دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال چهاردهم، شماره‌ی ٥٤
تابستان ١٤٠٢، صفحات ٣٦-٢٧

بررسی کاهش سمیت باطله‌های حاصل از واحد فرآوری استحصال روی به روش استخراج حلال

حمید راحتی آسیابر
آلودگی محیط زیست، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مهدی برقعی
آلودگی محیط زیست، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

رویا مافی غلامی*
آلودگی محیط زیست، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
Email: r.mafigholami@wtiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳

چکیده

در این پژوهش، توانایی استخراج حلال در بازیابی روی از نمونه‌های باطله واحد استحصال روی زنجان، مورد بررسی قرار گرفته است. این کیک به ترتیب حاوی ppm ۱۸۰۰۸۰، ۲۶۸۴۰، ۱۴۱۰۴۰ و ۲۵۴۰۹۰ گوگرد، نیکل، کادمیوم و روی بود. استخراج روی با استفاده از حلال آلی Cyanex 272 انجام شد. متغیرهای مورد بررسی شامل pH (در محدوده ۰ تا ۱/۵)، زمان (در محدوده ۱ تا ۶ ساعت)، دما (۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد) و نسبت مواد جامد به محلول (۱۰ تا ۳۰ درصد) بودند. طراحی آزمایشات در نرم افزار Design-Expert نسخه ۷ و با استفاده از طراحی مرکب مرکزی (CCD) انجام شد. pH در محدوده‌ی تاثیرگذارترین و دما کم اهمیت‌ترین پارامتر بود. بالاترین راندمان با ۱۰۰ درصد در pH ۰، درجه حرارت ۸۰ درجه سانتی گراد، نسبت جامدات به محلول ۳۰ درصد و زمان ۶ ساعت اندازه‌گیری شد. کم‌ترین راندمان حذف روی با ۷۶/۶ درصد در pH ۱/۵، دمای ۶۰، نسبت جامدات به محلول ۱۰ درصد و زمان ۳/۵ ساعت رخ داد. با توجه به میانگین راندمان حذف روی ۸۹/۱۰ درصد، ترکیب استفاده از حلال Cyanex 272 و pH، روشی مناسب برای استحصال روی از ضایعات کیک سرد بوده و این روش دارای عملکرد بالایی است.

کلید واژه: روی، استحصال، باطله‌های صنعتی، حلال.

مقدمه

روی در حال حاضر چهارمین فلز پس از آهن، آلومینیوم و مس از نظر مصرف در سراسر جهان محسوب می‌شود و پیش بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۸ میزان مصرف به ۱۹۶۶۲ هزار تن خواهد رسید [۱]. از این رو توسعه معادن جدید برای پر کردن شکاف عرضه در چند سال آینده بسیار ضروری است. کانی-های روی به صورت سولفید، اکسید، کربنات و سیلیکات وجود دارند. کنسانتره سولفید روی به عنوان ماده خام برای تولید بیش از ۸۵ درصد از کل روی در سراسر جهان استفاده می‌شود [۲]. رو به پایان بودن منابع اولیه معدنی، گسترش استفاده از روی در صنایع مختلف، استفاده از مواد خام ثانویه و یا باطله‌های حاصله را به یک روش سریع در دستیابی به مواد در صنعت متالوژی تبدیل کرده است [۳]. روش‌های مرسوم فرآوری روی در دهه‌های گذشته لیچینگ و یا استفاده از الکترود بوده است با این حال، اخیرا روش‌هایی نظیر استخراج با حلال، تبادل یونی و رسوب شیمیایی به عنوان روش‌های جدید برای خالص‌سازی روی استفاده شده است.

در این میان روش فرآیند استخراج حلال به دلیل استفاده از حلال‌های گوناگون و عوامل استخراج کننده مختلف یک تکنیک موثر برای استخراج فلزات مختلف از محلول‌ها استفاده می‌شود [۴]. اما سمیت و قابلیت اشتعال حلال‌ها آلی و قیمت بالای این حلال‌ها، از معایت این روش است که سبب جایگزینی روش‌هایی همانند سیستم‌های دو فازی آبی شده است که علاوه بر دوستدار محیط زیست بودن از نظر اقتصادی نیز به صرف هستند.

در این روش فلزهای موجود در فاز آبی برای تشکیل کمپلکس آلی فلزی با یک ماده آلی واکنش می‌دهند و بنابراین اجزای فلز، فاز آبی را ترک کرده و وارد فاز آلی می‌شوند [۵]. از جمله مطالعات انجام شده بر روی کارایی روش استخراج حلال در جداسازی فلزات سنگین می‌توان به مطالعه‌ی آلورنی مارتینز و همکاران [۳] در جداسازی روی و مس از ضایعات برنج، طهماسب‌زاده و جوانشیر [۴] استخراج روی از محلول بیولیچینگ با استفاده از حلال و سپیولودن و همکاران [۲] جداسازی فلزات مس، آهن، روی و منگنز از محلول لیچینگ حاوی مس اشاره کرد.

باطله‌های استخراج شده حاوی عناصری اصلی و کمیاب و با ارزشی هستند که با توجه به شیوه‌های استخراجی کنونی قابل استفاده نمی‌باشند. از طرفی این باطله‌ها حاوی عناصری هستند که به دلیل ساختار غیر طبیعی‌شان، می‌توانند برای محیط زیست خطرناک باشند [۶]. با توجه به اینکه در یک معدن به ازای هر تن مس حدودا بیش از ۹۹ تن باطله‌های ریز دانه تولید می‌شود که این حجم بالا، خطراتی نظیر ایجاد زه‌آب اسیدی، نشت و ورد فلزات سنگین و نیز موادی نظیر سیانیدها و اسید سولفوریک را به خاک در پی‌دارد.

حذف فلزات سنگین به صورت کلی از دیدگاه جداسازی و کاهش اثرات فلزات سنگین سمی به خصوص از باطله‌های معدنی و یا حتی از معادن و بازیافت فلزات سنگین که در صنعت پرکاربرد بوده و با کاهش تدریجی منابع معدنی موضوعی ضروری است [۷]. از این در این مطالعه، کارایی استفاده از روش استخراج حلال در کاهش سمیت باطله‌های حاصل از واحد فراوری استحصال روی از طریق افزایش خروج فلز روی از باطله‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

– شناسایی مواد

در این پژوهش، توانایی استخراج حلال در بازیابی روی از نمونه‌های باطله واحد استحصال روی زنجان، مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های کیک به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس خشک و توسط آسیای گلوله‌ای خرد شدند. مقادیر عناصر موجود در کیک سرد با آنالیز طیف سنجی پلاسمای جفت شده القایی (ICP[1]) (Viarian, USA) اندازه‌گیری شد.

[1] Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP)

جدول ۱- آنالیز کیک سرد نمونه‌های باطله واحد استحصال روی زنجان (ppm)

گوگرد	نیکل	کادمیوم	روی
۱۸۰۰۸۰	۲۶۸۴۰	۱۴۱۰۴۰	۲۵۴۰۹۰

- آزمایش استخراج حلالی

Cyanex 272 و D_2EHPA از بین استخراج کننده‌های آلی، در دسترس‌ترین و اقتصادی‌ترین گزینه‌های مورد استفاده در فرآیند استخراج حلالی هستند. براساس پیش آزمایشات انجام شده Cyanex 272 (با ۱/۸۵ درصد) در مقایسه با D_2EHPA (با ۱/۳ درصد)، توانایی بالاتری در جدایش (β) (معادله ۱) روی در pH حدود ۲-۱ از کیک سرد داشت. فرایند استریپ کردن با استفاده از H_2SO_4 برای جداسازی یون‌های روی از محلول آلی Cyanex 272 انجام شد. راندمان جداسازی روی با H_2SO_4، ۲ و ۵ مولار از 1M Cyanex272 به ترتیب ۹۸/۸ و ۹۹/۷ درصد بود.

$$\beta = \frac{D_{Ni}}{D_{Zn}} \quad (۱)$$

آزمایش‌های استخراج در راکتور شیشه‌ای دو لیتری دارای کندانسور (IKAGKS 130 Basic) که در درون حمام گرم پارافینی برای تنظیم دما و همزن مکانیکی برای ایجاد حرکت، قرار گرفته بود، انجام شد. آزمایشات براساس خروجی نرم افزار طراحی آزمایش Desigh-Expert انجام و در انتهای میزان روی محلول باقی مانده، توسط طیف سنجی پلاسمای جفت شده القایی (Viarian, USA)(TCLP[2]) اندازه‌گیری شد.

- طراحی آزمایش

در این تحقیق از نرم افزار Desigh-Expert برای بهینه‌سازی فرآیند استخراج حلالی از کیک سرد استفاده شد. فاکتورهای آزمایش، شامل pH، نسبت s/l، دما و زمان هستند، که این چهار فاکتور در ۳ سطح کمینه، بیشینه و میانه بررسی شده‌اند. در جدول ۲، فاکتورهای مورد آزمایش و بازه تغییرات آن‌ها آورده شده است.

جدول۲- فاکتورهای مورد آزمایش

A	pH	-	Numeric	۰	۱/۵۰	-۱ ↔۰	+۱ ↔ ۱/۵۰
B	time	h	Numeric	۱	۶	-۱ ↔۱	+۱ ↔۶
C	Temp.	C	Numeric	۶۰	۸۰	-۱ ↔۶۰	+۱ ↔۸۰
D	s/l	%	Numeric	۱۰	۳۰	-۱ ↔۱۰	+۱ ↔۳۰

یافته‌ها و بحث

بر اساس اطلاعات داده شده به نرم افزار، تعداد ۲۷ آزمایش طراحی شد که در جدول ۳، ارائه شده است.

با انجام آزمایش‌های مشخص شده، تاثیر پارامترهای مختلف در کنار هم، بر راندمان انحلال روی مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به جدول زیر، بالاترین راندمان حذف با ۹۸، ۹۸/۱ و ۱۰۰ درصد در ردیف‌های آزمایش ۱۷، ۲۷ و ۲۰ اندازه-گیری شد.

[2] Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP)

جدول ۳- محدوده و متغییرهای در نظر گفته توسط نرم افزار Desigh-Expert جهت انجام استخراج حلالی

	pH	زمان (ساعت)	درجه حرارت (سانتی‌گراد)	نسبت s/l (درصد)	حذف روی (درصد)
۱	۰/۷۵	۳/۵	۷۰	۲۰	۹۰/۲
۲	۰/۷۵	۳/۵	۷۰	۲۰	۹۰/۱
۳	۰/۷۵	۳/۵	۷۰	۳۰	۸۸/۳
۴	۰	۶	۸۰	۱۰	۹۵/۹
۵	۰/۷۵	۳/۵	۸۰	۲۰	۹۱/۴
۶	۰	۱	۶۰	۱۰	۹۵/۳
۷	۱/۵	۶	۶۰	۳۰	۸۲/۲
۸	۱/۵	۶	۸۰	۱۰	۸۵/۱
۹	۰	۱	۸۰	۱۰	۹۳/۸
۱۰	۰	۱	۸۰	۳۰	۹۳/۵
۱۱	۱/۵	۶	۶۰	۱۰	۸۳/۵
۱۲	۱/۵	۳/۵	۷۰	۲۰	۸۴/۹
۱۳	۰	۶	۶۰	۳۰	۹۵/۸
۱۴	۱/۵	۱	۶۰	۳۰	۷۷/۸
۱۵	۱/۵	۱	۶۰	۱۰	۷۶/۶
۱۶	۰/۷۵	۳/۵	۶۰	۲۰	۸۶
۱۷	۰	۱	۶۰	۳۰	۹۸
۱۸	۱/۵	۱	۸۰	۳۰	۸۰/۱
۱۹	۰/۷۵	۳/۵	۷۰	۲۰	۹۰/۴
۲۰	۰	۶	۸۰	۳۰	۱۰۰
۲۱	۰/۷۵	۱	۷۰	۲۰	۸۸/۳
۲۲	۰/۷۵	۳/۵	۷۰	۱۰	۹۰/۹
۲۳	۰	۶	۶۰	۱۰	۹۴/۳
۲۴	۱/۵	۱	۸۰	۱۰	۷۹/۳
۲۵	۱/۵	۶	۸۰	۳۰	۸۴
۲۶	۰/۷۵	۶	۷۰	۲۰	۹۱/۸
۲۷	۰	۳/۵	۷۰	۲۰	۹۸/۱

نتایج آزمون واریانس ANOVA و تحلیل آماری توسط نرم-افزار در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به مقادیر p-value، pH، دما، زمان، نسبت جامدات به محلول، پارامترهای موثر بر استخراج روی بودند که از بین پارامترهای مورد بررسی pH با F-value ۲۱۵/۱۷، تاثیرگذارترین پارامتر بر روی استخراج حلالی روی از کیک سرد بود.

جدول ۴- داده‌های جدول آنالیز واریانس پارامترهای دخیل در استخراج روی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	۱۰۰۹/۵۱	۴	۲۵۲/۳۸	۵۶/۷۹	<۰/۰۰۰۱	significant
A-pH	۹۵۶/۳۰	۱	۹۵۶/۳۰	۲۱۵/۱۷	<۰/۰۰۰۱	
B-time	۳۲/۲۷	۱	۳۲/۲۷	۷/۲۶	۰/۰۱۳۲	
C-Temp.	۲۰/۹۱	۱	۲۰/۹۱	۴/۷۰	۰/۰۴۱۲	
D-s/l	۰/۰۳۵۶	۱	۰/۰۳۵۶	۰/۰۰۸	۰/۹۲۹۵	
Residual	۹۷/۷۸	۲۲	۴/۴۴			
Lack of Fit	۹۷/۷۳	۲۰	۴/۸۹	۲۰۹/۴۲	۰/۰۰۴۸	Not significant
Pure Error	۰/۰۴۶۷	۲	۰/۰۲۳۳			
Cor Total	۱۱۰۷/۲۹	۲۶				

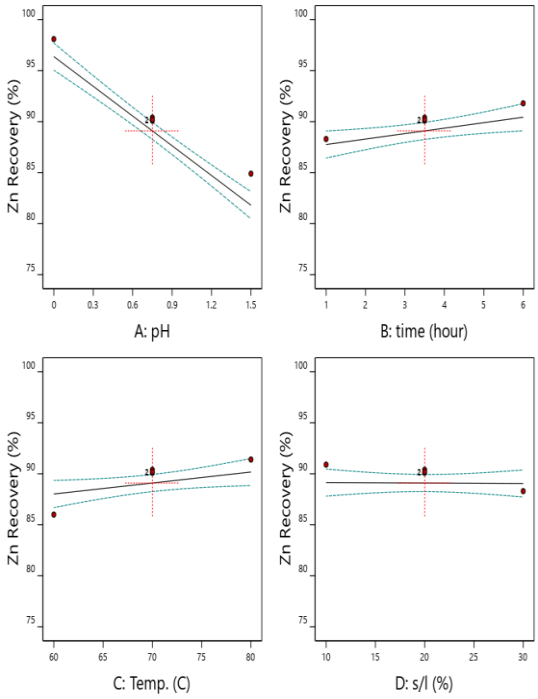
با توجه به خروجی بدست آمده از نرم‌افزار و مقدار رگرسیون ۹۸/۹۶ درصد، معادله ۲ برای محاسبه تئوریک بازده استخراج روی با پارامترهای متغیر، کاربردی است.

معادله ۲

Zn Recovery (%) = + 87.05519 - 9.71852 pH + 0.535556 time + 0.107778 Temp. - 0.004444 s/l

- نمودارهای خطی تاثیر هر پارامتر بر روی راندمان حذف روی

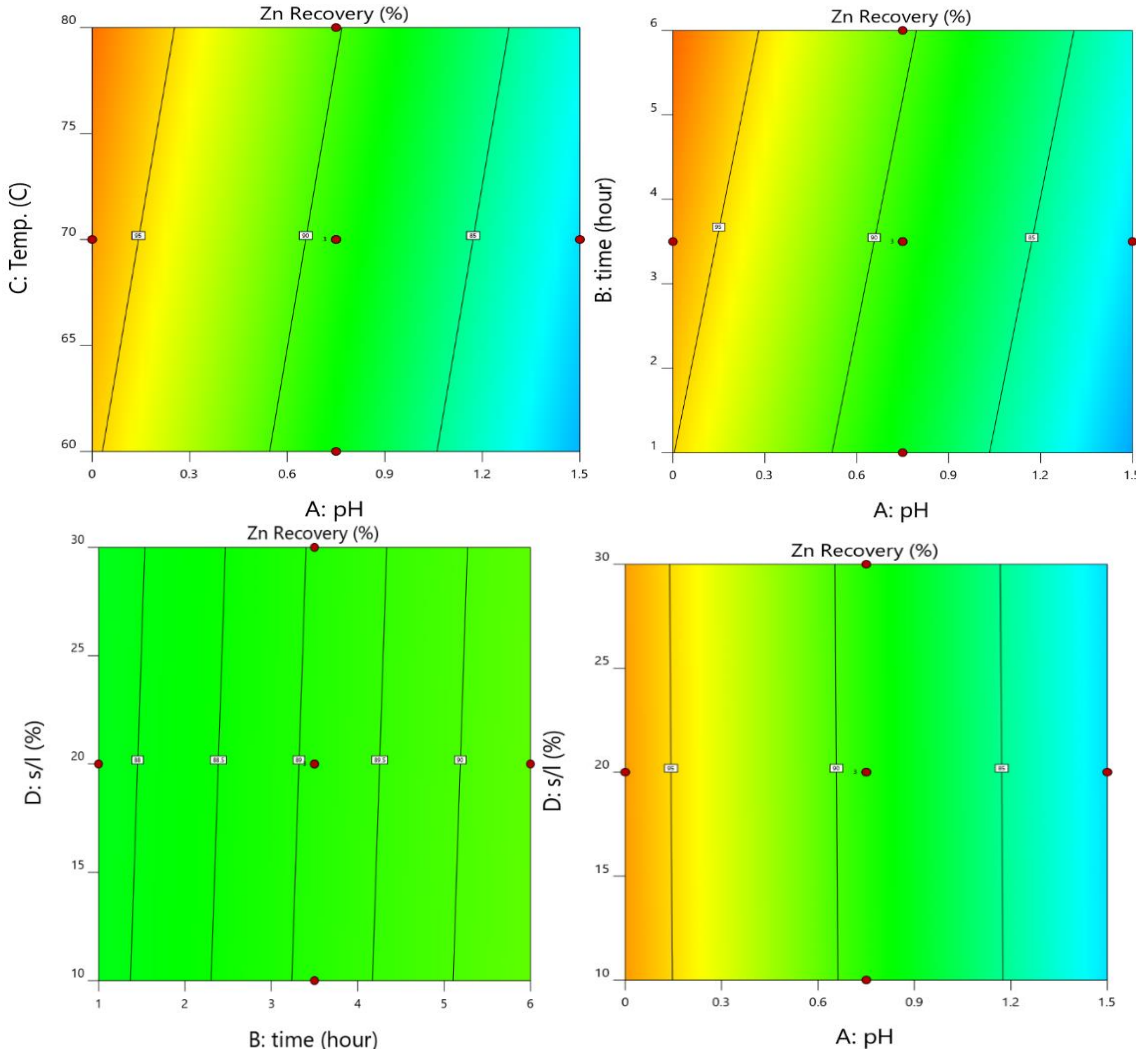
تاثیر هر پارامتر به صورت جداگانه و به شکل خطی، زمانی که بقیه پارامترها در مقدار میانه باشند، در شکل ۱ بررسی شده است. شیب رو به پایین در نمودار pH (شکل ۱-A)، نشان می‌دهد که با افزایش این پارامتر، راندمان بازیابی روی کاهش پیدا می‌کند. با افزایش زمان (شکل ۱-B) و نسبت s/l (شکل ۱-C) مشهود است که راندمان بازیابی فلز روی روند صعودی ادامه‌داری داشت. نمودار تاثیر دما (شکل ۱-D) بر راندمان انحلال روی ثابت بود که نشان دهنده بی‌تاثیر بودن این پارامتر در استخراج فلز روی است.

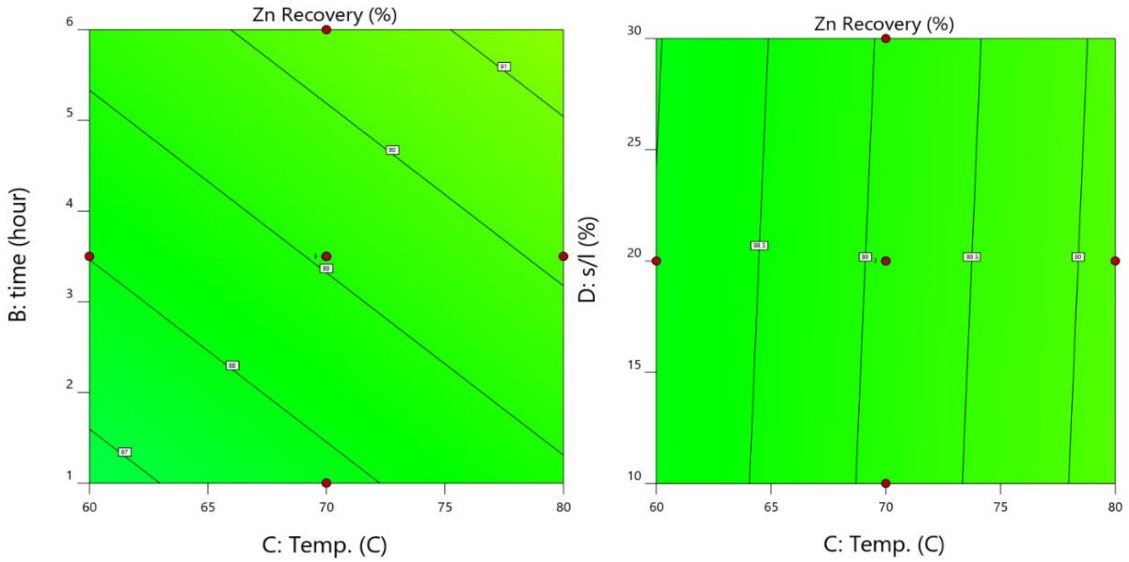


شکل۱: تاثیر هر پارامتر به صورت جداگانه بر استخراج روی

- نمودارهای کانتور (دوبه دو) تاثیر پارامترها بر روی راندمان حذف روی

با توجه به اینکه در این نمودارها دو پارامتر، ثابت و با مقدار میانه و دو پارامتر دیگر متغیر در نظر گرفته می‌شود، با نگاهی سطحی به شکل ۲ مشخص است که راندمان انحلال بالای روی (محدوده قرمز)، تنها در مقادیر کمینه pH محقق شده است. در مورد فلز روی محدوده نارنجی و قرمز نشان دهنده راندمان‌های بالای ۹۰ درصد است که مشخص است در pH بالای ۰/۲-۰/۱ ممکن نیست. نمودار pH-زمان نشان می‌دهد که در مقادیر کمینه زمان، راندمان انحلال در محدوده نارنجی قرار می‌گیرد، در نتیجه این پارامتر باید در مقدار حداقل میانه یا بالاتر انتخاب شود. در مورد نمودارهای pH-دما و s/l-pH مشخص است که در مقادیر بالای دما نسبت به مقادیر بالای s/l، راندمان بهتری حاصل می‌شود که نشان می‌دهد پارامتر دما اندکی مهم‌تر است. با مقایسه هر ۶ نمودار شکل ۱۳ مشخص است که پارامتری که تاثیر بیشتری دارد pH بوده و در صورتی که این پارامتر کمینه انتخاب نشود، حتی اگر دیگر پارامترها در بهینه مقدار هم باشند، باز هم نتیجه مناسبی حاصل نمی‌شود.

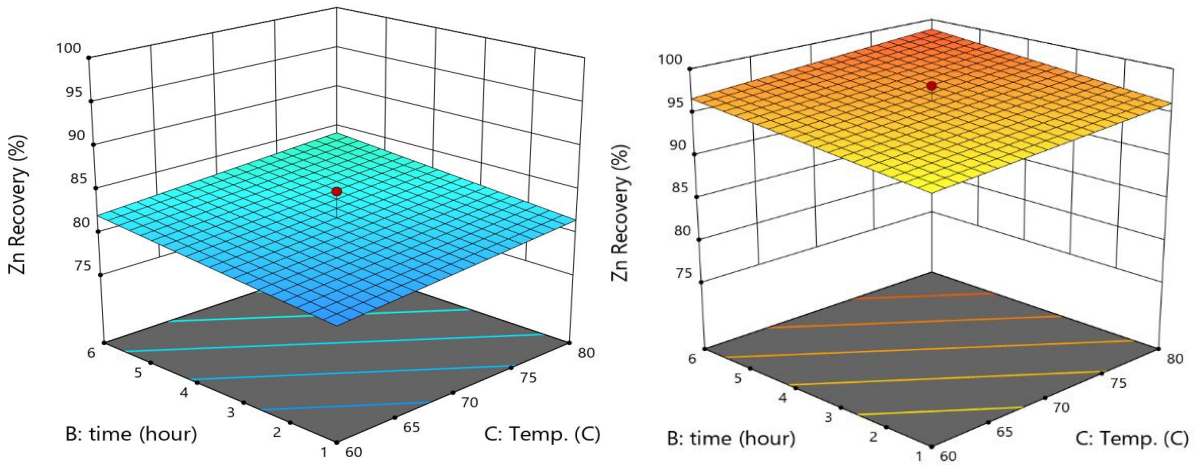


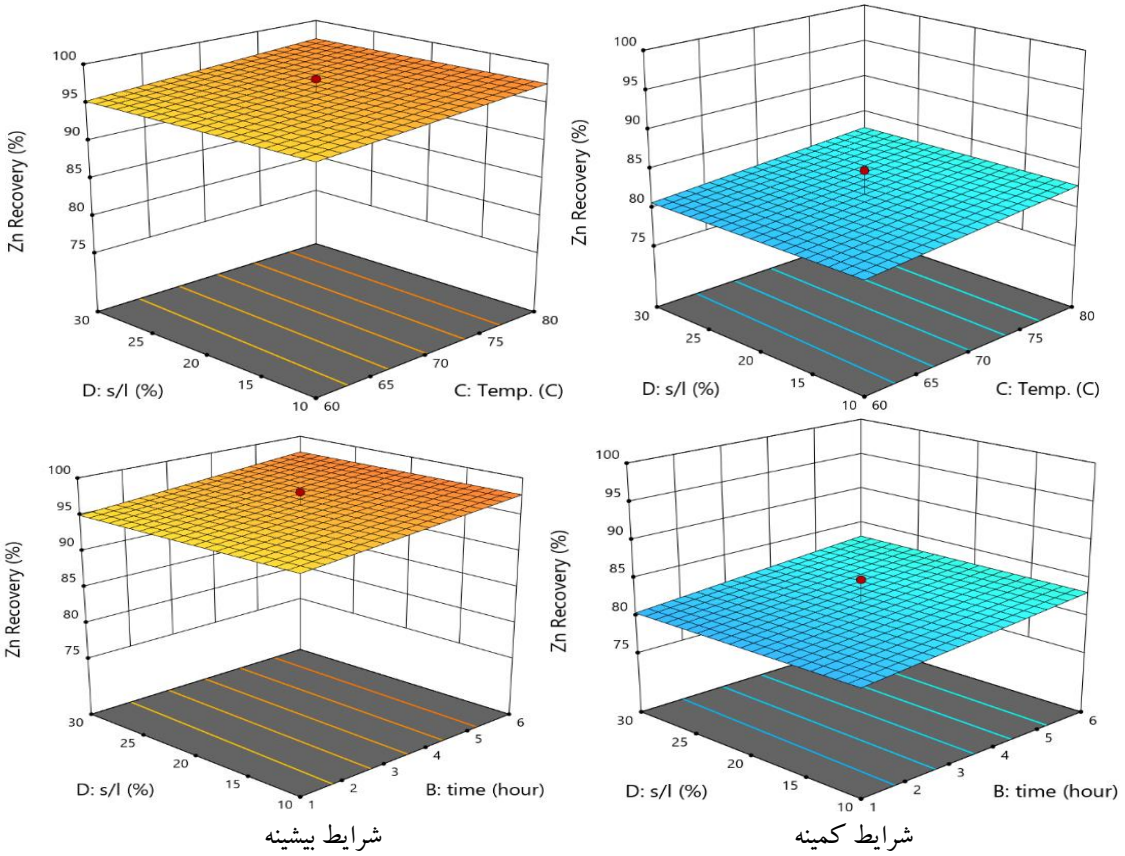


شکل ۲: نمودارهای کانتور تاثیر پارامترها در بازیابی روی

- نمودارهای سطحی تاثیر پارامترها بر روی راندمان حذف روی

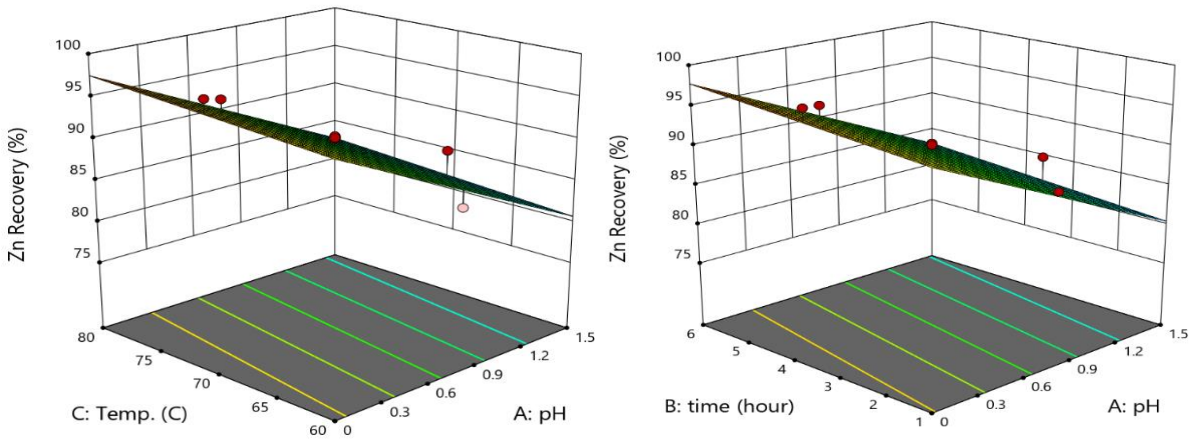
نمودارهای سطح، برای پارامترها دو به دو رسم شده و از پیش مقادیر میانه برای پارامترهای ثابت، تعیین شده است. در شکل ۳ برای بهتر نشان دادن تاثیر pH برروی راندمان بازیابی روی در مقادیر بیشینه و کمینه این پارامتر، مقدار میانه پارامتر ثابت دیگر، و مقادیر متغیر دو پارامتر متغیر دیگر، رسم شده است. در شکل ۴ مشخص است که پارامتر تعیین کننده راندمان pH است و سایر پارامترها در بازه منتخب تاثیر بسیار کم‌تری بر راندمان استخراج فلز روی می‌گذارند.

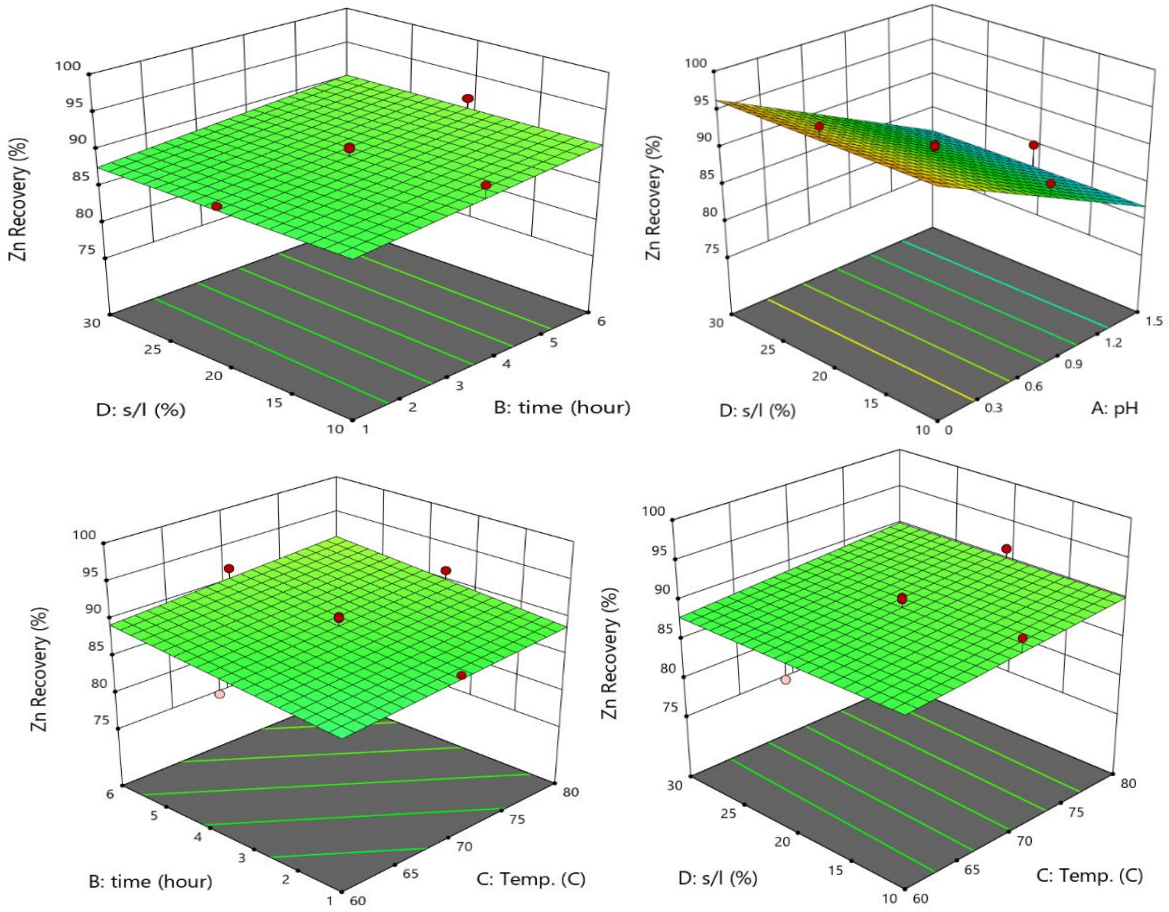




شکل۳: نمودارهای Tt، TS و TS، تاثیر مقدار pH بر روی درصد استخراج روی

منطق رسم شکل ۴ به این صورت است که دو پارامتر را در مقابل راندمان استخراج روی در یک نمودار سه بعدی، رسم کرده و دو پارامتر دیگر را ثابت و با مقدار میانه فرض می‌کند. دلیل شیب‌دار بودن نمودارهای تاثیر pH و زمان، pH و درجه حرارت و pH و s/l این است که پارامتر pH در آن، به صورت پارامتر متغیر بررسی شده است، که با تغییر از مقدار بیشینه به کمینه این پارامتر، بازه گسترده‌ایی از راندمان استخراج فلز، محقق می‌شود. اما نمودار زمان و s/l به شکل افقی است که با تغییر پارامترهای متغیر در آن‌ها، تغییر گسترده‌ایی در راندمان استخراج فلز، رخ نمی‌دهد.





شکل۴: نمودارهای سطحی بررسی تاثیر متغیرها بر روی درصد استخراج روی

نتایج و بحث

از بین متغیرهای pH، دما، نسبت جامدات به محلول و زمان که تاثیر آن‌ها بر روی درصد حذف روی مورد بررسی قرار گرفته است، pH تاثیرگذارترین پارامتر بود به شکلی که در حالت ترکیبی اگر pH کمینه انتخاب نشود حتی اگر دیگر پارامترها در بهینه مقدار هم بودند، نتیجه‌ای حاصل نشد. با توجه به جدول ۳، میانگین راندمان حذف روی ۸۹/۱۰ درصد بود و بالاترین راندمان با ۱۰۰ درصد در pH ۰، درجه حرارت ۸۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت جامدات به محلول ۳۰ درصد و زمان ۶ ساعت اندازه‌گیری شد. سیوزا و همکاران [۸] نشان دادند که با افزایش دما از ۳۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، راندمان شستشوی همی‌مورفیتفلز افزایش می‌یابد. ابدل- آل و همکاران [۹] افزایش کارایی شستشوی روی را با افزایش درجه حرارت ۴۰ تا ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، ۷۰ تا ۹۵ درصد گزارش کردند. همچنین نتایج نشان داد در محدودی pH بالای ۰/۲-۰/۱، راندمان بالای ۹۰ درصد اندازه‌گیری نشد به این ترتیب کمترین راندمان حذف روی با ۷۶/۶ درصد در pH ۱/۵ ثبت شد که می‌توان این موضوع را به تشکیل ترکیباتی که در هیچ یک از فازها محلول نمی‌باشند مرتبط دانست، همچنین در محدودی اسیدی، ژل در محلول لیچ اسیدی تشکیل نمی‌شود [۵]. تیکیو و همکاران [۱۰] حداکثر استخراج روی با ۸۵/۶۹ درصد در نسبت جامدات به محلول ۱/۱۲ (g/L) هیدروکسید آمونیوم و آمونیوم کلراید و هیو و همکاران [۱۱] درصد حذف ۹۹/۰۸ درصد را در فرآیند لیچینگ سریع سیلیکات‌های روی با استفاده زا H_2SO_4 در حضور تشعشعات ماکروویو گزارش کردند که درصد حذف

پایین‌تری در مقایسه با مطالعه‌ی حاضر داشته و کارایی بالاتر این روش را نشان می‌دهد.

مکانیسم استخراج برای سامانه به شکل معادله ۱ است که در آن M^{2+} یون فلزی و RH عامل استخراج کننده است که در محیط اسیدی و با استفاده از یون H^+ مولکول آلی- فلزی را می‌سازد:

$$Zn^{2+} + 2\,(R-H) \leftrightarrow\ ZnR_2 + 2H^+$$
$$ZnR_2 + 2\,H^+ \leftrightarrow\ 2\mathrm{RH} + Zn^{2+}$$

همچنین یافته‌ها نشان داد که افزایش غلظت حلال به شکل افزایش نسبت جامدات به محلول با افزایش ضریب توزیع و بنابراین افزایش جذب یون فلزی توسط حلال آلی همراه خواهد بود. با توجه به قیمت عموما بالای حلال‌ها، محدوده‌ی تعیین شده برای نسبت جاندات به محلول بیش‌تر از ۳۰ درصد حجمی در نظر گرفته نشده است که با توجه به بالا بودن درصد حذف فلز روی، می‌تواند به دلیل بهینه بودن pH محلول باشد. در بررسی منفرد تاثیر زمان بر روی بازیابی روی، افزایش زمان تاثیر مثبتی بر روی بازیابی روی داشت اما این افزایش بهترین عملکرد را در ۳/۵ ساعت داشت. با توجه به نتایج بدست آمده، روش به کار رفته برای حذف آلودگی فلز روی از باطله‌های حاصل از واحد فرآوری استحصال روی عملکرد مناسبی داشت.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه انحلال روی از کیک سرد واحد فرآوری استحصال روی توسط Cyanex 272 مورد مطالعه قرار گرفته است. تاثیر پارامترهای pH، دما، نسبت جامدات به محلول، زمان، فلز روی مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که pH در محدوده‌ی ۰/۲-۰/۱ تاثیرگذارترین پارامتر بود. با افزایش زمان و نسبت جامدات به محلول راندمان بازیابی فلز روی صعودی بود. دما در حالت منفرد تاثیری بر روی درصد حذف روی نداشت. میانگین راندمان حذف روی ۸۹/۱۰ درصد بود که نشان دهنده‌ی کارایی Cyanex 272 در استحصال روی دارد.

منابع

[1] Garside, A., 2022, Zinc consumption forecast worldwide from 2021 to 2028. Chemicals and Resources, https://www.statista.com/statistics/1093625/global-zinc-consumption/

[2] Sepúlveda, R.., Toro, N., Hernández, P., Navarro, P.,Vargas, C., Gálvez, E. and Castillo, J., 2022, Solvent Extraction of Metal Ions from Synthetic Copper Leaching Solution Using R4NCy. Metals, 12, pp. 1053. https://doi.org/10.3390/ met12061053

[3] Alverne Martins, J., Guimaraes, A., Bourdot Dutra, A. and Mansur, M., 2020, Hydrometallurgical separation of zinc and copper from waste brass ashes using solvent extraction. Journal of Materials Research and Technology, 9, pp. 2319-2330.

[4] Tahmasebizadeh, P. and Javanshir, S., 2021, Solvent Extraction of Zinc from a Bioleaching Solution by Modification of D2EHPA: Optimization and Thermodynamic Studies. Journal of Mining and Environment, 12, pp. 253-269.

[5] Soltani, F., Darabi, H., Aram, R. and Ghadiri, M., 2021, Leaching and solvent extraction purification of zinc from Mehdiabad complex oxide ore. Scientific Reports, 11, pp. 1566.

[6] Saneie, M., Aboutalebi, M.R. and Moghaddam, J., 2019, Investigation on the Zn separation behavior from aqueous solution containing Mg from a leaching solution of zinc filter cake by Solvent Extraction. Metallurgical Engineering, 22(2), pp. 96-103

[7] Asadi, T., Azizi, A., Lee, J.C. and Jahani, M., 2018, Solvent extraction of zinc from sulphate leaching solution of a sulphide-oxide sample using D2EHPA and Cyanex 272. Journal of Dispersion Science and Technology, 39(9), pp.1328-1334

[8] Souza, A. D., Pina, P. S., Lima, E.V.O., da Silva, C. A. and Leão, V. A., 2007, Kinetics of sulphuric acid leaching of a zinc silicate calcine. Hydrometallurgy 89, 337–345.

[9] Abdel-Aal, E. A., 2000, Kinetics of sulfuric acid leaching of low-grade zinc silicate ore. Hydrometallurgy, 55, pp. 247–254.

[10] Tiechui, Y., Qinyuan, C. and Jie, L., 2010, Effects of mechanical activation on physicochemical properties and alkaline leaching of hemimorphite. Hydrometallurgy, 104, pp.136–141.

[11] Hua, Y., Lin, Z. and Yan, Z., 2002, Application of microwave irradiation to quick leach of zinc silicate ore. Mineral Engineer, 15, pp. 451–456.