لوله دیویس استفاده شد و در آن نمونه غبار دریافتی از کارخانه فولاد سیرجان به مقدار ۴۰ گرم در چهار شدت میدان مغناطیسی ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ گاوس در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران مورد آزمون قرار گرفت و نسبت وزنی کنسانتره به خوراک تحت عنوان بازدهی محاسبه شد. در نامگذاری نمونه‌ها در آزمون دیویس ابتدا شدت میدان آورده شده است و در ادامه از کد C برای بخش کنسانتره مغناطیسی و T برای باطله غیرمغناطیسی استفاده شده است.

در ادامه حدود یک کیلوگرم از غبار آب‌شویی شده کارخانه جهان فولاد سیرجان و سه کیلوگرم غبار آبشویی کارخانه چادرملو توسط دستگاه جدایش مغناطیسی تر بام مکس[2] فراوری شد. مدت خوراک‌دهی ۲ دقیقه، ۱۰ دقیقه هم خوردن با نسبت جامد به مایع ۰/۳، دبی آب شست‌وشو ۱۸ لیتر بر دقیقه توسط جت‌های شست‌وشو، دبی آب خوراک ۴ لیتر بر دقیقه و شدت میدان ۴۰۰۰ گاوس تنظیم شد. پس از انجام جدایش مغناطیسی، برای حذف بیشتر عناصر قلیایی باقی مانده، و کاهش مصرف اسید در مرحله لیچینگ، شستشوی مجدد با آب بر بخش غیرمغناطیسی صورت گرفت تا pH محلول حاصله به شرایط تقریبا خنثی (عدد ۸) تقلیل یابد.

آزمایش‌های لیچینگ

به کمک آزمون‌های اولیه، اگزالیک اسید به عنوان احیا کننده موثر برای بهبود انحلال روی از فازهای فریت روی انتخاب شد. همچین با انجام آزمون‌های غربال گری اولیه متغیرهای اصلی یعنی غلظت سولفوریک اسید، اگزالیک اسید و دمای لیچینگ انتخاب شد. سپس به کمک نرم‌افزار Design Expert بروش طراحی مکعب مرکزی (CCD) تعداد ۱۷ آزمون تعریف شد تا مقدار بیشینه انحلال روی و کمینه انحلال آهن مدل‌سازی شود. این آزمون‌ها در دماهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درجه سلسیوس و غلظت‌های ۰، ۰/۱ و ۰/۲ مولار اگزالیک اسید و ۰، ۰/۳، ۰/۷ و ۱/۱ مولار سولفوریک اسید تعریف شدند.

روش‌های آنالیز

در این تحقیق از آنالیز XRD مدل Philips 1730PW و نرم‌افزار Design Expert برای شناسایی فازهای موجود در غبار استفاده شد، برای شنایی مقدار و نوع عناصر ترکیب اولیه غبار از آنالیز XRF مدل Agilent 735 استفاده شد. برای شناسایی ترکیب محلول بعد از لیچینگ و ماده جامد در مراحل انجام تحقیق از آنالیز ICP OES مدل Varian Vista Pro برای محلول و برای ماده جامد بعد از انحلال آن به روش ذوب سدیم پراکسید از دستگاه مدل Agilent 5800 استفاده شد، برای شناسایی اندازه ذرات ماده از آنالیزDLS مدل HORIBA SZ 100Z2 استفاده شد.

نتایج، بحث و نتیجه‌گیری

بررسی ویژگی‌های شیمیایی و فازی غبار

ترکیب شیمیایی دو غبار نشان می‌دهد غبار اولیه کارخانه چادرملو حاوی ۱/۸٪ روی و ۳۵/۸٪ آهن است و غبار کارخانه جهان فولاد سیرجان حاوی ۰/۸٪ روی و ۲۷/۰٪ آهن است. نتایج حاصل از شناسایی ترکیب غبار کارخانه چادرملو که برای برای فرایند جدایش مغناطیسی و لیچینگ، پیش‌عملیات شد نشان می‌دهد عناصر قلیایی مقدار قابل‌توجهی حذف شده‌اند. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی سه غبار آورده شده است.

در شکل ۱ نتیجه آنالیز پراش پرتو ایکس از دو غبار کوره قوس الکتریکی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود درغبار فولادسازی چادرملو فاز اصلی مشاهده شده، فاز مغناطیسی فریت منیزیم ($MgFe_2O_4$) است. فاز حاوی روی، فاز اسپینلی $Fe_{2.65}Zn_{0.35}O_4$ است که بعلت همپوشانی با فریت منیزیم نمی‌توان با قطعیت حضور آن را اثبات کرد. این فاز اسپینلی که در آن بخشی از آهن با روی جانشین شده است نیز دارای خاصیت جذب مغناطیسی است. دیگر فاز فریتی کلسیم فریت Fe_2CaO_4 است که خاصیت مغناطیسی بسیار ضعیف دارد. در کنار این سه، فاز کلریدی $K_9Na_{0.1}Cl_4$ نیز مشاهده شد که معمولا در غبار کوره‌های فولادسازی تجمع پیدا می‌کنند و یک ترکیب نمکی محلول در آب است. در غبار جهان فولاد سیرجان نیز فاز غالب بطور مشابه از فریت منیزیم ($MgFe_2O_4$) تشکیل شده، همچنین فاز اسپینل فریت روی با ترکیب تقریبا مشابه ($Fe_{2.46}Zn_{0.54}O_4$) مشاهده

1 Davis Tube
2 Bam Max

شد. فاز فریت کلسیم فریت Fe_2CaO_4 نیز بطور مشابه در این ساختار مشاهده شد و در کنار این سه فاز کلریدی $K_{3.2}Na_{0.8}Cl_4$ نیز مشاهده شد. همین‌طور که مشاهده می‌شود، ساختار این دو غبار با وجود اینکه از دو کارخانه متفاوت تهیه شده است، بسیار شبیه به هم هستند، هرچند مقدار فلز روی و آهن در این غبار متفاوت است.

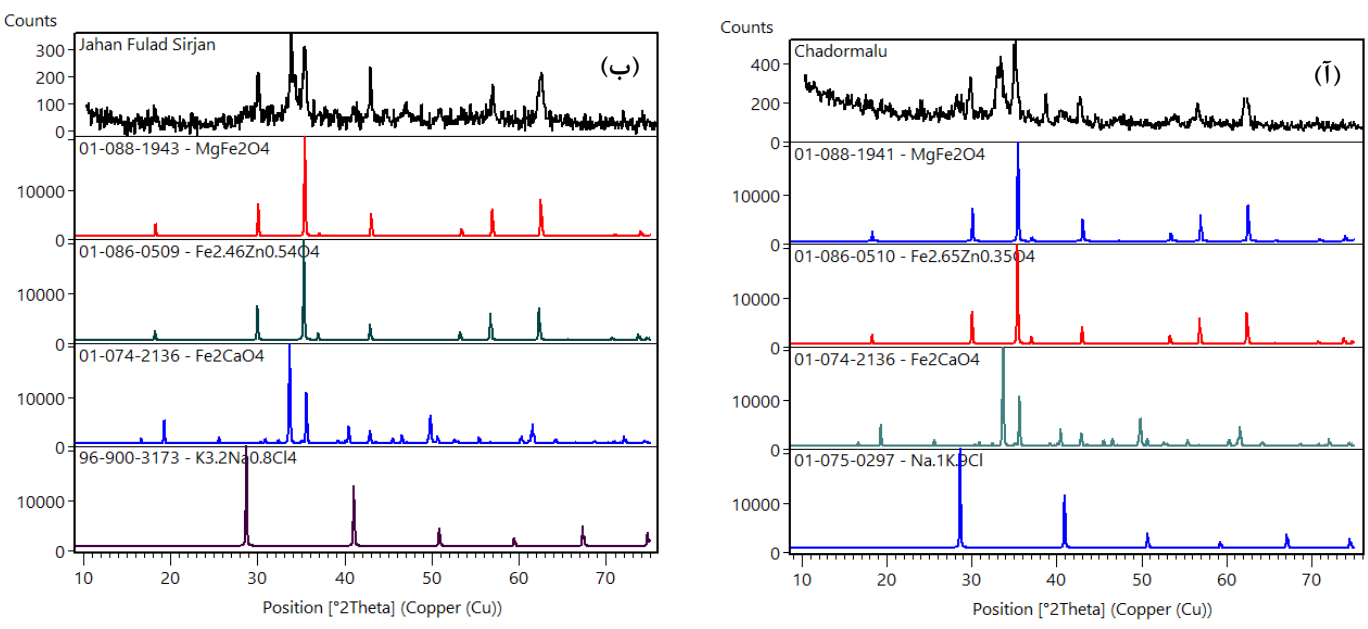
نتیجه حاصل از آنالیز DLS برای اندازه‌گیری اندازه ذرات غبار نشان داد که قطر ۹۰٪ از ذرات غبار آب‌شویی‌شده متعلق به کارخانه چادرملو کمتر از ۰/۹ میکرون و میانگین قطر ذرات ۰/۵ میکرون است و برای غبار آب‌شویی‌شده متعلق به کارخانه جهان فولاد سیرجان این اندازه‌ها به ترتیب، ۰/۸ و ۰/۵ میکرون است. همانطور که ملاحظه می‌شود، ابعاد ذرات بسیار ریز بوده که برای افزایش نرخ سینتیکی لیچینگ می‌تواند مؤثر باشد.

جدایش مغناطیسی

در جدول ۲ آنالیز شیمیایی هر دو بخش مغناطیسی و غیرمغناطیسی برای دو عنصر روی و اهن و همچنین دو ترکیب مهم دیگر سیلیس و آهک موجود در غبار نشان داده است. نتایج آنالیز شیمیایی برای محاسبه درصد بازیابی آهن و روی بترتیب در دو بخش مغناطیسی و غیرمغناطیسی در جدول ۳ استفاده شد که بصورت ترسیمی نتایج نهایی بازیابی این دوعنصر در شکل ۲ مشاهده می‌شود. نتایج نشان‌دهنده رفتار مشابه درصد بازیابی آهن و بازدهی کلی فرایند جدایش مغناطیسی است. به این معنی که در شدت میدان ۱۰۰۰ گوس میزان بازیابی آهن بسیار کم (۸٪) بوده و با افزایش شدت میدان مغناطیسی به ۳۰۰۰ گوس، مقدار بازیابی آهن در فاز مغناطیسی ناگهان افزایش و عدد ۴۳٪ می‌رسد. با افزایش شدت مغناطیسی به ۷۰۰۰ گوس، افزایش بازدهی با نرخ کمی افزایش یافته و به عدد تقریبا ۴۸٪ می‌رسد. عیار آهن که در ماده اولیه ۳۵/۸٪ بود، در نهایت به نزدیک ۴۳٪ افزایش یافت. بازیابی روی در کنسانتره با بازدهی جدایش مغناطیسی نسبت عکس دارد. البته باید توجه داشت که عیار روی در باطله با افزایش شدت میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد ولی میزان بازیابی روی بعلت کاهش مقدار باطله در کل کاهش می‌یابد.

جدول۱: درصد وزنی عناصر در غبار کارخانه‌های فولادسازی چادرملو (قبل و بعد از لیچینگ با آب) و جهان فولاد سیرجان

عناصر	P	Si	Ca	K	Zn	Mg	Fe	Na	S	Mn	LOI
غبار فولادسازی چادر ملو	۰/۵	۲/۱	۶/۸	۱۲/۹	۱/۸۱	۲/۰	۱۸/۴	۱۲/۷	۰/۵	۰/۷	۱۷/۲
غبار آبشویی شده فولادسازی چادرملو	۰/۶	۳/۰	۱۱/۱	۱/۲	۲/۶۳	۳/۱	۳۵/۸	-	۰/۱	۱/۴	۱۰/۷
غبار فولادسازی جهان فولاد سیرجان	۰/۱	۲/۰	۵/۸	۸/۰	۰/۸	۴/۵	۲۷/۰	۸/۶	۰/۲	۱/۲	۱۵/۵



شکل ۱: آنالیز پراش پرتو ایکس از (آ) غبار کارخانه چادرملو و (ب) کارخانه جهان فولاد سیرجان.

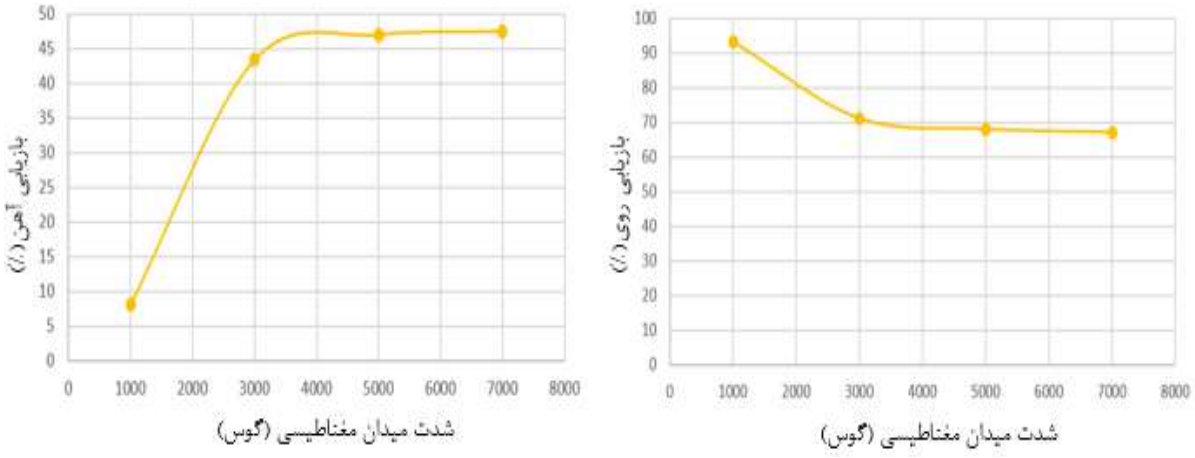
در نهایت بخش مغناطیسی، در شدت میدان بیش از ۳۰۰۰ گوس، با توجه به افزایش عیار آهن، کاهش میزان روی و همچنین حذف عناصر مزاحم سدیم و پتاسیم بدون عملیات اضافی دیگر، می‌تواند به عنوان بخشی از خوراک فرایند گندله سازی به کنسانتره آهن اضافه و مصرف شود. لازم به ذکر است که عمده دیگر ناخالصی‌های غبار که در جدول ۲ نشان داده شده است، آهک و سیلیس است که با توجه بازیسیته بالای آن (۲/۲~) نسبت به کنسانتره، می‌تواند بخشی از نیاز به آهک افزودنی را تامین کند.

جدول۲: نتایج حاصل از آنالیز ذوب پروکسید غبار جدایش مغناطیسی‌شده

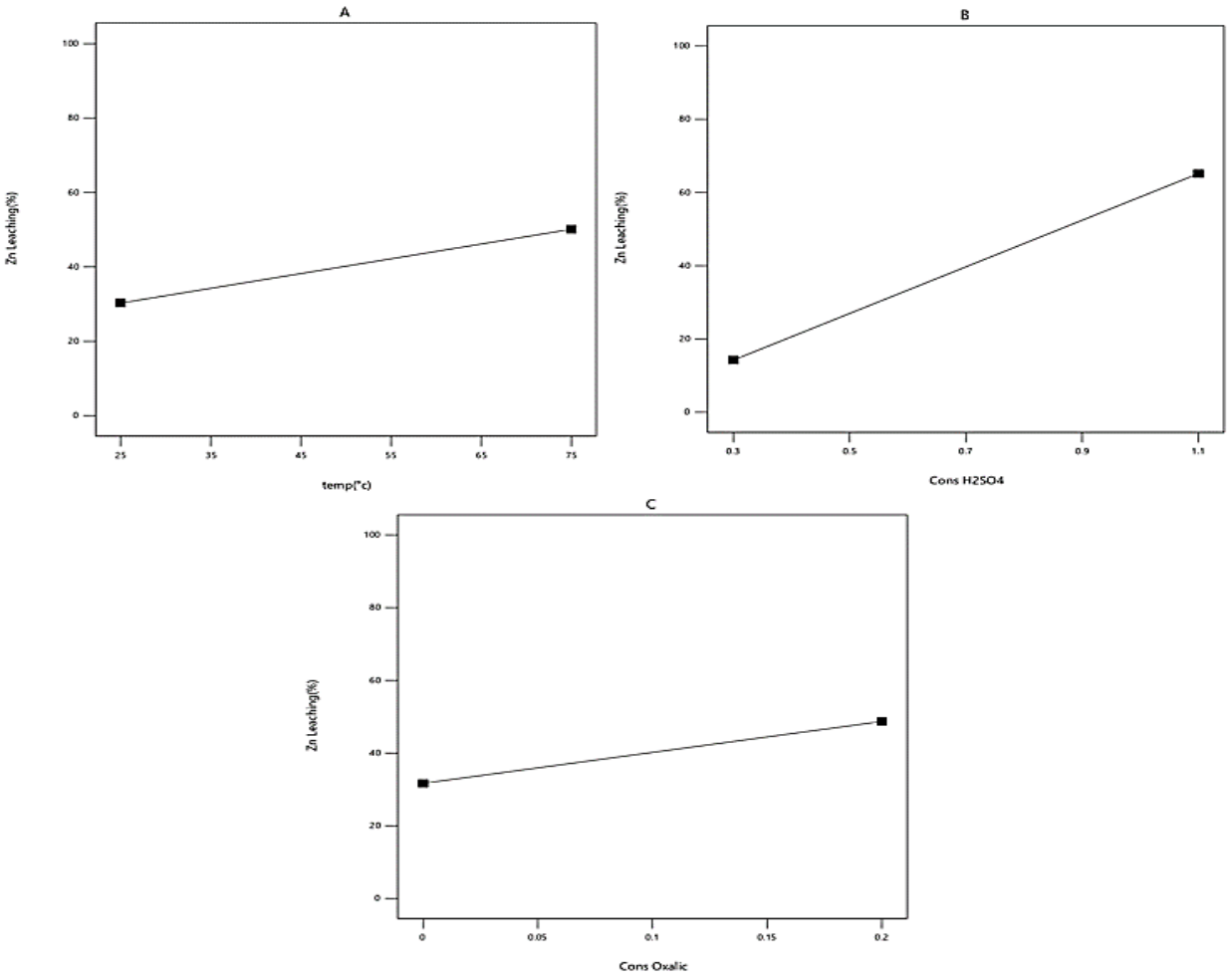
نام	$\%SiO_2$	%CaO	%Fet	%Zn
1000G-C	۶.۰۵	۱۵.۲۱	۴۰.۵۶	۰.۸۲
3000G-C	۸.۶۹	۱۴.۰۸	۴۰.۷۸	۰.۶۶
5000G-C	۶.۱۵	۱۳.۳۹	۴۲.۷۹	۰.۷۲
7000G-C	۶.۳۶	۱۴.۰۱	۴۲.۴	۰.۷۲
1000G-T	۵.۵۴	۱۵.۳۷	۳۷.۴۴	۰.۹۴
3000G-T	۵.۱۸	۱۶.۶	۳۳.۹۴	۱.۰۴
5000G-T	۵.۵۱	۱۷.۲۲	۳۲.۹۱	۱.۰۴
7000G-T	۵.۴۵	۱۷.۶۲	۳۲.۵۵	۱.۰۲

جدول۳: درصد بازیابی روی و آهن در شدت میدان‌های مختلف جدایش مغناطیسی لوله دیویس برای ۱۰ گرم خوراک ورودی

شدت میدان	وزن پسماند (g)	وزن کنسانتره (g)	بازدهی (٪)	وزن Zn پسماند (g)	بازیابی Zn پسماند غیرمغناطیسی (٪)	وزن Fe کنسانتره (g)	بازیابی Fe کنسانتره (٪)
۱۰۰۰	۹.۲۵	۰.۷۵	۷/۵	۰.۰۸۷	۹۳.۴	۰.۳۰	۸.۰۷
۳۰۰۰	۶.۱	۳.۹	۳۹	۰.۰۶۳	۷۱.۱	۱.۵۹	۴۳.۴۵
۵۰۰۰	۵.۹۵	۴.۰۵	۴۰/۵	۰.۰۶۲	۶۸.۰	۱.۷۳	۴۶.۹۵
۷۰۰۰	۵.۹	۴.۱	۴۱	۰.۶۰	۶۷.۱	۱.۷۴	۴۷.۵۱



شکل۲: درصد بازیابی آهن و روی در شدت میدان‌های مختلف.



شکل ۳: منحنی اثرات اصلی متغیرهای غلظت سولفوریک اسید، غلظت اگزالیک اسید و دما بر انحلال روی.

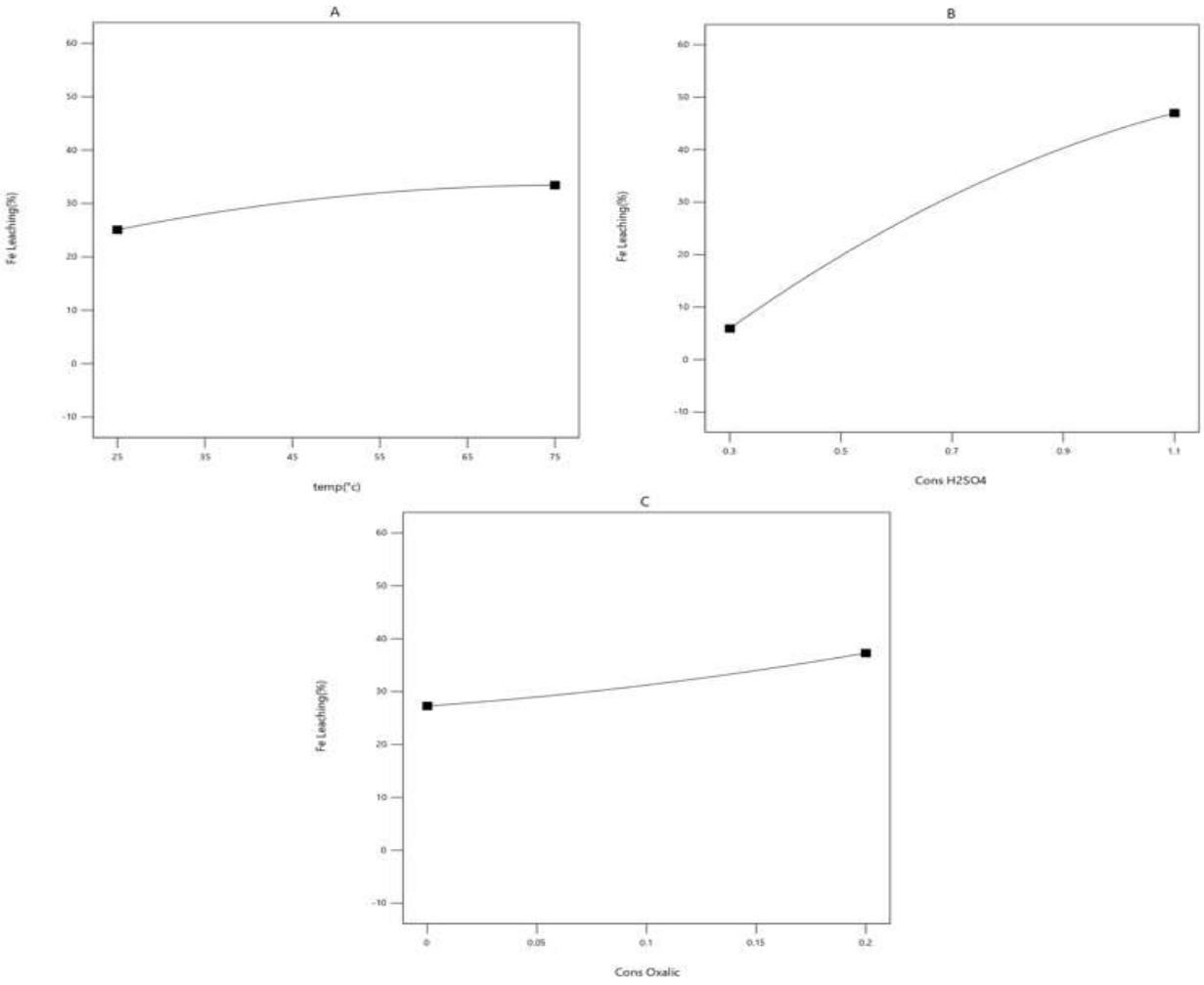
لیچینگ روی از باطله غیرمغناطیسی

برای پیداکردن یک شرایط بهینه (مقدار حداکثر روی و حداقل آهن) در آزمون‌های لیچینگ، با متغیر گرفتن پارامترهای غلظت اگزالیک اسید (۰ تا ۰/۲ مولار)، غلظت سولفوریک اسید (بین ۰/۳ و ۱/۱ مولار) و دما (۲۵ تا ۷۵ درجه سلسیوس) و در شرایط ثابت کسر جامد به مایع (۱۰درصد) و زمان (۱۲۰ دقیقه) انجام گرفت.

در شکل ۳ و ۴ نمودار اثرات اصلی[3] اثر متغییرهای دما، غلظت سولفوریک اسید و غلظت اگزالیک اسید به ترتیب بر میزان انحلال روی و آهن نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، هر سه متغیر دارای شیب مثبت بوده و برای عنصر روی بیشترین شیب خط مربوط به غلظت سولفوریک اسید است، که موثرترین پارامتر در انحلال روی هست. دما و غلظت اگزالیک اسید تقریبا به یک میزان موثر اثر افزایشی در انحلال روی دارند. لازم به ذکر هست وجود سولفوریک اسید برای جلوگیری از ترسیب اگزالات روی اساسی بوده و بنابراین می‌توان اثر بزرگتر این پارامتر نسبت به دیگر متغیرها را متوجه شد. رفتار انحلالی آهن تقریبا مشابه روی بوده و نشان می‌دهد که انحلال هر دو عنصر با هم پیش می‌روند. داده‌ها نشان می‌دهد که آهن حتی در عدم حضور اگزالیک اسید، توسط سولفوریک اسید نیز قابلیت انحلال دارند. اگزالیک اسید در نهایت باعث بهبود انحلال آهن شده ولی از طرفی می‌تواند باعث رسوب محدد آهن با ظرفیت ۲ نیز بشود.

نتایج آنالیز واریانس و مدل برازش‌شده در جداول ۴ و ۵ آمده است. مدل پیشنهادی برای درصد انحلال روی معادله 2FI[4] و برای درصد انحلال آهن معادله Quadratic[5] است. دو پارامتر R-Squared و Predicted R-Squared برای روی به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۹۵ و برای آهن به ترتیب ۰/۹۹و ۰/۹۶ ثبت شد، همچنین مقادیر p-value مدل و lack of fit بترتیب کمتر از ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۵۵۳ بوده که نشان از قابل اعتماد بودن مدل است.

3 Main effect plot
4 تعامل دو عاملی
5 درجه دو



شکل ۴: منحنی اثرات اصلی متغییرهای غلظت سولفوریک اسید، غلظت اگزالیک اسید و دما بر انحلال آهن.

جدول۴: آنالیز واریانس و مدل فیت‌شده بر انحلال روی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	7991.74	5	1598.35	65.31	< 0.0001	significant
A-temp	946.53	1	946.53	38.68	< 0.0001	
B-Cons Sulfuric	5331.48	1	5331.48	217.87	< 0.0001	
C-Cons Oxalic	741.32	1	741.32	30.29	0.0002	
AB	775.00	1	775.00	31.67	0.0002	
BC	197.41	1	197.41	8.07	0.0161	
Residual	269.19	11	24.47			
Lack of Fit	265.8	9	29.53	17.46	0.0553	Not significant
Pure Error	3.38	2	1.69			
Cor Total	8260.93	16				

جدول۵: آنالیز واریانس و مدل فیت‌شده بر انحلال آهن

Source	Sum Of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	4834.53	5	966.91	81.67	< 0.0001	significant
A-temp	173.97	1	173.97	14.69	0.0028	
B-Cons Sulfuric	4214.25	1	4214.25	355.94	< 0.0001	
C-Cons Oxalic	249.66	1	249.66	21.09	0.0008	
AB	83.08	1	83.08	7.02	0.0226	
B^2	113.57	1	113.57	9.59	0.0102	
Residual	130.24	11	11.84			
Lack of Fit	127.87	9	14.21	11.99	0.0793	Not significant
Pure Error	2.37	2	1.19			
Cor Total	4964.77	16				

معادلـه به‌دسـت‌آمده بـرای درصـد انحـلال آهـن و روی به‌صـورت زیـر اسـت:

$$Fe = +30.97 + 4.17\,A + 20.53\,B + 5\,C + 3.22\,AB - 5.25\,B^2$$

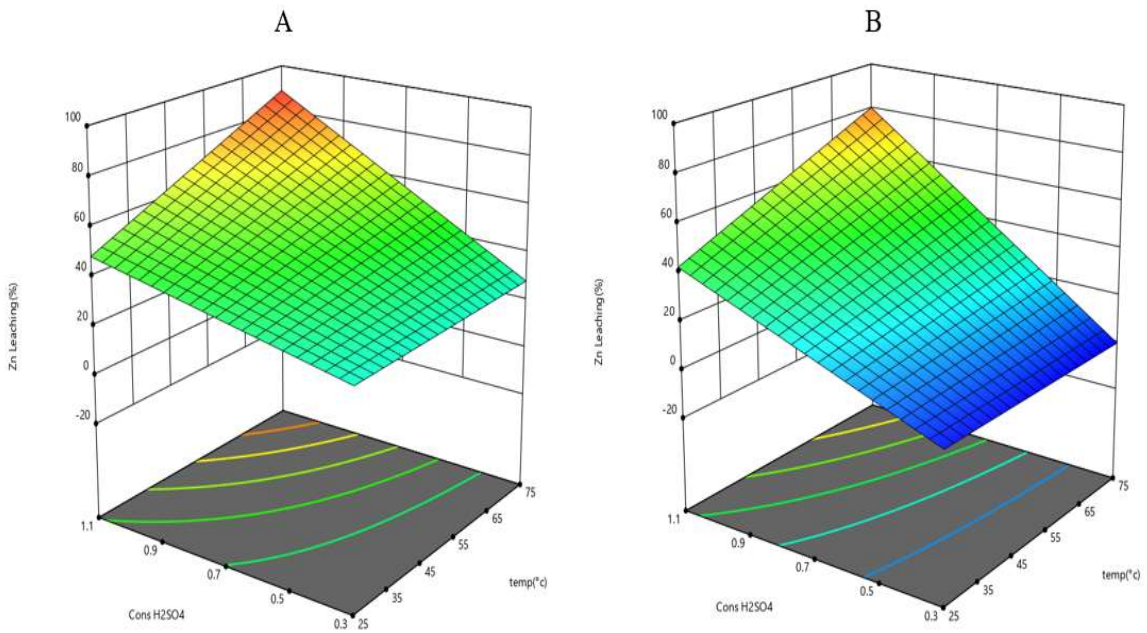
$$Zn = +38.29 + 9.73\,A + 23.09\,B + 8.61\,C + 9.84\,AB - 4.97\,BC$$

A = temp (°C),

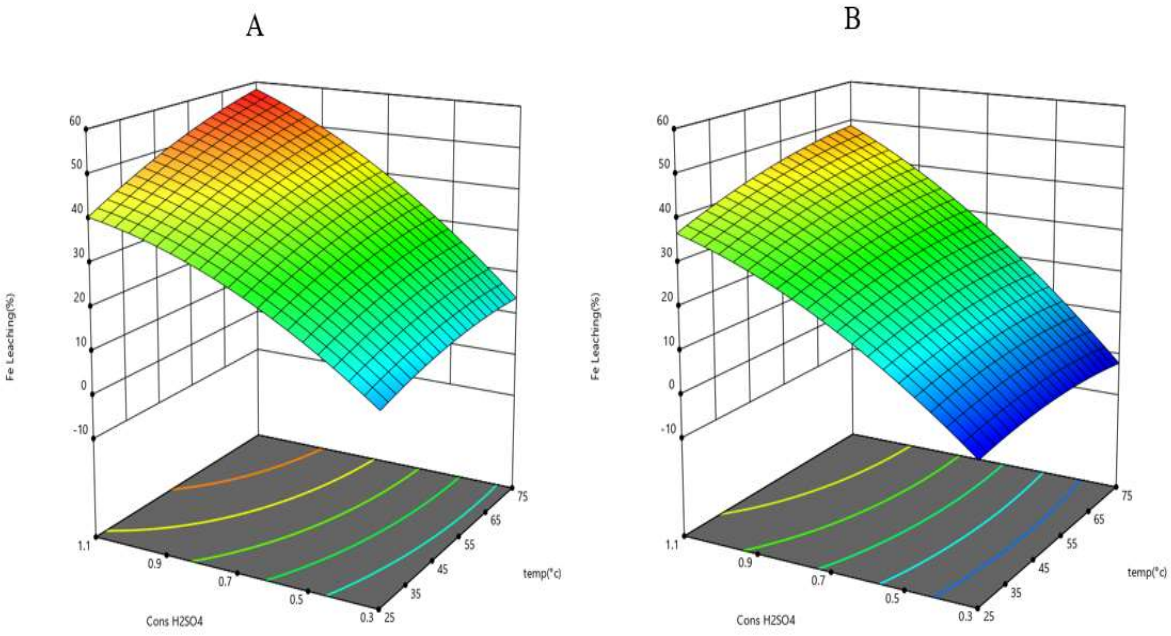
B = Oxalic acid concentration [M],

C = Sulfuric acid concentration [M]

در شـکل ۵ و ۶ تاثیـر همزمـان دمـا و غلظـت سـولفوریک اسـید بـه صـورت سـه بعـدی مشـخص شـده اسـت. در نمـودار A کـه مربـوط بـه تغییـرات دمـا و غلظـت سـولفوریک اسـید اسـت در عـدم حضـور اگزالیـک اسـید، مشـخص می‌کنـد کـه بـا افزایـش دمـا و غلظـت سـولفوریک اسـید انحـلال روی و آهـن نیـز افزایـش پیـدا می‌کنـد. در منحنـی B کـه مربـوط بـه تغییـرات دمـا و غلظـت سـولفوریک اسـید در حضـور ۰/۲ مـولار اگزالیـک اسـت، نشـان می‌دهـد کـه بـا افزایـش دمـا و غلظـت سـولفوریک اسـید مقـدار انحـلال افزایـش پیـدا می‌کنـد کـه در مقایسـه بـا نمـودار قبـل مقادیـر انحـلال روی و آهـن بیشـتر اسـت کـه بـه دلیـل حضـور اگزالیـک اسـید اسـت کـه بـه انحـلال آهـن کمـک کـرده اسـت، بـا ثابـت در نظـر گرفتـن مقـدار غلظـت سـولفوریک اسـید و اگزالیـک اسـید، هرچـه دمـا بیشـتر شـود، مقـدار انحـلال نیـز بیشـتر می‌شـود. همچنیـن بـا ثابـت نگـه داشـتن دمـا و افزایـش غلظـت سـولفوریک اسـید و اگزالیـک اسـید میـزان انحـلال روی و آهـن زیـاد شـده اسـت.



شکل ۵: نمودار سه‌بعدی تاثیر همزمان دما و غلظت بر انحلال روی، تصویر B بدون اگزالیک اسید تصویر A همراه با بیشترین مقدار اگزالیک اسید.



شکل ۶: نمودار سه‌بعدی تاثیر همزمان دما و غلظت بر انحلال آهن، تصویر A بدون اگزالیک اسید تصویر B بیشترین مقدار اگزالیک اسید.

جدول ۶: نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی به‌روش ICP پسماند لیچینگ

عناصر	Si	Ca	K	Zn	Mg	Fe	S	Mn	LOI
%WT	۳.۵۱	۱۵.۱	۰.۲۲	<۰.۰۵	۰.۳۳	۱۳.۴	۱۱.۵	۰.۲۶	۳۰.۰

برای بررسی پسماند حاصل از لیچینگ، آنالیز شیمیایی، فازی و میکروسکوپی روی پسماندی که بیشترین میزان انحلال را داشت، انجام شد در جدول ۶ نتایج آنالیز شیمیایی حاصل از ICP مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است مقدار روی در پسماند لیچینگ از حد تشخیص که ۰/۰۵ درصد است کوچک‌تر است و به این معناست که انحلال تقریبا کامل روی صورت گرفته است. مقدار آهن نیز از ۲۸/۳ درصد به ۱۳/۴۳ درصد کاهش یافته است. از طرفی مقدار گوگرد و کلسیم افزایش یافته است و این به‌دلیل تشکیل کلسیم سولفات (گچ) است که در نتایج آنالیز XRD مشخص شده است. تشکیل این فاز عموما نامطلوب بوده و عملیات فیلتر کردن محلول بعد از لیچینگ را دشوار می‌کند که پارامتری نامطلوب به حساب می‌آید.

جمع‌بندی

در این پژوهش به فرایند بازیابی آهن و روی از غبار کوره قوس الکتریکی به روش جدایش مغناطیسی و لیچینگ پرداخته شد. پس از رفتارشناسی اولیه از غبار، فرایند لیچینگ اولیه غبار با آب به‌منظور خارج‌کردن اکسید عناصر قلیایی از غبار، جدایش مغناطیسی تر برای بازیابی حداکثر مقدار ممکن آهن از غبار، انتخاب حلال مناسب برای فرایند لیچینگ بخش غیرمغناطیسی غبار برای بازیابی روی و لیچینگ بخش غیرمغناطیسی با استفاده از سولفوریک اسید و اگزالیک اسید انجام شد. تأثیر پارامترهای دما، زمان، غلظت حلال بر میزان بازیابی روی بررسی شد.

۱. در مرحله اول برای پیش‌عملیات آزمون‌هایی طراحی شد که مشخص شد در محدوده مورد آزمایش، بالاترین راندمان در شرایط نسبت جامد به مایع ۰/۱ و دمای ۷۵ درجه سلسیوس بدست می‌آید که غبار لیچ شده تقریبا ۳۵٪ درصد تقلیل وزن ناشی از انحلال ترکیبات حاوی عناصر سدیم و پتاسیم پیدا می‌کند.

۲. در ادامه برای پیداکردن شدت میدان مناسب برای جدایش مغناطیسی آهن، شدت میدان‌های ۱۰۰۰ تا ۷۰۰۰ گاوس بررسی شدند و شدت میدان ۴۰۰۰ گاوس انتخاب شد که شاهد افزایش درصد آهن در بخش کنسانتره مغناطیسی و افزایش نسبی روی در بخش پسماند بودیم، درصد بازیابی آهن در کنسانتره ۶۱/۷ درصد و درصد بازیابی روی در پسماند ۵۱/۲ درصد بدست آمد.

۳. پارامترهـای دمـا، غلظـت سـولفوریک اسـید و غلظـت اگزالیـک اسـید بـر میـزان انحـلال روی بررسـی شـدند و مشـخص شـد بـا افزایـش هـر کـدام میـزان انحـلال نیـز افزایـش می‌یابـد؛ امـا شـرایط بـرای جدایـش انتخابـی روی جـود نـدارد. بیشـترین تأثیـر بـر انحـلال روی را تغییـر غلظـت سـولفوریک اسـید دارد و بیشـینه انحـلال روی در شـرایط غلظـت ۱,۱ مـولار سـولفوریک اسـید، ۰,۲ مـولار اگزالیـک اسـید و دمـا ۷۵ درجـه سلسـیوس بـه دسـت آمـد.

۴. باتوجـه بـه نتایـج به‌دسـت‌آمده مشـخص شـد بیشـتر کلسـیم موجـود در محلـول، ضمـن تبدیـل بـه کلسـیم سـولفات رسـوب می‌دهـد و بـه پسـماند لیچینـگ منتقـل می‌شـود.

References

[1] Kirschen, M., Visualization of slag data for efficient monitoring and improvement of steelmaking slag operation in electric arc furnaces, with a focus on MgO saturation. Metals, 2020. 11(1): p. 17.

[2] Nyirenda, R., The processing of steelmaking flue-dust: a review. Minerals Engineering, 1991. 4(7-11): p. 1003-1025.

[3] Bruckard, W., et al., Water leaching and magnetic separation for decreasing the chloride level and upgrading the zinc content of EAF steelmaking baghouse dusts. International Journal of Mineral Processing, 2005. 75(1-2): p. 1-20.

[4] Sekula, R., et al., Electric arc furnace dust treatment: investigation on mechanical and magnetic separation methods. Waste management & research, 2001. 19(4): p. 271-275

[5] س.م.م.ن، ض.، بازیابی روی از غبار کوره‌های قوس الکتریکی فولادسازی از طریق احیای کربوترمی. از پژوهش تا فناوری، ۱۳۹۷

[6] Mehmet, K., et al., Optimization of selective leaching of Zn from electric arc furnace steelmaking dust using response surface methodology. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015. 25(8): p. 2753-2762.

[7] Kukurugya, F., T. Vindt, and T. Havlík, Behavior of zinc, iron and calcium from electric arc furnace (EAF) dust in hydrometallurgical processing in sulfuric acid solutions: Thermodynamic and kinetic aspects. Hydrometallurgy, 2015. 154: p. 20-32.