

## Optimization of leaching process of electric arc furnace dust to obtain the maximum recovery of Fe/Ca ratio in leaching solution

Mahdi Kamali Najafabadi<sup>1</sup>, \*Saeed Sheibani<sup>2</sup>, Abolghasem Ataie<sup>3</sup>

1- M.Sc., School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

**Citation:** Kamali Najafabadi M, Sheibani S, Ataie A. Optimization of leaching process of electric arc furnace dust to obtain the maximum recovery of Fe/Ca ratio in leaching solution. Metallurgical Engineering 2021; 24(2): 133-144 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2022.549956.1348>

**doi :** <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2022.549956.1348>

### ABSTRACT

This work aimed to obtain a solution rich in iron, calcium, and magnesium from electric arc furnace dust of steelmaking. Raw materials characterization was performed by several techniques, including X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES), and field emission scanning electron microscopy (FE-SEM). Calcium and iron are the two main constituents of arc furnace dust, but their dissolution conditions vary at different temperatures and concentrations of sulfuric acid. Since the amount of calcium in the initial chemical composition of the electric arc furnace dust is much higher than iron, it is necessary to remove some calcium along with other undesirable elements. The response surface methodology (RSM) was used as the experimental design to maximize the total ratio of iron to calcium recovery (F/C) and evaluate the effective parameters, including sulfuric acid concentration and temperature. Recovery of iron from electric arc furnace dust reached to its maximum value via a two-stage leaching process: 0.1 M and 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, respectively, in 1 hour at the temperature of 85 °C and liquid to solid ratio of 50. Under the above experimental conditions, the F/C ratio was almost 4, which is eight times higher than that of in the initial electric arc furnace dust.

**Keywords:** Recycling, Iron, Calcium, Design of Experiment, Leaching, Electric Arc Furnace Dust.

Received: 4 March 2022

Accepted: 3 July 2022

■ ..... ■  
\* **Corresponding Author:**

**Saeed Sheibani, PhD**

**Address:** School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

**Tel:** +98 (21) 61114068

**E-mail:** [ssheibani@ut.ac.ir](mailto:ssheibani@ut.ac.ir)

## بهینه‌سازی شرایط لیچینگ غبار کوره قوس الکتریکی به منظور دستیابی به بیشینه بازیابی نسبت آهن به کلسیم در محلول لیچینگ

مهدی کمالی نجف آبادی<sup>۱</sup>، سعید شیبانی<sup>۲</sup>، ابوالقاسم عطائی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

### چکیده

در این تحقیق، هدف دستیابی به محلولی غنی از آهن، کلسیم و منیزیم از یکی از منابع ارزان ثانویه یعنی غبار کوره فولادسازی قوس الکتریکی است. مشخصه یابی ماده اولیه با روش‌های طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس، طیف سنجی تفرقی اشعه ایکس، پلاسمای جفت شونده القایی و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی انجام شد. کلسیم و آهن دو عنصر اصلی تشکیل دهنده غبار کوره قوس الکتریکی بوده و شرایط لیچینگ آن‌ها در دما و غلظت‌های مختلف سولفوریک اسید متفاوت است. از آنجایی که مقدار کلسیم در ترکیب شیمیایی اولیه غبار کوره قوس الکتریکی بسیار بیشتر از آهن است، لازم است ابتدا مقداری از کلسیم به همراه سایر عناصر نامطلوب حذف شود. برای به حداکثر رساندن نسبت کل بازیابی آهن به کلسیم (F/C) و ارزیابی تأثیر غلظت سولفوریک اسید و دما، از روش سطح پاسخ به عنوان طراحی آزمایش استفاده شد. بهترین مقدار بازیابی آهن از غبار طی یک فرایند لیچینگ دو مرحله‌ای به ترتیب با استفاده از محلول ۰/۱ و ۱ مولار سولفوریک اسید (یک ساعت، دمای ۸۵ درجه سانتی گراد و نسبت محلول به جامد ۵۰) انجام شد. در این حالت، مقدار F/C تقریباً برابر با ۴ بود که این به نسبت ترکیب شیمیایی ابتدایی غبار کوره قوس الکتریکی، هشت برابر بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: بازیابی، آهن، کلسیم، طراحی آزمایش، لیچینگ، غبار کوره قوس الکتریکی.

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳ | پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

### ۱. مقدمه

یکی از مشکلات اصلی در بیشتر کارخانه‌های صنعتی، دفع مواد پسماند جامد است. بیشتر این پسماندها سمی و آلوده هستند و تخلیه‌ی آن‌ها در طبیعت باعث آلودگی محیط زیست می‌شود. عدم توجه به این موارد، سلامت و زندگی موجودات زنده و انسان‌ها را به خطر انداخته است. ذخیره پسماندهای آلوده کننده محیط زیست فرآیندی هزینه بر است. با این حال بازیافت و استفاده مجدد به نوعی می‌تواند سودآور باشد. برای بهینه سازی فرآیند، یافتن روش مناسب برای بازیافت پسماند و تعیین پارامترهای موثر روی آن و تنظیم آن‌ها ضروری است [۱-۵].

گرد و غبار کوره فولادسازی قوس الکتریکی (EAF)، یکی از خطرناک ترین پسماندهای تولید شده در این صنعت است.

1. Electric arc furnace

\* نویسنده مسئول:

دکتر سعید شیبانی

نشانی: تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد.

تلفن: ۶۱۱۴۰۶۸ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: ssheibani@ut.ac.ir

ترکیب شیمیایی گرد و غبار کوره قوس الکتریکی به ترکیب شارژ و گونه‌های فولادی تولید شده بستگی دارد. لازم به ذکر است که از جنبه بازیافت فلزات، به دلیل ترکیب شیمیایی گرد و غبار کوره قوس الکتریکی و وجود عناصر ارزشمند، این ماده را می‌توان به عنوان منبع ثانویه برای استخراج فلزات در نظر گرفت. از این رو، می‌توان از فرآیند لیچینگ روی گرد و غبار کوره قوس الکتریکی برای استخراج فلزاتی مانند آهن، روی، کلسیم، منیزیم و سرب استفاده کرد. در طی فرآیند فولادسازی در کوره قوس الکتریکی گرد و غبار و سرباره به عنوان محصولات جانبی تولید می‌شود. تخمین زده می‌شود که بین یک تا دو درصد از شارژ کوره به گرد و غبار کوره قوس الکتریکی تبدیل می‌شود. معمولاً گرد و غبار کوره قوس الکتریکی حاوی حدود ۲۰ درصد وزنی آهن است که بسته

غبار EAF شدند. همان طور که مشاهده می‌شود، به ندرت تاثیر همزمان چند عامل موثر بر لیچینگ به وسیله‌ی فرآیند طراحی آزمایش انجام شده است.

محلول حاصل از لیچینگ را می‌توان با روش‌های مختلف سنتز مانند محلول احتراقی، سل-ژل، هیدروترمال و هم رسوبی به مواد و محصولات با ارزش افزوده بالاتر تبدیل کرد. از آن جا که ترکیب شیمیایی گرد و غبار کوره قوس الکتریکی پیچیده است، استفاده مستقیم از آن به عنوان منبع اصلی برخی عناصر مانند آهن، کلسیم، منیزیم و غیره منطقی به نظر نمی‌رسد. بازیافت عناصر مطلوب با لیچینگ و سپس دستیابی به محصولات مختلف طی فرآیندهای متفاوت می‌تواند یک ایده مطلوب باشد. در این پژوهش پارامترهای موثر در بازیافت آهن، منیزیم و کلسیم با روش طراحی آزمایش (DOE)<sup>۵</sup> ارزیابی شد. طراحی آزمایش یک روش قدرتمند بوده که اولین بار در دهه ۱۹۲۰ توسط رونالد فیشر<sup>۶</sup> به منظور مطالعه اثر همزمان چندین عامل روی یک پاسخ معین، ابداع گردید. این روش را می‌توان برای تمام فرآیندهایی که دارای ورودی و خروجی‌های قابل اندازه گیری باشند به کار برد. مهم‌ترین اهداف استفاده از این روش‌ها فهم چگونگی ارتباط و بررسی اثرات متقابل بین متغیرها نسبت به پاسخ فرآیند است. اثر متقابل، اثر همزمان دو یا چند عامل روی پاسخ فرآیند است. اگر در سطوح مختلف یک عامل، عامل دیگر اثرات متفاوتی را نشان دهد، در این صورت بین این دو عامل اثر متقابل وجود دارد [۲۶]. تعداد قابل توجهی از پارامترها وجود دارد که بر لیچینگ آهن از گرد و غبار کوره قوس الکتریکی تأثیر می‌گذارد. طبق مطالعات قبلی توسط چن<sup>۷</sup> و همکاران [۲۷]، جیا<sup>۸</sup> و همکاران [۲۸]، پپر<sup>۹</sup> و همکاران [۲۹]، و وانگ<sup>۱۰</sup> و همکاران [۳۰]، در میان پارامترهای اصلی، دمای لیچینگ و غلظت اسید بیشترین تأثیر را در بازیافت آهن از خود نشان می‌دهند.

با توجه به موارد فوق، آنچه جالب به نظر می‌رسد این است که از بازیابی عناصر اصلی گرد و غبار کوره قوس الکتریکی فولادسازی، محلولی غنی از عناصر مطلوب حاصل شود. لازم به ذکر است که در پژوهش‌های قبلی تمرکز بیشتر روی بازیابی فلزاتی مانند روی و آهن بوده است و به موضوع بازیابی از غبار با مقادیر کم فلز روی به هدف دستیابی به نسبت بهینه ای از آهن به کلسیم کمتر پرداخته شده است. چرا که چنین محلول بازیابی شده به منظور منبع مناسبی از یون آهن، منیزیم و کلسیم برای سایر کاربردها قابل استفاده خواهد بود. بنابراین، هدف از این مطالعه دستیابی به محلولی

به ترکیب بار می‌تواند متفاوت باشد [۶-۸]. اگر قراضه آهن گالوانیزه بیشتری استفاده شود، گرد و غبار می‌تواند دارای درصد بالایی از عنصر روی نیز باشد [۹]. به طور کلی، ترکیب شیمیایی گرد و غبار کوره قوس الکتریکی در تولید فولاد بسیار متغیر است و نه تنها به ضایعات استفاده شده و نوع فولاد تولید شده بلکه به شرایط کار و نوع فرآیندها نیز بستگی دارد [۱۰]. گرد و غبار کوره قوس الکتریکی در کاربردهای مختلف مانند آسفالت و بتن به عنوان منبع ثانویه استفاده شده است [۱۱، ۱۲].

از طریق فرایندهای هیدرومتالورژی، می‌توان فلزاتی مانند آهن، کلسیم، روی، منیزیم، سرب، کروم، مس و سایر فلزات را که در پسماندهای صنعتی مانند گرد و غبار کوره قوس الکتریکی فراوان یا از ارزش بیشتری برخوردار هستند، بسته به ترکیب شیمیایی آن، بازیافت کرد [۱۳-۱۷]. با توجه به ترکیبات مختلف موجود در گرد و غبار کوره قوس الکتریکی، استخراج یک یا چند عنصر مطلوب فقط در یک مرحله لیچینگ امکان پذیر نیست. بنابراین، به دست آوردن یک محلول غنی از یک یا چند یون فلزی محلول مطلوب از طریق دو یا چند مرحله لیچینگ می‌تواند به عنوان یک رویکرد در نظر گرفته شود [۱۸، ۱۹]. عوامل متعددی مثل اندازه‌ی ذرات [۸]، سرعت هم زدن [۲۰]، نوع و غلظت حلال مورد استفاده [۶، ۷]، نسبت وزنی مایع به جامد [۱۷، ۲۱]، زمان لیچینگ [۲۲]، دمای لیچینگ [۲۳] و تعداد مراحل لیچینگ [۲۴] روی فرآیند لیچینگ تأثیرگذار هستند. فرآیندهای هیدرومتالورژی جهت استخراج فلزاتی مانند روی از غبار کوره قوس الکتریکی به کار برده می‌شوند و عمدتاً مواد باقیمانده از این فرآیندها، غنی از آهن بوده و می‌تواند به چرخه تولید فولاد بازگردانده شود. گاهی نیز به دلیل نسبت اندک قراضه به آهن اسفنجی در مرحله‌ی شارژ کوره، بازیابی فلزاتی مانند روی از غبار EAF به صرفه نیست و بازیابی خود فلز آهن در دستور کار قرار می‌گیرد. مونته نگرو<sup>۲</sup> و همکاران [۱۹] توانستند طی یک فرآیند لیچینگ سه مرحله ای شامل دو مرحله لیچینگ در دمای اتاق و فشار ۱ اتمسفر و یک مرحله در دمای ۲۰۰ درجه‌ی سانتی گراد و فشار بالا روی غبار EAF، عناصر روی و کادمیم را به ترتیب تا ۹۹ و ۹۶% از مقدار اولیه موجود در غبار EAF بازیابی کنند. هالی<sup>۳</sup> و همکاران [۲۵] به مطالعه و بررسی جهت بازیابی روی و سرب از غبار EAF تشویه شده‌ی سیراتی به وسیله‌ی فرآیند رسوب و استخراج حلالی پرداختند و موفق به بازیافت حداکثری شدند. هررو<sup>۴</sup> و همکاران [۱۸] پس از انجام دو مرحله فرآیند اکسیداسیون و سمناسیون به منظور کاهش حداکثری ناخالصی‌ها، محلولی غنی از روی آماده کردند و با فرآیند الکترووینینگ موفق به بازیابی ۹۹/۷۵% از روی موجود در

5. Design of experiment

6. Sir R.A. Fisher

7. Chen

8. Jia

9. Pepper

10. Wang

2. Montenegro

3. Halli

4. Herrero

دلیل مقدار زیاد اکسید کلسیم افزودن آهن به کوره در حین عملیات تولید فولاد است. از آنجا که در فرآیند تولید فولاد در این کوره قوس الکتریکی، از قراضه آهن گالوانیزه به عنوان خوراک استفاده نمی‌شده است، محتوای روی در گرد و غبار کوره قوس الکتریکی ناچیز است. دلیل وجود کربن عنصری در آنالیز XRF این است که چون کربنات‌ها بر اثر حرارت دهی حذف نشده‌اند، کربن در LOI لحاظ نشده است.

**جدول ۲.** نتایج ترکیب شیمیایی آنالیز XRF برای نمونه غبار کوره قوس الکتریکی تولید فولاد.

| ترکیبات                        | (%wt) درصد وزنی |
|--------------------------------|-----------------|
| CaO                            | ۴۷/۹۷           |
| Fe Oxides (total)              | ۲۰/۷۷           |
| MgO                            | ۸/۲۸            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۱/۹۳            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | ۱/۵۲            |
| TiO <sub>2</sub>               | ۰/۹۵            |
| SiO <sub>2</sub>               | ۰/۷۱            |
| MnO                            | ۰/۱۸            |
| C                              | ۲/۷۸            |
| LOI <sup>۱</sup>               | ۱۴/۹۱           |

### عملیات لیچینگ

نمودار فرآیند دستیابی به محلول غنی از عناصر آهن، کلسیم و منیزیم از گرد و غبار کوره قوس الکتریکی در شکل یک نشان داده شده است. فرایند سنتز از دو مرحله لیچینگ تشکیل شده است. مرحله اول برای حذف عناصر و ترکیبات نامطلوب از ماده اولیه همراه با لیچینگ محدود آهن، منیزیم و کلسیم انجام شد. سپس در مرحله دوم، هدف اصلی به حداکثر رساندن نسبت بازیافت آهن به کلسیم بود. آزمایشهای لیچینگ در بشر یک لیتری قرار داده شده در حمام آب انجام شد. از همزن مکانیکی برای هم زدن محلول استفاده شد. برای جلوگیری از تبخیر محلول، تجهیزات به طور کامل آب‌بندی شدند. در ابتدا، مجموعه‌ای از آزمایشهای غربالگری برای تعیین درجه حرارت مطلوب و غلظت سولفوریک اسید در مرحله اول لیچینگ انجام شد. قبل از استفاده از اسید به عنوان حلال، از فرآیند آب‌شویی در دمای بالا استفاده شد، اما نتیجه مطلوب برای حذف ناخالصی‌های قلیایی و کاهش کلسیم حاصل نشد. در این مرحله دمای ۸۵ درجه سانتیگراد و غلظت سولفوریک اسید ۰/۱ مولار انتخاب شد. در این شرایط، عناصر نامطلوبی مانند سدیم و پتاسیم تا حد امکان از نمونه حذف شدند در حالی که لیچینگ آهن، کلسیم و منیزیم محدود بود. سپس مرحله دوم لیچینگ روی جامد باقی مانده حاصل از مرحله اول لیچینگ انجام شد.

غنی از عناصر آهن، کلسیم و منیزیم از طریق یک فرآیند لیچینگ دو مرحله‌ای و کسب حداکثر نسبت آهن به کلسیم است. شناخت خواص ماده اولیه و مشخصه‌یابی کامل آن، می‌تواند در کنار درک مناسب مکانیزم لیچینگ و بررسی ترمودینامیکی واکنش‌های لیچینگ در این راستا حایز اهمیت باشد.

## ۲. مواد و روش تحقیق

### مواد و روش‌های آزمایش

غبار کوره قوس الکتریکی تولید فولاد از شرکت فولاد هرمزگان تأمین گردید. در این پژوهش از سولفوریک اسید (بسیار خالص<sup>۱۱</sup>) و اتانول (بسیار خالص) تولید شرکت مجللی ایران استفاده شد. به منظور دست‌یابی به اندازه‌دانه‌های گوناگون، آگلومره‌های غبار کوره قوس الکتریکی در ابتدا با استفاده از آسیای گلوله‌ای کم انرژی (ناب تک مدل ML-10) به مدت ۶۰ دقیقه خردایش و همگن شد. سپس با استفاده از تقسیم‌کننده شانه‌ای<sup>۱۲</sup> نمونه‌ها همگن و تقسیم‌بندی شدند. ترکیب شیمیایی گرد و غبار کوره قوس الکتریکی به دست آمده توسط دستگاه طیف سنج فلورسانس اشعه ایکس مدل فیلیپس (XRF<sup>۱۳</sup>, PW2404) مشخصه‌یابی گردید. خصوصیات فازی نمونه اولیه و نمونه‌های سنتز شده توسط دستگاه طیف سنج تفرقی اشعه ایکس (XRD) مدل فیلیپس، (PW3040 / 60) با تابش Cu-Kα ( $\lambda=1/5405 \text{ \AA}$ ) با ولتاژ شتاب‌دهنده ۴۰۰ kV انجام شد. اندازه‌گام این دستگاه ۰/۰۲ درجه و زمان توقف در هر گام ۰/۳۶ ثانیه تنظیم گردید. نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس توسط نرم افزار X'pert HighScore Plus بررسی و نتایج استخراج شد. ترکیب شیمیایی محلول حاصل از مرحله دوم لیچینگ با استفاده از روش پلاسما ی جفت شونده القایی به وسیله دستگاه (ICP-OES<sup>۱۵</sup>, 730- ES, Varian) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بررسی اندازه و توزیع ذرات، تجزیه و تحلیل اندازه ذرات<sup>۱۶</sup> با استفاده از یک سرند لرزان دنور<sup>۱۷</sup> انجام شد. ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM<sup>۱۸</sup>, Hitachi-S4160) مورد مطالعه قرار گرفت. ترکیب شیمیایی گرد و غبار کوره قوس الکتریکی توسط آنالیز XRF تعیین و نتایج در جدول دو نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اکسید کلسیم، اکسید آهن و اکسید منیزیم به نسبت سایر ترکیبات، فراوان هستند.

11. Extra Pure
12. Riffle
13. X-ray fluorescence
14. X-ray diffraction
15. inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy
16. Granulometry
17. Denver sieve shaker
18. Field emission scanning electron microscopy



شکل ۱. فلوچارت فرآیند لیچینگ غبار کوره قوس الکتریکی.

[۸، ۳۱، ۳۲]، کلسیم می‌تواند با کاهش درجه حرارت محلول لیچینگ به دمای محیط به شکل  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (گچ) رسوب کند [۳۲]. بنابراین، پس از هر آزمایش لیچینگ، با کاهش دمای محلول، رسوب گچ سفید تشکیل شده و توسط کاغذ فیلتر واتمن<sup>۲۰</sup> با شماره ۴۱ جدا شد.

### ۳. نتایج و بحث

نتایج آزمون توزیع اندازه ذرات تجمعی برای نمونه گرد و غبار کوره قوس الکتریکی در شکل دو نشان داده شده است. توزیع اندازه ذرات ناهمگن و شامل دو قسمت اصلی بود: قسمت ریز (زیر ۲۵ میکرون) و قسمت درشت (بین ۲۵ میکرون تا ۱۰۶ میکرون). ۵۵٪ ذرات زیر ۲۵ میکرون بودند، در حالی که بیشتر ذرات (۹۳٪) زیر ۷۵ میکرون بودند.  $d_{80}$  در هر نمودار دانه بندی درصد تجمعی برحسب اندازه الک، معادل با دهانه سرنندی فرضی است که ۸۰ درصد مواد از آن عبور کرده است. این مقدار برای نمونه گرد و غبار کوره قوس الکتریکی معادل با ۵۳ میکرون محاسبه شد.

یک طرح بهینه بر اساس روش سطح پاسخ ( $\text{RSM}^{19}$ ) با استفاده از نرم افزار DESIGN EXPERT نسخه ۷ (State-Ease Inc.) برای بهینه سازی لیچینگ آهن و کلسیم و همچنین بررسی تعاملات احتمالی دمای لیچینگ و غلظت اسید به کار گرفته شد. تعیین و انتخاب سطوح اولیه پارامترهای موثر بر اساس پژوهش قبلی [۸] انجام شد. با این حال، پس از آن، با انجام آزمون‌های اولیه و نتایج تجربی به دست آمده از آنها، مشخص شد که تاثیر دمای انجام آزمایش و غلظت اسید طی فرآیند لیچینگ بسیار بیشتری دارد. سطح دما و غلظت اسید به ترتیب بین ۲۵ تا ۸۵ درجه سانتی گراد و ۰/۰۵ تا ۱ مولار انتخاب شد. در تمام آزمایش‌ها، زمان لیچینگ، نسبت حجم محلول به جرم جامد استفاده شده در فرآیند لیچینگ و سرعت هم زدن به ترتیب در ۶۰ دقیقه، ۵۰ میلی لیتر بر گرم و ۳۰۰ دور در دقیقه ثابت نگه داشته شدند. به طور کلی، شانزده تست طراحی شد. جزئیات هر آزمون با نتایج مرتبط در جدول یک آورده شده است. از آنجا که مقدار کلسیم در ماده اولیه بسیار بیشتر از آهن و سایر اجزای گرد و غبار کوره قوس الکتریکی بود، نسبت بازیابی آهن به کلسیم (F/C) به عنوان معیار بازیابی در نظر گرفته شد. از آنجا که لیچینگ  $\text{Ca}^{2+}$  با افزایش دما به طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌گیرد

20. Whatman

19. Response Surface Methodology

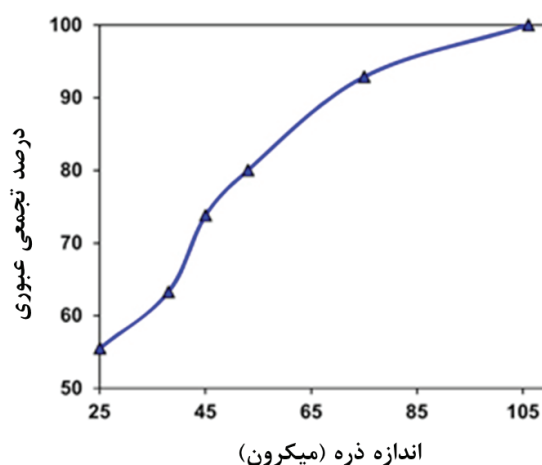
جدول ۱. آزمایش‌های طراحی شده به روش دی-اپتیمال (D-optimal).

| شماره آزمایش | دما (درجه سانتی گراد) | غلظت اسید (مولار) | نسبت بازیابی آهن به کلسیم |
|--------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|
| ۱            | ۲۵                    | ۰/۳۷              | ۰/۸۴                      |
| ۲            | ۲۵                    | ۱                 | ۱/۰۱                      |
| ۳            | ۴۰                    | ۰/۷۶              | ۱/۹۵                      |
| ۴            | ۴۰                    | ۰/۰۵              | ۰/۳۸                      |
| ۵            | ۴۵                    | ۰/۴۱              | ۱/۶۳                      |
| ۶            | ۶۰                    | ۰/۶               | ۲/۳۸                      |
| ۷            | ۶۰                    | ۱                 | ۲/۵۳                      |
| ۸            | ۶۰                    | ۰/۲۵              | ۱/۹۳                      |
| ۹            | ۸۵                    | ۰/۰۵              | ۰/۴۴                      |
| ۱۰           | ۸۵                    | ۰/۵۳              | ۲/۷                       |
| ۱۱           | ۸۵                    | ۱                 | ۴/۰۳                      |
| ۱۲           | ۸۵                    | ۰/۰۵              | ۰/۴۵                      |
| ۱۳           | ۲۵                    | ۱                 | ۱/۰۱                      |
| ۱۴           | ۸۵                    | ۱                 | ۴/۰۳                      |
| ۱۵           | ۲۵                    | ۰/۳۷              | ۰/۸۹                      |
| ۱۶           | ۴۰                    | ۰/۰۵              | ۰/۳۲                      |

نشده اند، اما چون مقدار نهایی آنها در پسماند حاصل از مرحله اول فرآیند لیچینگ قابل توجه نیست، می‌توان از آنها صرف نظر کرد.

جدول ۳. نتایج ترکیب شیمیایی عنصری (درصد وزنی) به روش ICP-OES برای نمونه غبار کوره قوس الکتریکی و پسماند جامد باقی مانده از مرحله اول فرآیند لیچینگ.

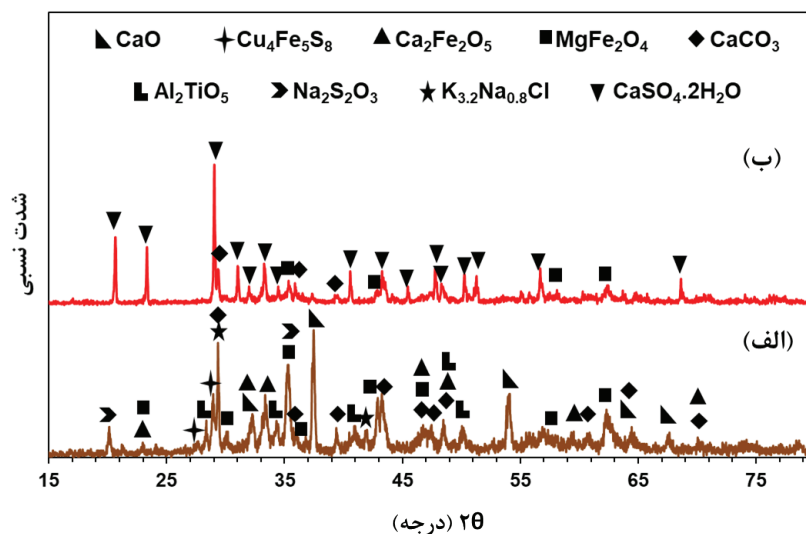
| عنصر | غبار کوره قوس الکتریکی | پسماند جامد باقی مانده از مرحله اول لیچینگ |
|------|------------------------|--------------------------------------------|
| Ca   | ۴۴/۰۶                  | ۵۴/۲۶                                      |
| Fe   | ۲۴/۲۷                  | ۳۱/۲۴                                      |
| Mg   | ۶/۴۹                   | ۸/۵۶                                       |
| Cu   | ۵/۹۹                   | ۰/۲۲                                       |
| Al   | ۱/۲۵                   | ۱/۶۲                                       |
| K    | ۶/۲۵                   | ۰/۶                                        |
| Li   | ۰/۰۲                   | ۰                                          |
| Mn   | ۰/۱۲                   | ۰/۱۶                                       |
| Na   | ۱۰/۴۱                  | ۲/۱۳                                       |
| P    | ۰/۳۷                   | ۰/۱۵                                       |
| Pb   | ۰/۰۶                   | ۰/۰۸                                       |
| Si   | ۰/۵۶                   | ۰/۷۸                                       |
| Ti   | ۰/۱                    | ۰/۱۴                                       |



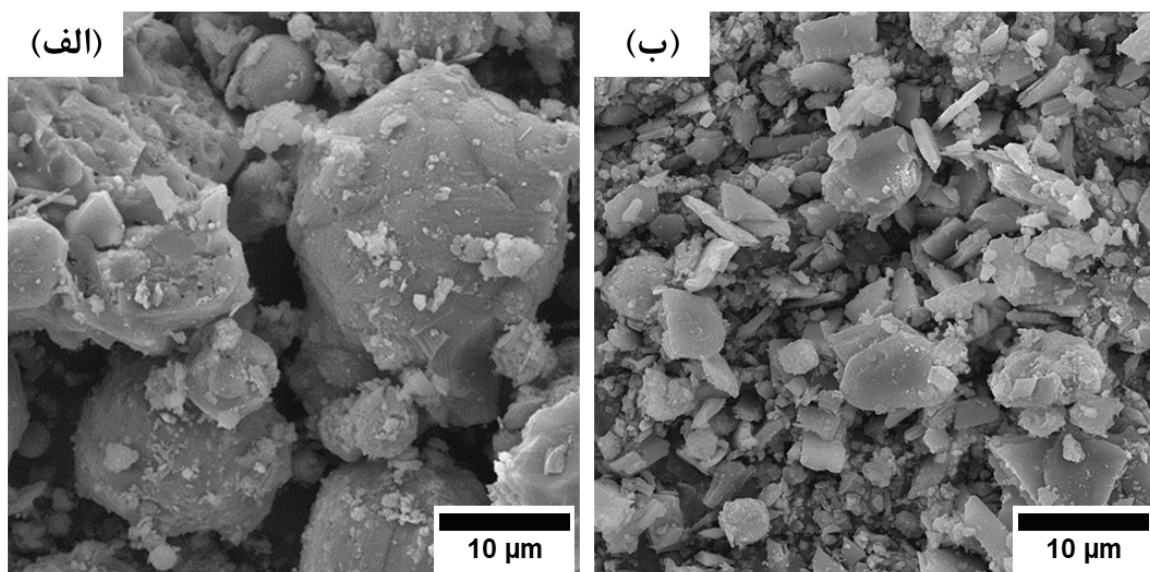
شکل ۲. نمودار اندازه ذرات بر حسب درصد تجمعی عبوری برای نمونه غبار کوره قوس الکتریکی.

نتایج ICP-OES از عناصر تشکیل دهنده غبار کوره قوس الکتریکی و نمونه‌های پسماند حاصل از مرحله اول فرآیند لیچینگ در جدول سه آورده شده است. می‌توان دریافت که مرحله اول فرآیند لیچینگ در حذف قابل توجه ترکیبات پتاسیم، سدیم و مس از گرد و غبار اولیه کوره قوس الکتریکی موفقیت آمیز بوده است. عناصر اصلی تشکیل دهنده پسماند حاصل از مرحله اول فرآیند لیچینگ، کلسیم، آهن و منیزیم هستند. به جز عناصر ذکر شده، اگرچه سایر عناصر غبار اولیه کوره قوس الکتریکی در مرحله اول لیچینگ به خوبی حل





شکل ۳. الگوهای XRD نمونه‌های (الف) غبار کوره قوس الکتریکی تولید فولاد، (ب) پسماند جامد باقی مانده از مرحله اول فرآیند لیچینگ.



شکل ۴. تصاویر FESEM نمونه‌های (الف) غبار کوره قوس الکتریکی تولید فولاد، (ب) پسماند جامد باقی مانده از مرحله اول فرآیند لیچینگ.

انحلال پذیری سولفات کلسیم در آب بسیار اندک است [۳۳]، بیشتر یون‌های کلسیم در ابتدا از  $\text{CaO}$  و  $\text{CaCO}_3$  حل شده و به عنوان سولفات کلسیم (گچ) رسوب می‌کنند. همچنین،  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  و  $\text{CaCO}_3$  از ماده اولیه باقی مانده است. البته  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  به صورت جزئی در مرحله اول انحلال یافت اما به علت غلظت اندک اسید در این مرحله و سینتیک انحلال بسیار سریع‌تر کلسیم نسبت به منیزیم و آهن، کلسیم بسیار بیشتر حل شد [۸].

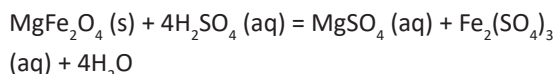
همان طور که در شکل چهار (الف) نشان داده شده است، ذرات موجود در غبار اولیه کوره قوس الکتریکی بیشتر کروی و آگلومره<sup>۲۱</sup> شده اند. اندازه ذرات در کل نمونه یکنواخت

21. Agglomerated

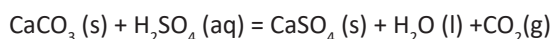
الگوهای XRD از غبار اولیه کوره قوس الکتریکی و پسماند حاصل از مرحله اول فرآیند لیچینگ در شکل سه نشان داده شده است. فازهای مختلف از جمله  $\text{CaO}$ ،  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ،  $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ،  $\text{K}_{3.2}\text{Na}_{0.8}\text{Cl}$ ،  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ،  $\text{CaCO}_3$ ،  $\text{Cu}_4\text{Fe}_5\text{S}_8$  و  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$  در الگوی XRD غبار کوره قوس الکتریکی اولیه شناسایی شد. (شکل سه (الف)). فازهای حاوی عناصر  $\text{Si}$  و  $\text{Mn}$  احتمالاً به دلیل کم بودن آنها مشاهده نشده اند. الگوی XRD نمونه پسماند حاصل از مرحله اول فرآیند لیچینگ در شکل سه (ب) نشان می‌دهد که تنها سه فاز اصلی  $\text{CaCO}_3$ ،  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  و  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  پس از اولین مرحله لیچینگ در نمونه باقی مانده است. از آنجا که حلالیت کلسیم در سولفوریک اسید با غلظت ۰/۱ مولار محدود است (ضریب

سپس کربنات کلسیم با توجه به واکنش ۶ به سولفات کلسیم تبدیل شد.

(۵)



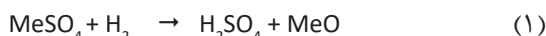
(۶)



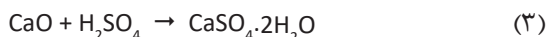
با توجه به درجه حرارت نسبتاً زیاد و غلظت اسید بالا در مرحله دوم لیچینگ، کلسیم موجود در سولفات کلسیم تولید شده در واکنش ۶ به همراه گچ باقیمانده در پسماند حاصل از مرحله اول فرآیند لیچینگ تا حدی به محلول لیچینگ مرحله دوم وارد می‌شود. با توجه به این نکته که مقدار یون‌های  $\text{Ca}^{2+}$  در محلول توسط حلالیت محدود آن‌ها تعیین می‌شود، آن‌ها با کاهش دما دوباره به صورت گچ رسوب می‌کنند. بنابراین، علاوه بر یون‌های  $\text{Fe}^{3+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$ ، یون‌های  $\text{Ca}^{2+}$  نیز در محلول لیچینگ مرحله دوم وجود دارند. اما به دلیل تشکیل رسوب گچ، مقدار یون‌های  $\text{Ca}^{2+}$  اندازه گیری شده در محلول لیچینگ مرحله دوم نسبت به مقدار  $\text{Ca}$  در پسماند حاصل از مرحله اول فرآیند لیچینگ بسیار کمتر است. در یک دید کلی، مقادیر قابل توجهی از گچ طی آزمایشات تولید شد. به طور کلی این مسئله نامطلوب تلقی می‌شود چون باعث کاهش راه‌یابی مقدار کلسیم به محلول نهایی می‌شود، اما در این پژوهش که هدف به حداکثر رساندن نسبت لیچینگ یون آهن به کلسیم بود پدیده‌ای مفید تلقی شد. مقادیر  $\Delta G$  در واکنش ۵ در دامنه دمایی ۲۵ تا ۸۵ درجه سانتیگراد بین ۲۷۲- تا ۲۶۷- کیلوژول است. مقادیر  $\Delta G$  در واکنش ۶ در همان دامنه دمایی بین ۱۴۷- تا ۱۳۸- کیلوژول است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمام این بازه دمایی، مقادیر  $\Delta G$  منفی است، بنابراین اگر از سینتیک واکنش‌ها چشم پوشی شود، همه‌ی واکنش‌ها به طور خود به خود رخ می‌دهند. مطالعه ترمودینامیکی نیز توسط دیاگرام‌های پوربه انجام شد. تعادل بین فازهای جامد و محلول در حین لیچینگ را می‌توان با این نمودارها توجیه کرد. ترکیب محلول، متغیر اصلی در تعیین حالت‌های تعادل است. تعداد یون‌هایی که از فاز جامد جدا می‌شوند و وارد فاز محلول می‌شوند به دما بستگی دارد، بنابراین در یک دمای ثابت می‌توان تعداد یون‌های وارد فاز محلول را به صورت دیاگرام پوربه را ترسیم کرد. سرانجام با در نظر گرفتن پایداری فاز مایع به عنوان عامل اصلی و پایداری فاز جامد به عنوان عامل متغیر، می‌توان تغییرات فاکتور متغیر را تعیین و از نمودار برای پیش بینی شرایط عمومی محلول استفاده کرد. دیاگرام‌های پوربه از طریق نرم افزار HSC Chemistry 6.0 (Outokumpu، ساخت کشور فنلاند) محاسبه شد. همان‌طور که در شکل پنج نشان داده شده

نیست و بیشتر ذرات کمتر از ۲۵ میکرون هستند که با تجزیه و تحلیل اندازه ذرات در شکل دو مطابقت دارد. همان‌طور که در شکل چهار (ب) دیده می‌شود، ذرات ریزتری را می‌توان در پسماند حاصل از مرحله اول فرآیند لیچینگ مشاهده کرد، متوسط اندازه ذرات در این نمونه تقریباً ۳ میکرون است. روش‌های مختلفی برای لیچینگ و بازیابی منیزیم و کلسیم از کانه‌هایش گزارش شده است. چون کاتیون‌های آهن، منیزیم و کلسیم حالت دو ظرفیتی ( $\text{Me}^{2+}$ : Me فلز) دارند، نمک‌های آن‌ها به صورت مستقیم توسط لیچینگ اسیدی (سولفوریک اسید) حل می‌شوند [۳۴].

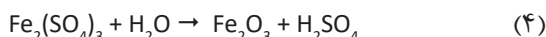
همان‌طور که پیش تر گفته شد، از اجزای غبار کوره قوس الکتریکی تولید فولاد، اکسید کلسیم، آهن و منیزیم است. اکسید منیزیم و آهن دو ظرفیتی به راحتی و با سرعت بالا مطابق واکنش ۱ و ۲ در سولفوریک اسید حل می‌شوند [۳۴]:



انحلال پذیری سولفات آهن، منیزیم و کلسیم در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد در آب به ترتیب ۲۵/۶، ۳۳/۷ و ۲۵۵/۰ گرم بر مول است. این انحلال پذیری بالا برای آهن دو ظرفیتی و منیزیم نشان دهنده حلالیت مناسب این ترکیب‌ها در محیط آبی است و منجر به حضور یون‌های  $\text{Me}^{2+}$  در محلول خواهد شد [۳۴]. اما برخلاف دو ترکیب ذکر شده، سولفات کلسیم در اثر لیچینگ با سولفوریک اسید مطابق واکنش ۳ تشکیل سولفات کلسیم دو آب ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) را می‌دهد، که بسیار کم محلول است [۸]. مقدار  $\Delta G$  عامل اصلی در تعیین خود به خودی بودن یک واکنش است. مقادیر  $\Delta G$  در واکنش ۳ در دامنه دمایی ۲۵ تا ۸۵ درجه سانتیگراد، که بسیار نزدیک به دمایی است که آزمایشها انجام شده است، بین ۲۶۹- تا ۲۶۷- کیلوژول است.



البته انحلال پذیری این جزء با افزایش دما افزایش می‌یابد [۸]. اکسید آهن سه ظرفیتی در سولفوریک اسید مطابق با واکنش ۴ حل می‌شود [۸]:



مقادیر  $\Delta G$  در واکنش ۴ در دامنه دمایی ۲۵ تا ۸۵ درجه سانتیگراد بین ۱۶۲- تا ۱۶۵- کیلوژول است. مرحله دوم لیچینگ روی پسماند حاصل از مرحله اول فرآیند لیچینگ حاوی سه فاز اصلی  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ،  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  و  $\text{CaCO}_3$  انجام شد. واکنش‌های اصلی که احتمالاً در مرحله دوم لیچینگ رخ داده است به صورت واکنش‌های ۵ و ۶ است. در ابتدا یون‌های  $\text{Fe}^{3+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$  با توجه به واکنش انحلال ۵ ایجاد می‌شوند.



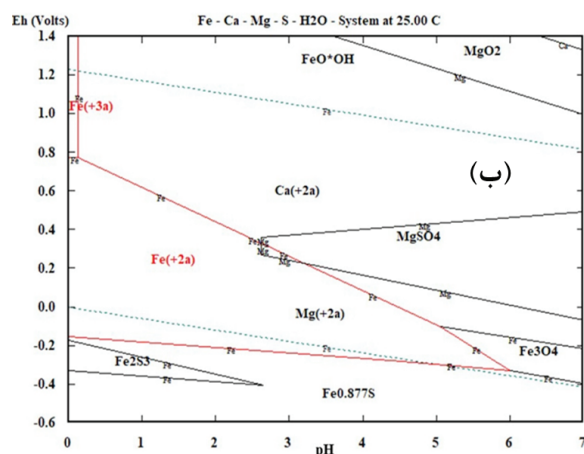
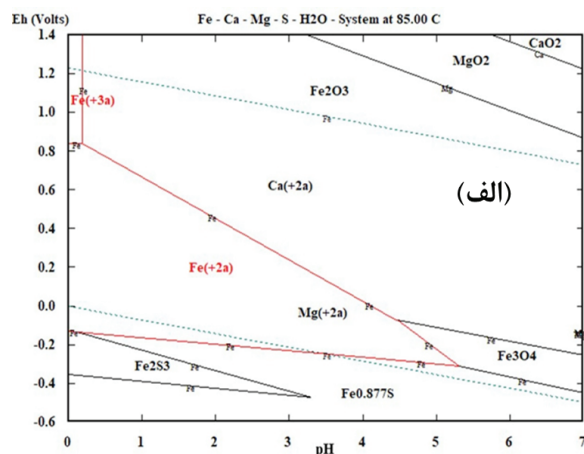
از تجزیه و تحلیل آماری برای بهینه سازی نسبت بازیافت آهن به کلسیم استفاده شد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود، می توان پیشنهاد کرد که با افزایش دما و غلظت اسید، حلالیت آهن، منیزیم و کلسیم افزایش می یابد. شایان ذکر است که با کاهش دما تا دمای محیط پس از اجرای آزمایش ها، مقدار قابل توجهی کلسیم به دلیل حلالیت محدود در دمای محیط رسوب می کند. مدل زیر می تواند برای نسبت بازیابی آهن به کلسیم پیشنهاد شود:

$$F/C = 1.66 + 0.83 A + 1.06 B \quad (7)$$

که در آن، A و B به ترتیب نماینده ی دمای لیچینگ بر حسب درجه سانتی گراد و غلظت مولار اسید هستند. افزایش غلظت اسید و دمای لیچینگ هر دو تأثیر مثبتی بر نسبت بازیابی آهن به کلسیم دارند. با این حال، غلظت اسید موثرتر از دما شناخته شد. بر اساس هدف پژوهش، یعنی بهینه سازی شرایط لیچینگ غبار کوره قوس الکتریکی به منظور بیشینه بازیابی نسبت آهن به کلسیم، طراحی مدلی با در نظر گرفتن سطوح مختلف فاکتورها مد نظر است. در این راستا، به منظور تحلیل آماری نتایج، نتایج آنالیز واریانس<sup>۲۲</sup> بررسی شد و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر p-value کمتر از ۰/۰۵ نشان می دهد که پارامتر مورد بررسی در مدل دارای اهمیت است و مقادیر بالاتر از ۰/۱ نشان از عدم اهمیت دارد. با توجه به تحلیل های انجام شده، در این مدل پارامترهای غلظت اسید و دمای حل سازی، فاکتورهای با اهمیت در این مدل به شمار می روند. در مجموع نیز مقدار ۲۰/۰۱ برای F value و ۰/۰۰۰۱ برای P value با اهمیت بودن مدل پیشنهادی را تایید می کند.

شکل شش (الف) تأثیر غلظت اسید بر نسبت بازیابی آهن به کلسیم را در بالاترین و کمترین دمای اعمال شده نشان می دهد. می توان دریافت که مقدار نسبت بازیابی آهن به کلسیم با افزایش غلظت اسید از ۰/۰۵ به ۱ مولار در ۲۵ درجه سانتی گراد تقریباً ۹ برابر بیشتر شده است. شکل شش (ب) همچنین یک تصویر گرافیکی از سطح پاسخ را نشان می دهد، که به عنوان طرح کانتور<sup>۲۳</sup> شناخته می شود و شبیه سازی از معادله ۷ است. این نمودار نشان دهنده اثر ترکیبی عوامل دمای لیچینگ و غلظت اسید است در صورتی که سایر عوامل ثابت باشند. همچنین برای درک بهتر مقادیر مختلف مقدار نسبت بازیابی آهن به کلسیم در دماهای مختلف لیچینگ و غلظت های مختلف اسید، مقایسه بهتری نسبت به شکل شش (الف) انجام می شود و دوباره نشان می دهد که افزایش دمای لیچینگ و غلظت اسید، مقدار نسبت بازیابی آهن به کلسیم را افزایش می دهد. بنابراین، انتخاب دمای لیچینگ و غلظت اسید برای به حداکثر رساندن مقدار نسبت بازیابی آهن به

است، در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد، یون های  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  به طور گسترده ای در محدوده اسیدی pH در منطقه پایداری آب حل می شوند. با کاهش دما تا ۲۵ درجه سانتیگراد، غلظت اسید نقش مهمی در لیچینگ این یون ها دارد. بر این اساس، منطقه لیچینگ این یون ها کاهش می یابد و با افزایش pH، سولفات های این فلزات تشکیل می شوند. لازم به ذکر است که حلالیت سولفات منیزیم بسیار بیشتر از سولفات کلسیم در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد است، بنابراین بیشتر سولفات کلسیم در این دما رسوب می کند. در مورد Fe، همان طور که در شکل پنج نشان داده شده است، پایداری یون  $Fe^{3+}$  در یک محدوده pH بسیار کم (نزدیک به صفر) و بالاتر از ۰/۷۷ ولت است. پیش بینی شده است که برای داشتن  $Fe^{3+}$  بیشتر علاوه بر آهن در مرحله دوم لیچینگ، غلظت بالای اسید برای نزدیک شدن به pH ذکر شده مورد نیاز است. همچنین دیده می شود که افزایش دما اندکی دامنه پایداری  $Fe^{3+}$  را افزایش داده است. بنابراین، می توان پیش بینی در مورد افزایش غلظت اسید را برای افزایش درجه حرارت برای دستیابی به  $Fe^{3+}$  بیشتر تکرار کرد.



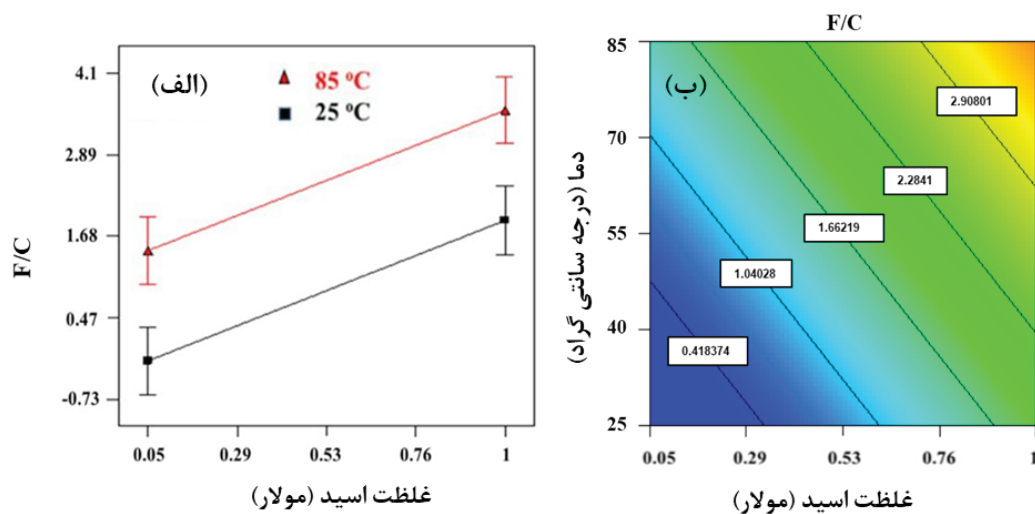
شکل ۵. دیاگرام های پوربه برای سیستم کلسیم، آهن، منیزیم، گوگرد و آب در (الف) ۸۵ و (ب) ۲۵ درجه سانتی گراد.

22. Analysis of variance (ANOVA)

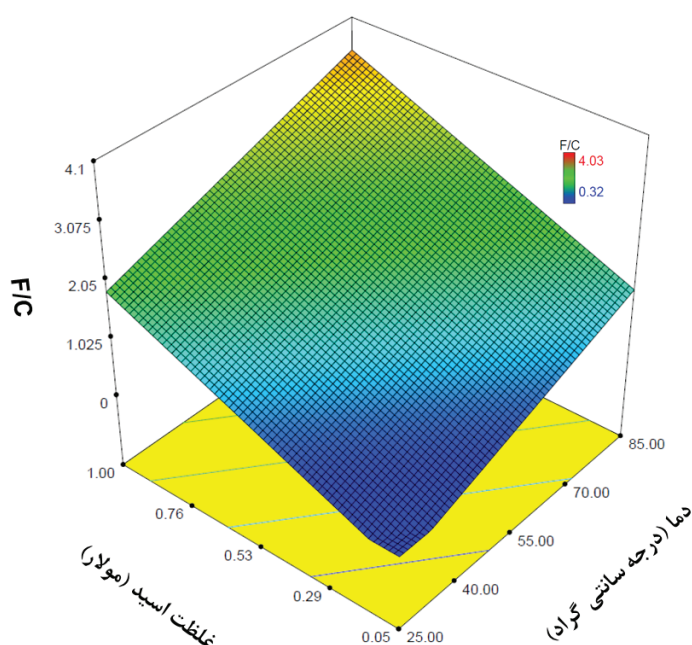
23. Contour

جدول ۴. جدول آنالیز واریانس بیشینه بازیافت آهن به کلسیم.

| عامل           | مقدار P | مقدار F | حداقل مربعات | درجه آزادی | مجموع مربعات |
|----------------|---------|---------|--------------|------------|--------------|
| مدل            | ۰/۰۰۰۱  | ۲۰/۰۱   | ۸/۴          | ۲          | ۱۶/۷۹        |
| دما-A          | ۰/۰۰۱۶  | ۱۵/۸۹   | ۶/۶۷         | ۱          | ۶/۶۷         |
| غلظت-B         | ۰/۰۰۰۲  | ۲۵/۷    | ۱۰/۷۹        | ۱          | ۱۰/۷۹        |
| باقیمانده      |         |         | ۰/۴۲         | ۱۳         | ۵/۴۶         |
| نقصان از برازش | <۰/۰۰۰۱ | ۱۰۹۹/۲۳ | ۰/۶۸         | ۸          | ۵/۴۵         |
| خطای محض       |         |         | ۰/۰۰۰۶۲      | ۵          | ۰/۰۰۳۱       |



شکل ۶. (الف) تاثیر غلظت اسید بر F/C در دماهای ۲۵ و ۸۵ درجه سانتی گراد، (ب) تاثیر همزمان غلظت اسید و دمای لیچینگ بر F/C.



شکل ۷. نمودار رویه سه بعدی تاثیر تغییر همزمان دما و غلظت اسید (در نقطه مرکزی دمای ۵۵ درجه سانتی گراد و غلظت اسید ۰/۵۲۵ مولار).

## References

- [1] B. Das, S. Prakash, P. Reddy, and V. Misra, "An overview of utilization of slag and sludge from steel industries," *Resources, conservation and recycling*, vol. 50, pp. 40-57, 2007.
- [2] P. Oustadakis, P. Tsakiridis, A. Katsiapi, and S. Agatzini-Leonardou, "Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD): Part I: Characterization and leaching by diluted sulphuric acid," *Journal of hazardous materials*, vol. 179, pp. 1-7, 2010.
- [3] م. معارف وند، س. شیبانی، and ف. رشچی، «بهینه سازی و مطالعه سینتیکی فرآیند حل سازی در بازیابی گالیم از LED مستعمل»، *مهندسی متالورژی*, vol. 23, pp. 130-118, 2020.
- [4] M. Kamali, S. Sheibani, and A. Ataie, "Effect of calcination temperature on photocatalytic activity of magnetic Fe-based composites recycled from hazardous EAF dust," *Materials Research Bulletin*, p. 111688, 2021.
- [5] M. Kamali, S. Sheibani, and A. Ataie, "Magnetic MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> S-scheme photocatalyst prepared from recycling of electric arc furnace dust," *Journal of Environmental Management*, vol. 290, p. 112609, 2021.
- [6] T. Havlík, B. V. e Souza, A. M. Bernardes, I. A. H. Schneider, and A. Mišková, "Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 135, pp. 311-318, 2006.
- [7] T. Havlik, M. Turzakova, S. Stopic, and B. Friedrich, "Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid," *Hydrometallurgy*, vol. 77, pp. 41-50, 2005.
- [8] F. Kukurugya, 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*, vol. 154, pp. 20-32, 2015.
- [9] M. Al-Harashsheh, J. Al-Nu'airat, A. Al-Otoom, H. Al-jabali, and M. Al-zoubi, "Treatments of electric arc furnace dust and halogenated plastic wastes: A review," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, p. 102856, 2019.
- [10] L. K. Wang, Y.-T. Hung, and N. K. Shammass, *Handbook of advanced industrial and hazardous wastes treatment*: CRC press, 2009.
- [11] M. Alizadeh and M. Momeni, "The effect of the scrap/DRI ratio on the specification of the EAF dust and its influence on mechanical properties of the concrete treated by its dust," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 1041-1045, 2016.
- [12] M. A. Alsheyab and T. S. Khedaywi, "Effect of electric arc furnace dust (EAFD) on properties of asphalt cement mixture," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 70, pp. 38-43, 2013.
- [13] P. K. Hazaveh, S. Karimi, F. Rashchi, and S. Sheibani, "Purification of the leaching solution of recycling zinc from the hazardous electric arc furnace dust through an as-bearing jarosite," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 202, p. 110893, 2020.
- [14] M. Khanlarian, F. Rashchi, and M. Saba, "A modified sulfation-roasting-leaching process for recovering Se, Cu, and Ag from copper anode slimes at a lower temperature," *Journal of environmental management*, vol. 235, pp. 303-309, 2019.
- [15] V. Montenegro, S. Agatzini-Leonardou, P. Oustadakis, and P. Tsakiridis, "Hydrometallurgical treatment of EAF dust by direct sulphuric acid leaching at atmospheric pressure," *Waste and biomass valorization*, vol. 7, pp. 1531-1548, 2016.

کلسیم، به ترتیب ۸۵ درجه سانتی گراد و ۱ مولار بود که باعث می شود مقدار نسبت بازیابی آهن به کلسیم به ۴/۰۳ برسد. از محلول نهایی به دست آمده می توان به عنوان منبعی از آهن برای تولید ترکیباتی مثل فریت ها طی فرآیندهایی مانند رسوب دهی استفاده شود.

شکل هفت، رویه سه بعدی پاسخ مربوط به تغییر همزمان غلظت اسید و دما را نشان می دهد. با توجه به شکل هفت، تاثیر تغییر غلظت اسید در دمای بالاتر، و تاثیر تغییر دما در غلظت اسید بالاتر، تشدید می شوند. به این ترتیب می توان دریافت که برای به حداکثر رساندن F/C، افزایش دما یا غلظت اسید به تنهایی کافی نیست و این دو عامل متقابلاً روی پارامتر F/C موثرند.

## ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش یک فرآیند به منظور بازیابی محلولی غنی از عناصر آهن، کلسیم و منیزیم از غبار کوره قوس الکتریکی به روش هیدرومتالورژی، پیشنهاد شده است. این فرآیند شامل دو مرحله است. برخی از نتایج بدست آمده از این پژوهش به قرار زیر است:

۱. شرایط بهینه لیچینگ غبار کوره قوس الکتریکی به منظور دستیابی به غنی ترین محلول از عناصر ذکر شده، یک لیچینگ دو مرحله ای به دست آمد.
۲. به منظور دستیابی به شرایط بهینه و با انجام آزمون های اولیه، دما و غلظت اسید در مرحله اول به ترتیب ۲۵ درجه سانتی گراد و ۰/۱ مولار و در مرحله دوم به ترتیب ۸۵ درجه سانتی گراد و ۱ مولار انتخاب شد.
۳. مقدار نسبت آهن به کلسیم تحت شرایط بهینه تقریباً برابر ۴ بود که نسبت به ترکیب شیمیایی ابتدایی غبار کوره قوس الکتریکی، هشت برابر بیشتر است.
۴. در بین متغیرهای بررسی شده برای به حداکثر رساندن نسبت بازیابی آهن به کلسیم، غلظت سولفوریک اسید موثرتر از دمای لیچینگ ارزیابی شد.
۵. با استفاده از نرم افزار Design Expert مدلی به منظور پیش بینی مقدار پاسخ فرآیند حل سازی معرفی شده که بررسی آماری نتایج حاصل از فرآیند حل سازی، نشان می دهد که این مدل ارائه شده دارای صحت و دقت کافی می باشد.
۶. برای به حداکثر رساندن نسبت آهن به کلسیم، افزایش دما یا غلظت اسید به تنهایی کافی نیست و این دو عامل متقابلاً روی این پارامتر موثر هستند.

- [16] C. Jarupisiththorn, T. Pimpong, and G. Lothongkum, "Investigation of kinetics of zinc leaching from electric arc furnace dust by sodium hydroxide," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 77, pp. 531-535, 2003.
- [17] H.-g. Wang, J.-m. Gao, W. Liu, M. Zhang, and M. Guo, "Recovery of metal-doped zinc ferrite from zinc-containing electric arc furnace dust: Process development and examination of elemental migration," *Hydrometallurgy*, vol. 166, pp. 1-8, 2016.
- [18] D. Herrero, P. Arias, B. Güemez, V. Barrio, J. Cambra, and J. Requies, "Hydrometallurgical process development for the production of a zinc sulphate liquor suitable for electrowinning," *Minerals engineering*, vol. 23, pp. 511-517, 2010.
- [19] V. Montenegro, P. Oustadakis, P. E. Tsakiridis, and S. Agatzini-Leonardou, "Hydrometallurgical treatment of steelmaking electric arc furnace dusts (EAFD)," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 44, pp. 1058-1069, 2013.
- [20] B. Behnajady and J. Moghaddam, "Selective leaching of zinc from hazardous As-bearing zinc plant purification filter cake," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 117, pp. 564-574, 2017.
- [21] J.-j. Liu, G.-r. Hu, K. Du, Z.-d. Peng, and Y.-b. Cao, "Influencing factors and kinetics analysis of a new clean leaching process for producing chromate from Cr-Fe alloy," *Journal of cleaner production*, vol. 84, pp. 746-751, 2014.
- [22] C.-H. Lee, Y.-J. Chen, C.-H. Liao, S. R. Popuri, S.-L. Tsai, and C.-E. Hung, "Selective leaching process for neodymium recovery from scrap Nd-Fe-B magnet," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44, pp. 5825-5833, 2013.
- [23] K. H. Park, D. Mohapatra, and B. R. Reddy, "A study on the acidified ferric chloride leaching of a complex (Cu-Ni-Co-Fe) matte," *Separation and purification technology*, vol. 51, pp. 332-337, 2006.
- [24] A. Abdallah, K. K. El, A. K. El, Y. Darmane, and K. Said, "Kinetic study of the manganese mine tailings leaching by organic reductant in sulfuric acid solution," *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*, vol. 51, pp. 29-39, 2015.
- [25] P. Halli, V. Agarwal, J. Partinen, and M. Lundström, "Recovery of Pb and Zn from a citrate leach liquor of a roasted EAF dust using precipitation and solvent extraction," *Separation and Purification Technology*, vol. 236, p. 116264, 2020.
- [26] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*: John Wiley & Sons, 2017.
- [27] X. Chen, H. Wang, and B. Yan, "Sulfuric acid leaching and recovery of vanadium from a spinel concentrate beneficiated from stone coal ore," *Hydrometallurgy*, vol. 191, p. 105239, 2020.
- [28] L. Jia, B. Liang, L. Lü, S. Yuan, L. Zheng, X. Wang, et al., "Beneficiation of titania by sulfuric acid pressure leaching of Pan-zhuhua ilmenite," *Hydrometallurgy*, vol. 150, pp. 92-98, 2014.
- [29] R. A. Pepper, S. J. Couperthwaite, and G. J. Millar, "Comprehensive examination of acid leaching behaviour of mineral phases from red mud: Recovery of Fe, Al, Ti, and Si," *Minerals Engineering*, vol. 99, pp. 8-18, 2016.
- [30] L. Wang, Y. Zhang, T. Liu, J. Huang, N. Xue, and Q. Zheng, "Separation of iron impurity during vanadium acid leaching from black shale by yavapaiite-precipitating method," *Hydrometallurgy*, vol. 191, p. 105191, 2020.
- [31] T. Gominšek, A. Lubej, and C. Pohar, "Continuous precipitation of calcium sulfate dihydrate from waste sulfuric acid and lime," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, vol. 80, pp. 939-947, 2005.
- [32] A. E. Van Driessche, T. M. Stawski, L. G. Benning, and M. Kellermeier, "Calcium sulfate precipitation throughout its phase diagram," in *New perspectives on mineral nucleation and growth*, ed: Springer, 2017, pp. 227-256.
- [33] D. Damidot and F. Glasser, "Thermodynamic investigation of the  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaSO}_4-\text{H}_2\text{O}$  system at 25° C and the influence of  $\text{Na}_2\text{O}$ ," *Cement and concrete research*, vol. 23, pp. 221-238, 1993.
- [34] W. Liu, F. Huang, Y. Wang, T. Zou, J. Zheng, and Z. Lin, "Recycling  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  nano-adsorbent during treating the low concentration of  $\text{CrVI}$ ," *Environmental science & technology*, vol. 45, pp. 1955-1961, 2011.