

## مقاله علمی-پژوهشی

## بازیافت مس از باطله‌های فرآوری معدن سرب قله‌کفتران شاهرود

محسن میرزایی<sup>۱</sup>، احمد خدادادی دربان<sup>۲\*</sup>، سیما محمدنژاد<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس Mohsen.miraei026@gmail.com

۲- استادیار گروه فرآوری مواد معدنی دانشگاه تربیت مدرس akdarban@modares.ac.ir

۳- استادیار گروه فرآوری مواد معدنی دانشگاه تربیت مدرس sima.mnejad@modares.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۲ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۷)

## چکیده

معدن متروکه سرب قله‌کفتران شاهرود در ۴ کیلومتری شمال شرق معدن چاه موسی حاوی مقادیر قابل توجهی از باطله‌های فرآوری است که در منطقه دپو و رها شده‌اند. این باطله‌ها با ذخیره قابل توجه بالغ بر ۵۰ هزار تن با محتوی مس ۰/۹۵ درصد قابلیت بهره‌برداری دارند. در این تحقیق بازیابی مس از باطله‌های فرآوری معدن قله‌کفتران به روش لیچینگ همزنی و سمنتاسیون مورد مطالعه قرار گرفته است. در آزمایش‌های لیچینگ تأثیر فاکتورهای pH، ابعاد ذرات، درصد جامد و زمان بر روی بازیابی مس با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر پارامترهای pH، دما و زمان بر فرایند سمنتاسیون مس بررسی گردید. نتایج نشان داد که pH و اندازه ذرات به ترتیب دارای بیشترین تأثیر بر انحلال مس هستند و درصد جامد و زمان تأثیر کمتری دارند. در نهایت شرایط بهینه برای لیچینگ همزنی pH برابر با ۱، ابعاد دانه‌بندی ۱۰۶- میکرون، زمان ۱۵۰ دقیقه و درصد جامد ۳۰ تعیین شد که میزان بازیابی لیچینگ در این شرایط برابر ۹۱/۷ درصد به دست آمد. همچنین نتایج آزمایش بطری غلتان نشان داد که میزان اسید مصرفی باطله فرآوری معدن متروکه قله‌کفتران برابر با ۱۱۳/۸ کیلوگرم بر تن در شرایط میزان بازیابی بیشینه است. نتایج حاصل از آزمایش‌های سمنتاسیون نشان داد که هر سه عامل pH، زمان و دما بر فرایند سمنتاسیون مس مؤثر هستند. در نهایت نیز pH برابر با ۲، زمان ۳۰ دقیقه و دمای محیط به‌عنوان شرایط بهینه سمنتاسیون انتخاب شد. میزان بازیابی سمنتاسیون در این شرایط ۹۸/۶ درصد و بنابراین بازیابی کل (لیچینگ + سمنتاسیون) برابر ۹۰/۴۱ درصد تعیین شد. مطالعه بر روی پودر مس سمنت شده نیز نشان داد که درصد خلوص مس ۹۶/۹ درصد و ناخالصی پودر مس سمنت شده (عمدتاً آهن) ناچیز است.

## کلمات کلیدی

لیچینگ همزنی، سمنتاسیون، باطله فرآوری، معدن متروکه قله‌کفتران

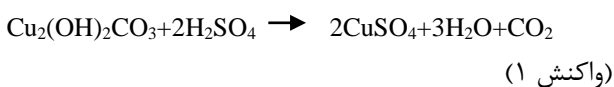
## ۱- مقدمه

فلز مس به طور طبیعی در سنگ‌ها، خاک، آب و هوا در طبیعت وجود دارد و یک عنصر ضروری برای گیاهان و جانوران و انسان‌ها است. مس و آلیاژهای آن در صنایع متعدد مورد استفاده قرار می‌گیرد اما مهم‌ترین مورد مصرف مس در صنایع برق و الکترونیک (حدود ۵۵ درصد) است [۱]. کانسنگ‌های مس شامل کانسنگ‌های سولفیدی و کانسنگ‌های اکسیدی هستند. معمولاً کانسنگ‌های سولفیدی با استفاده از روش فلوتاسیون پری‌عیارسازی شده و سپس به روش‌های پیرومتالورژی بازیابی می‌شوند در حالی که کانسنگ‌های اکسیدی عموماً به طور مستقیم در فرایندهای هیدرومتالورژیکی فراوری می‌شوند [۱]. تنها در سال ۲۰۱۰، حدود ۴/۵ میلیون تن مس فلزی با روش هیدرومتالورژی تولید شده است. این میزان تولید به طور پیوسته در حال افزایش است زیرا بیشتر معادن، بهره‌برداری از منابع کم‌عیار (که قبلاً باطله محسوب می‌شدند) را شروع کرده‌اند [۲].

در دو دهه گذشته، تولید و مصرف مس در جهان به میزان بسیار زیادی افزایش پیدا کرده است. بنابراین بازیافت مس از منابع اولیه و همچنین روش‌های بازیافت از منابع ثانویه مورد توجه واقع شده است [۳]. از طرفی همه ترکیبات مس به طور بالقوه سمی هستند. بدن انسان می‌تواند از طریق تنفس هوا، آب آشامیدنی، مواد غذایی و از طریق تماس پوستی با ترکیبات مس در تماس قرار گیرد [۴].

معدن متروکه قله کفتران شاهرود دارای حدوداً ۵۰ هزار تن باطله‌های فراوری است که به صورت دپو رها شده است. این باطله‌های فراوری با توجه به حجم زیاد و بادخیز بودن منطقه دارای مشکلاتی از قبیل اشغال فضا و پراکندگی در منطقه از طریق باد است که می‌تواند منجر به آلودگی هوا و محیط‌زیست منطقه شود. از طرفی باطله‌های فراوری معدن متروکه قله-کفتران با توجه به آنالیزهای انجام شده دارای مقادیر قابل توجهی مس ۰/۹۵ درصد با ذخیره‌ای بالغ بر ۵۰ هزار تن است که از لحاظ اقتصادی قابل بهره‌برداری است. با بازیافت

مس علاوه بر مزایای اقتصادی، مشکلات زیست‌محیطی آن نیز کاهش می‌یابد. از لیچینگ اسیدی توسط اسید سولفوریک برای انحلال کانی‌های اکسیده مس استفاده می‌شود. لیچینگ هم‌زنی<sup>۱</sup> برای کانسنگ‌های اکسیده مس استفاده می‌شود. محدوده عیار مناسب مس برای این روش لیچینگ بین ۰/۸ تا ۵ درصد است [۲]. مواد معدنی اکسیده مس مانند مالاکیت  $(\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3)$ ، در محلول اسیدی یا قلیایی به راحتی حل می‌شود [۵]. لیچینگ مالاکیت از نوع شیمیایی بوده و در واکنش ۱ نشان داده شده است [۶]:



پس از انحلال طبق فرایند الکتروشیمیایی زیر سمنتاسیون مس توسط آهن انجام می‌شود [۷] (واکنش ۲):



سمنتاسیون<sup>۲</sup> فرایندی است که در آن یون‌های مس در محلول نمک مس یعنی  $(\text{CuSO}_4)$  در سطح مشترک آهن، با کاهش الکتروشیمیایی خود به خودی به منظور تبدیل به مس فلزی احیا می‌شوند. فرایند سمنتاسیون یک روش ارزان و مؤثر برای استحصال مس از محلول لیچینگ محسوب می‌شود. مزایای سمنتاسیون هزینه کم به دلیل مصرف انرژی اندک و استحصال فلزات به شکل پودر فلز خالص با راندمان بالا، همچنین کنترل آسان و عملیات نسبتاً ساده است [۸].

محققان زیادی در زمینه لیچینگ مس اکسیدی و سمنتاسیون مس به منظور استحصال مس از محلول لیچینگ فعالیت داشته‌اند. عطا و همکاران<sup>۳</sup> به بررسی تعیین شرایط بهینه برای لیچینگ مالاکیت در محلول اسیدسولفوریک پرداختند که در شرایط بهینه انحلال مس ۱۰۰ درصد به دست آمد [۹]. کلوتید کلوتید آپوا و همکاران<sup>۴</sup> به بررسی لیچینگ کانسنگ مس اکسیدی با اسیدسولفوریک پرداختند. ۹۸/۱۷ درصد از مس در pH برابر با ۱ حل شد [۱۰]. قراباغی و همکاران به بررسی استحصال مس از کانسنگ طارم پرداختند که در شرایط بهینه بازیابی مس ۹۵ درصد به دست آمد [۱۱].

پارامترهای عملیاتی مؤثر در فرایند لیچینگ و سمنتاسیون و همچنین تعیین مقدار بهینه این پارامترها از اهداف تحقیق است. اهداف عمده این تحقیق در موارد زیر قابل خلاصه شدن می‌باشند:

۱. امکان استحصال مس از باطله‌های فرآوری با روش لیچینگ همزنی
۲. تعیین پارامترهای مؤثر و نحوه اندرکنش آن‌ها در لیچینگ همزنی
۳. تعیین پارامترهای عملیاتی بهینه در لیچینگ همزنی
۴. امکان به‌کارگیری روش سمنتاسیون برای استحصال مس از محلول لیچینگ
۵. بررسی پارامترهای مؤثر بر فرآیند سمنتاسیون و انتخاب شرایط سمنتاسیون بهینه

## ۲- مواد و روش‌ها

در حدود ۴۰۰ کیلوگرم نمونه از باطله‌های فرآوری معدن متروکه قله‌کفتران تهیه گردید. تجزیه سرندهی با سرندهای سری ASTM انجام گرفت. به‌منظور تعیین ترکیب شیمیایی نمونه باطله قله‌کفتران، آنالیز XRF و جهت شناسایی کانی‌های تشکیل‌دهنده روش XRD (مدل D8-Advance ساخت شرکت Bruker) به‌کاربرده شد. همچنین برای شناسایی کمی عناصر موجود در باطله قله‌کفتران از روش آنالیز ICP استفاده شد.

برای محاسبه درجه آزادی کانی‌های حاوی مس از مطالعات میکروسکوپی مقاطع صیقلی و نازک استفاده شد. این مطالعات بر روی ۶ فراکسیون ابعادی  $۵۰۰+۲۵۰$ ،  $۸۴۰+۵۰۰$ ،  $۱۰۶+۲۵۰$ ،  $۷۵+۴۴$  و  $۴۴$  میکرون انجام گرفت. به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی در مرحله لیچینگ همزنی در این پژوهش از طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح نوع CCD استفاده شد آزمایش‌های طراحی‌شده و سطوح پارامترهای موردبررسی در جدول ۱ آورده شده است. در آزمایش‌های لیچینگ چهار پارامتر pH، زمان، ابعاد ذرات و درصد جامد مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که دور همزنی کمی بیشتر از دور همزنی در صنعت ۱۲۰ دور در دقیقه

بیاتی و همکاران<sup>۵</sup> نیز به یک مطالعه جامع در مورد رفتار لیچینگ و سینتیک انحلال کانه مس اکسیدی در محیط اسیدسولفوریک پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش زمان و دمای لیچینگ باعث افزایش نرخ لیچینگ مس می‌شود. نرخ لیچینگ با افزایش نرخ همزنی، غلظت اسید و نسبت مایع به جامد به میزان معینی افزایش یافت و سپس با افزایش بیشتر این عوامل کاهش یافت. نرخ همزنی در انحلال مس دارای بالاترین تأثیر بود [۱۲]. نظری روشن کودهی و همکاران در سال ۱۳۹۳ به بررسی لیچینگ همزنی بر روی خاک نرمه معدن چاه‌موسی پرداختند. نتایج نشان داد که شرایط بهینه، برای ابعاد دانه‌بندی ۸۸- میکرون، غلظت اسید ۱۲۰ گرم بر لیتر، زمان ۴ ساعت، درصد جامد ۳۰ و سرعت همزنی ۴۸۰ دور بر دقیقه و میزان بازیابی برابر با ۹۵/۶۲ درصد برای مس به دست آمد [۱۳]. دنمز و همکاران<sup>۶</sup> به بررسی سینتیک سمنتاسیون مس از محلول سولفات توسط دیسک‌های آلومینیومی چرخان پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزایش دما میزان سمنتاسیون افزایش پیدا می‌کند و حداکثر بازیابی سمنتاسیون در pH برابر با ۱ به دست آمد [۱۴]. فواد و بصیر<sup>۷</sup> به بررسی سمنتاسیون مس توسط آهن پرداختند. پارامترهای مؤثر بر سمنتاسیون بررسی شد و پودر مس با خلوص بالا بیشتر از ۹۹ درصد در دمای محیط و pH برابر با ۲ به دست آمد [۱۵]. ایران‌نژاد و همکاران به مطالعه و بررسی سینتیک سمنتاسیون مس پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که از بین عوامل اصلی، شدت همزنی، pH، و غلظت مس و از بین اندرکنش‌ها، اندرکنش بین غلظت مس و pH، دارای بیشترین تأثیر بر روی سینتیک سمنتاسیون مس هستند [۱۶]. تحقیق دیگری نشان داده است که pH بر روی بازیابی مس به روش سمنتاسیون با آهن دارای تأثیر بارزی نیست. اما به دلیل رقابت هیدروژن با مس بر روی مصرف آهن تأثیرگذار است [۱۷].

هدف از این تحقیق بازیافت مس از باطله‌های فرآوری معدن متروکه قله کفتران شاهرود است. برای این منظور تعیین

ثابت در نظر گرفته شد و همچنین با توجه به ملاحظات اقتصادی از پارامتر دما صرف نظر شد.

جدول ۱- سطوح پارامترهای مؤثر برای آزمایش لیچینگ

پارامترهای مؤثر	pH	زمان (دقیقه)	درصد جامد	ابعاد ذرات (میکرون)
سطوح	۰/۵	۶۰	۱۵	۴۴-
	۱	۹۰	۲۰	۱۰۶+۴۴-
	۱/۵	۱۲۰	۲۵	۱۵۰+۱۰۶-
	۲	۱۵۰	۳۰	۲۵۰+۱۵۰-
	۲/۵	۱۸۰	۳۵	۳۰۰+۲۵۰-

همچنین به منظور بررسی عوامل مؤثر بر سمناسیون مس، میزان سمناسیون و انتخاب شرایط بهینه تعداد ۸ آزمایش طراحی شد (جدول ۲). در آزمایش‌های سمناسیون نیز سه پارامتر دما، pH و زمان مورد بررسی قرار گرفت. سطوح پارامترهای مورد بررسی در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه آزمایش‌های سمناسیون در حالت بهینه لیچینگ انجام شد، غلظت مس در محلول در تمام آزمایش‌های سمناسیون یکسان بود.

جدول ۲- سطوح پارامترهای مؤثر برای آزمایش سمناسیون

پارامترهای مؤثر	pH	زمان (دقیقه)	دما (درجه سانتی‌گراد)
سطوح	۱	۱۰	۲۵
	۲	۳۰	۶۰

در آزمایش‌های لیچینگ و سمناسیون هر دو از پارامتر پاسخ بازیابی استفاده شد. با توجه به اینکه آهن یک عنصر مزاحم در محلول باردار است و چنانچه از غلظت مناسب خود تجاوز کند می‌تواند منجر به مشکلاتی در میزان راندمان کارخانه الکترووینینگ شود، میزان آهن محلول نیز به‌عنوان یک متغیر پاسخ دیگر مهم است؛ اما طی مطالعات مشخص شد میزان آهن ناچیزی در محلول لیچینگ حل شده است و به همین دلیل از در نظر گرفتن آهن به‌عنوان متغیر پاسخ صرف نظر شد.

به‌منظور انجام آزمایش‌های لیچینگ همزنی از یکسری ظروف مناسب لیچینگ همزنی و از یک همزن مکانیکی نیمه-صنعتی دارای سیستم تنظیم دور دقیق استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های همزنی ابتدا با استفاده از ریفلر، نمونه معرف برداشته شده، سپس به‌منظور رسیدن به ابعاد مورد نظر جهت آزمایش‌های لیچینگ همزنی نمونه‌ها با آسیای گلوله‌ای آسیا شد. سپس با توجه به درصد جامد مربوط به هر آزمایش میزان نمونه با درصد جامد مورد نظر به محلول اضافه شد؛ و با اسیدسولفوریک در هر آزمایش pH کنترل گردید. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌ها در حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر انجام شد و به‌منظور رسیدن به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر از آب مقطر استفاده گردید. پس از انجام آزمایش‌ها از فیلتر خلأ به‌منظور آبگیری استفاده گردید. سپس مواد باقیمانده بر روی فیلتر با آب شسته و توسط خشک‌کن نمونه خشک شد. جامد خشک شده و محلول فیلتر شده به‌منظور تعیین میزان بازیابی مس توسط روش جذب اتمی آنالیز شد.

به‌منظور انجام آزمایش‌های سمناسیون ابتدا محلول لیچینگ با شرایط مورد نیاز تهیه شد. به‌منظور سمناسیون از پودر آهن استفاده گردید. تمامی آزمایش‌های سمناسیون در حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر انجام شد. از همزن شیشه‌ای به‌منظور هم زدن توسط همزن مکانیکی استفاده گردید. ابتدا ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول باردار در درون بشر ریخته و سپس در درون حمام آب گرم به‌منظور رسیدن به دمای مورد نظر قرار داده شد. از دماسنج به‌منظور کنترل دما استفاده گردید. پس از اینکه محلول به دمای مورد نظر رسید در یک دور همزنی ثابت پودر آهن به آن اضافه شد. پس از گذشتن زمان مورد نظر و اتمام آزمایش، پالپ با استفاده از فیلتر خلأ آبگیری و محلول توسط دستگاه جذب اتمی آنالیز شد. لازم به ذکر است که از آمونیاک به‌منظور افزایش pH استفاده گردید. در نهایت نیز در شرایط بهینه سمناسیون دو آزمایش ۱ لیتری انجام شد و پس از فیلتر کردن پودر ترسیب شده برای تعیین میزان خلوص مس به روش XRF آنالیز شد.

موجود در باطله قله کفتران حدود ۱ درصد است، که نشان‌دهنده‌ی میزان مس مناسبی جهت انجام آزمایش‌های لیچینگ همزنی است.

جدول ۳- آنالیز XRF از نمونه اولیه

ترکیب اکسید	درصد	عنصر	درصد
SiO <sub>۲</sub>	۴۹/۲۷	Cl	۰/۰۴۰
Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۱۳/۱۳	Ni	۰/۰۰۵
SO <sub>۳</sub>	۹/۲۱	Cu	۱/۰۰۲
CaO	۵/۲۸	Zn	۰/۲۱۲
Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۴/۰۷	Ga	۰/۰۰۳
K <sub>۲</sub> O	۴/۰۰	Rb	۰/۰۱۳
MgO	۱/۳۵	Sr	۰/۰۲۸
Na <sub>۲</sub> O	۱/۳۰	Zr	۰/۰۱۳
TiO <sub>۲</sub>	۰/۴۳	Sb	۰/۰۱۰
P <sub>۲</sub> O <sub>۵</sub>	۰/۲۰	Ba	۰/۱۵۸
MnO	۰/۱۳	Pb	۰/۱۸۱

جدول ۴- آنالیز پراش اشعه ایکس نیمه کمی

نام کانی	ترکیب شیمیایی	درصد
کوارتز	SiO <sub>۲</sub>	۳۳/۹
پلاژیوکلاز	NaAlSi <sub>۳</sub> O <sub>۸</sub>	۱۷/۲
ایلپیت	KAl <sub>۳</sub> (Si <sub>۲</sub> Al)O <sub>۱۰</sub> (OH) <sub>۲</sub>	۱۲/۶
ارتوکلاز	KAl <sub>۳</sub> O <sub>۸</sub>	۱۱/۶
ژپس	CaSO <sub>۴</sub> ·۲H <sub>۲</sub> O	۶/۵
باسینیت	CaSO <sub>۴</sub> ·۰/۵H <sub>۲</sub> O	۵/۸
هماتیت	Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۲/۷
مالاکیت	CuCO <sub>۳</sub> ·Cu(OH) <sub>۲</sub> /۲CuO·CO <sub>۲</sub> ·H <sub>۲</sub> O	۲/۳
مونتموریلونیت	(Na,Ca) <sub>۰-۳</sub> (Al,Mg) <sub>۳</sub> Si <sub>۳</sub> O <sub>۱۰</sub> (OH) <sub>۲</sub> ·nH <sub>۲</sub> O	۲/۲
کائولینیت	Al <sub>۲</sub> Si <sub>۲</sub> O <sub>۵</sub> (OH) <sub>۴</sub>	۲/۲
کلسیت	CaCO <sub>۳</sub>	۱/۷
گوتیت	Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub> ·H <sub>۲</sub> O	۱/۳

برای محاسبه درجه آزادی از مقاطع صیقلی استفاده شد. با شمارش ذرات کانی بالارزش آزاد و درگیر و تعیین نسبت ذرات آزاد به کل ذرات شمارش‌شده، درصد درجه آزادی تعیین شد. نتایج مطالعات درجه آزادی در شکل ۱ آورده شده است. نتایج نشان داد که کانی مالاکیت به‌عنوان فاز اصلی حاوی مس در طبقات ابعادی زیر ۱۰۶ میکرون بیش از ۶۰ درصد آزاد شده است.

آزمایش بطری غلتان به‌منظور تعیین میزان مصرف اسیدسولفوریک انجام شد. این آزمایش در دانه‌بندی صد در صد زیر ۱۰۶ میکرون انجام گرفت. بدین منظور ۲۱۵ گرم نمونه پودر شده با ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مخلوط شد تا درصد جامد ۳۰ درصد به دست آید. ابتدا pH محلول اندازه‌گیری شد و سپس اسیدسولفوریک با غلظت ۹۸ درصد به محلول اضافه گردید تا pH آن به ۱ برسد. در ادامه بطری روی دستگاه غلتان قرار گرفت. میزان اسید مصرفی برای تنظیم اولیه pH و ثابت نگه‌داشتن آن در مراحل بعدی ثبت‌شده است. این عمل تا تثبیت pH ادامه پیدا کرد. پس از تثبیت pH محلول در مقدار برابر با ۱، میزان مس حل‌شده و میزان غلظت آهن با استفاده از آنالیز جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج مطالعات مشخصه‌یابی

در مرحله اول دانه‌بندی نمونه تهیه‌شده از باطله‌های معدن قله-کفتران به روش تجزیه سرندهی انجام گرفت که مشخص شد d<sub>80</sub> باطله قله کفتران برابر با ۹۵۵ میکرون است. همچنین نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی بر روی ۶ فراکسیون ابعادی (مقاطع صیقلی و نازک) نشان داد که کانی‌های اصلی باطله قله کفتران شامل پلاژیوکلاز، فلدسپات، کوارتز و مالاکیت و کانی‌های فرعی نیز شامل هماتیت، مسکویت و کلریت است.

نتایج آنالیز XRD تأییدکننده مطالعات میکروسکوپی بود. همچنین نتایج مطالعات میکروسکوپی و XRD نشان داد که مالاکیت کانی اصلی حاوی مس است. نتایج آنالیزهای XRF و XRD در جدول ۳ و ۴ آورده شده است. عمده باطله قله کفتران کوارتز و فلدسپارها هستند. میزان درصد کربنات‌ها به‌عنوان عامل مزاحم مصرف‌کننده اسید چندان بالا نبوده اما درصد سیلیکات‌ها بسیار بالا است. سیلیکات‌ها در محلول اسیدسولفوریک تولید سیلیکات‌زل کرده و مصرف اسید را افزایش می‌دهند [۱۲].

نتایج آنالیز ICP نیز در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به آنالیزهای ICP و XRF مشخص شد که عیار مس

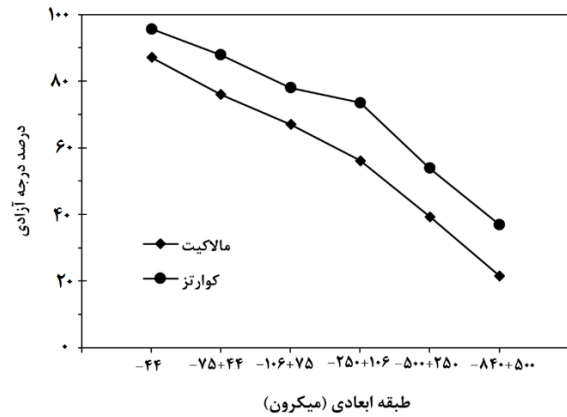
رگرسیون پیشنهادی پیش‌بینی شده است. نمودار مقادیر واقعی پاسخ و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل در شکل ۳ آورده شده است.

جدول ۵- نتیجه آنالیز ICP

Ag ppm	Al ppm	As ppm	Ba ppm	Be ppm	Bi ppm	Ca ppm	Cd ppm	Ce ppm	Co ppm
۱۰/۱	۷۲۱۸۲	۳۲/۴	۹۶۴	۱/۱	۰/۱	۲۷۹۸۰	۵/۷	۳۰	۷/۸
Cr ppm	Cs ppm	Cu ppm	Dy ppm	Er ppm	Eu ppm	Fe ppm	Gd ppm	Hf ppm	In ppm
۴۶	۶/۷	۹۵۰۹	۱/۸۶	۰/۶۹	۰/۷۳	۲۷۶۴۲	۱/۴۴	۱/۲	۰/۵
K ppm	La ppm	Li ppm	Lu ppm	Mg ppm	Mn ppm	Mo ppm	Na ppm	Nb ppm	Nd ppm
۳۰۱۵۱	۱۷	۱۹	۰/۱	۶۸۳۶	۷۶۱	۲/۳	۱۵۸۷۶	۸/۷	۱۳/۴
Ni ppm	P ppm	Pb ppm	Pr ppm	Rb ppm	S ppm	Sb ppm	Sc ppm	Se ppm	Sm ppm
۱۷	۷۶۳	۱۵۸۶	۳/۷۸	۱۰۸	۱۷۷۲۸	۳۸/۵	۷/۵	۰/۷۶	۲/۲
Sn ppm	Sr ppm	Ta ppm	Tb ppm	Te ppm	Th ppm	Ti ppm	Tl ppm	Tm ppm	U ppm
۱۲	۲۵۷	۰/۸۷	۰/۲۹	۰/۱۱	۲/۸۱	۲۶۱۰	۱/۱۳	۰/۱	۱/۱
V ppm	W ppm	Y ppm	Yb ppm	Zn ppm	Zr ppm				
۱۰۹	۱/۹	۵/۴	۰/۷	۲۰۵۰	۵۸				

جدول ۶- نتایج آزمایش‌های لیچینگ مس

شماره آزمایش	زمان (دقیقه)	pH	درصد جامد	D80 (میکرون)	بازایی مس (درصد)
۱	۹۰	۱	۲۰	-۱۰۶	۸۴/۶
۲	۱۵۰	۱	۲۰	-۱۰۶	۸۳/۸
۳	۹۰	۲	۲۰	-۱۰۶	۵۶/۶
۴	۱۵۰	۲	۲۰	-۱۰۶	۵۹/۵
۵	۹۰	۱	۳۰	-۱۰۶	۹۲/۰
۶	۱۵۰	۱	۳۰	-۱۰۶	۹۱/۷
۷	۹۰	۲	۳۰	-۱۰۶	۶۰/۲
۸	۱۵۰	۲	۳۰	-۱۰۶	۶۶/۴
۹	۹۰	۱	۲۰	-۲۵۰	۷۸/۱
۱۰	۱۵۰	۱	۲۰	-۲۵۰	۷۷/۴
۱۱	۹۰	۲	۲۰	-۲۵۰	۵۵/۲
۱۲	۱۵۰	۲	۲۰	-۲۵۰	۶۵/۵
۱۳	۹۰	۱	۳۰	-۲۵۰	۸۰/۱
۱۴	۱۵۰	۱	۳۰	-۲۵۰	۸۱/۲
۱۵	۹۰	۲	۳۰	-۲۵۰	۵۸/۹
۱۶	۱۵۰	۲	۳۰	-۲۵۰	۵۹/۵
۱۷	۱۲۰	۱/۵	۲۵	-۱۵۰	۷۵/۰
۱۸	۱۲۰	۱/۵	۲۵	-۱۵۰	۷۴/۸
۱۹	۱۲۰	۱/۵	۲۵	-۱۵۰	۷۲/۷
۲۰	۶۰	۱/۵	۲۵	-۱۵۰	۶۹/۰
۲۱	۱۸۰	۱/۵	۲۵	-۱۵۰	۷۴/۸
۲۲	۱۲۰	۰/۵	۲۵	-۱۵۰	۸۵/۰
۲۳	۱۲۰	۲/۵	۲۵	-۱۵۰	۵۶/۷
۲۴	۱۲۰	۱/۵	۱۵	-۱۵۰	۷۱/۰
۲۵	۱۲۰	۱/۵	۳۵	-۱۵۰	۶۹/۳
۲۶	۱۲۰	۱/۵	۲۵	-۴۴	۸۱/۰
۲۷	۱۲۰	۱/۵	۲۵	-۳۰۰	۷۰/۰
۲۸	۱۲۰	۱/۵	۲۵	-۱۵۰	۷۳/۳



شکل ۱- تغییرات درصد آزادی مالاکیت و کوارتز

۳-۲- نتایج آزمایش‌های لیچینگ همزنی

در این پژوهش تأثیر عوامل عملیاتی pH، ابعاد ذرات، درصد جامد و زمان بر لیچینگ مالاکیت بررسی شده است. نتایج آزمایش‌های لیچینگ در جدول ۶ آورده شده است. مدل پیشنهادی برای متغیر پاسخ بازایی مس در جدول ۷ و آنالیز واریانس مربوط به بازایی مس نیز در جدول ۸ آورده شده است. با توجه به نتایج pH و ابعاد ذرات به ترتیب تأثیر بیشتری بر بازایی مس داشته و درصد جامد و زمان تأثیر کمتری دارند. نمودار توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نقاط باقی‌مانده بازایی مس از یک خط راست پیروی می‌کنند و از خط نرمال انحرافی ندارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که متغیر پاسخ در محدوده پارامترهای موردبررسی به‌خوبی توسط مدل

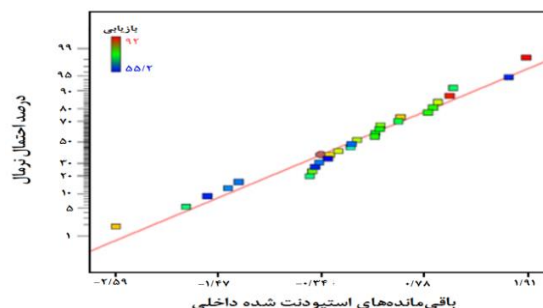
جدول ۷- مدل پیشنهادی برای متغیر پاسخ بازایی مس

منبع	مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات
Mean vs Total			۱/۴۴۸E+۰۰۵	۱	۱/۴۴۸E+۰۰۵
Block vs Mean			۱/۳۵	۱	۱/۳۵
Linear vs Block	< . / ۰۰۱	۵۲۰/۷	۷۲۸/۲۵	۴	۲۹۱۲/۹۹
2FI vs Linear	۰/۷۵۸۷	۰/۵۶	۸/۸۵	۶	۵۳/۰۹
Quadratic vs 2FI	۰/۵۴۳۸	۰/۸۱	۱۳/۵۰	۴	۵۳/۹۹
Cubic vs Quadratic	۰/۰۱۲۳	۱۳/۳۵	۲۴/۱۶	۸	۱۹۳/۳۰
Residual			۱/۸۲	۴	۷/۳۰
Total			۵۲۸۶/۷۴	۲۸	۱/۴۸۰E+۰۰۵

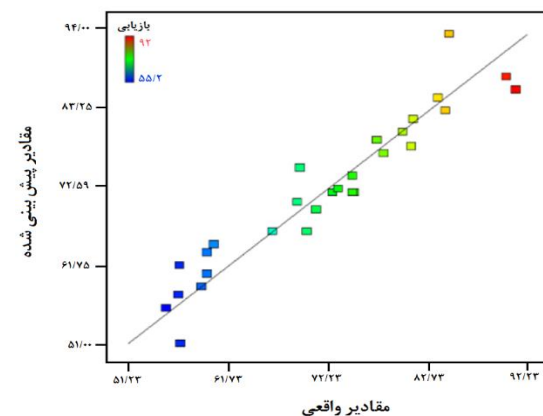
جدول ۸- آنالیز واریانس مربوط به بازیابی مس

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F مقدار	P>F مقدار	
Block	۱/۳۵	۱	۱/۳۵			
مدل	۲۹۱۲/۹۹	۴	۷۲۸/۲۵	۵۲/۰۷	<۰/۰۰۱	significant
زمان	۱۸/۷۳	۱	۱۸/۷۳	۱/۳۴	۰/۲۵۹۶	
pH	۲۶۴۶/۰۰	۱	۲۶۴۶/۰۰	۱۸۹/۲۰	<۰/۰۰۱	
درصد جامد	۴۸/۷۳	۱	۴۸/۷۳	۳/۴۸	۰/۰۷۵۳	
سایز ذرات	۱۹۹/۵۳	۱	۱۹۹/۵۳	۱۴/۲۷	۰/۰۰۱۰	
باقی مانده	۳۰۷/۶۸	۲۲	۱۳/۹۹			
Lack of Fit	۳۰۴/۴۳	۲۰	۱۵/۲۲	۹/۳۸	۰/۱۰۰۶	not significant
خطای خاص	۳/۲۵	۲	۱/۶۲			
کل	۳۲۲۲/۰۱	۲۷				

با توجه به نمودار نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل، نقاط در یک خط قرار گرفته‌اند که این نشان‌دهنده‌ی اعتماد نسبت به مدل برازش شده است [۱۳].



شکل ۲- منحنی توزیع نرمال باقی‌مانده‌های متغیر پاسخ بازیابی



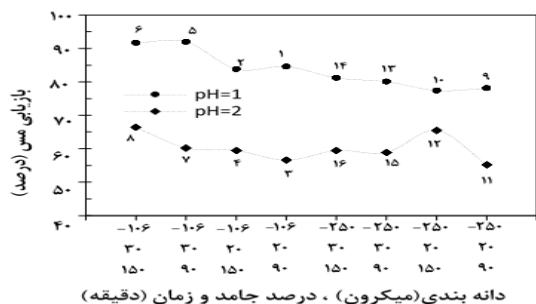
شکل ۳- نمودار مقادیر واقعی پاسخ در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده

۳-۲-۱- بررسی اثر pH بر انحلال مس

تأثیر pH بر بازیابی مس در شکل ۴ نشان داده شده است. اعداد روی نقاط در نمودارها شماره آزمایش مطابق جدول ۶ هست. با توجه به شکل با کاهش pH از ۲ به ۱ بازیابی مس در تمام مقادیر دانه‌بندی، درصد جامد و زمان تقریباً با نرخ ثابتی افزایش می‌یابد. این افزایش در دانه‌بندی‌های کوچک‌تر (۱۰۶-)

میکرون) شدیدتر بوده است. بیشترین میزان بازیابی در pH برابر با ۱ در دانه‌بندی ۱۰۶- میکرون و ۳۰ درصد جامد (۹۲ درصد) به دست آمده است. این نتیجه در انطباق با نتایج مطالعات پیشین هست [۱۲]. با افزایش غلظت اسید (کاهش pH) در مقدار ثابتی از ماده جامد اولیه مقدار بیشتری اسید در دسترس کانی حاوی مس قرار می‌گیرد و بنابراین درصد استخراج افزایش می‌یابد.

همچنین در واکنش شیمیایی انحلال مالاکیت با اسیدسولفوریک با افزایش غلظت عامل واکنش‌دهنده اسید (کاهش pH) سرعت واکنش نیز افزایش یافته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در شرایط بهینه pH برابر ۱ افزایش زمان تأثیر چندانی در هیچ‌یک از درصد‌های جامد و دانه‌بندی نداشته است که نشان از سینتیک سریع‌تر واکنش در غلظت‌های بالای اسید می‌باشد. این امر در حالی است که در pH برابر ۲ همواره افزایش زمان بر میزان بازیابی مؤثر بوده است به طوری که در دانه‌بندی بزرگ‌تر ۲۵۰- میکرون و درصد جامد ۲۰ درصد، افزایش زمان منجر به افزایش ۱۰ درصدی بازیابی مس (۵۵/۲) به ۶۵/۵ درصد) شده است. بنابراین نمودار ترسیم‌شده به خوبی نشان می‌دهد pH می‌تواند اثر زمان را خنثی کرده و سینتیک فرایند انحلال مالاکیت را به طور چشم‌گیری افزایش دهد.



شکل ۴- تأثیر pH (۱ و ۲) بر بازیابی مس در سه عامل ثابت دانه‌بندی، درصد جامد و زمان

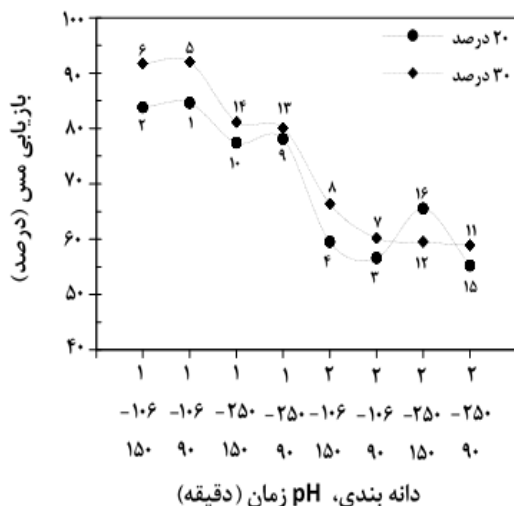
۳-۲-۲- تأثیر دانه‌بندی بر انحلال مس

تأثیر دانه‌بندی بر بازیابی مس در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اثر دانه‌بندی بر میزان بازیابی مس در انحلال اسیدی مالاکیت بسیار کمتر از اثر pH می‌باشد، به طوری که در برخی نقاط اثر عوامل دیگر (pH)

به طوری که در pH برابر ۱ سینتیک فرایند بسیار سریع بوده و افزایش زمان از ۹۰ به ۱۵۰ دقیقه تأثیری بر بازیابی نداشته است. در حالی که در pH برابر ۲ این اثر به دلیل غلظت کمتر عوامل لیچینگ و نیاز به زمان کافی برای برخورد این عوامل جهت انجام فرایند شیمیایی قابل ملاحظه می‌باشد.

### ۳-۲-۳- تأثیر درصد جامد بر انحلال مس

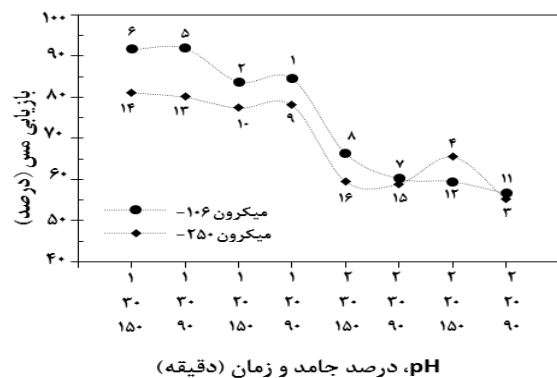
تأثیر درصد جامد بر بازیابی مس در شکل ۶ نشان داده شده است. افزایش میزان درصد جامد در همه آزمایش‌ها با میزان اختلاف تقریباً ثابتی منجر به افزایش بازیابی مس شده است. این اثر تنها در آزمایش با دانه‌بندی ۲۵۰- میکرون، pH برابر ۲ و زمان ۱۵۰ دقیقه معکوس شده است. در این شرایط درصد جامد کمتر ۲۰ درصد به بازیابی بیشتری نسبت به ۳۰ درصد جامد منجر شده است. دلیل افزایش بازیابی با افزایش درصد جامد را می‌توان به عملکرد بهتر فرایند همزنی در اثر برخورد بیشتر و مؤثرتر ذرات در محلول نسبت داد. با افزایش درصد جامد از یک‌میزان مشخص اختلاط به‌خوبی انجام نشده و تماس عامل لیچینگ با سطح کانی مالاکیت دچار اختلال می‌شود. به عبارت دیگر در این شرایط اثر همزنی و اختلاط کمتر بوده و عامل لیچینگ به تدریج به داخل ذرات نفوذ کرده و منجر به انحلال مس شده است.



شکل ۶- تأثیر درصد جامد (۲۰ و ۳۰) بر بازیابی مس در سه عامل

ثابت pH، دانه‌بندی و زمان

به‌طور کامل بر آن غلبه کرده است. باین‌وجود در بیشتر نقاط دانه‌بندی کوچک‌تر ۱۰۶- میکرون منجر به بازیابی بالاتری نسبت به دانه‌بندی ۲۵۰- میکرون شده است. این امر به دلیل عدم دستیابی به درجه آزادی و در معرض قرارگیری کافی فاز مالاکیت است. طبق مطالعات درجه آزادی ارائه‌شده در شکل ۱ نیز در طبقات ابعادی زیر ۱۰۶ میکرون درصد درجه آزادی مالاکیت بیش از ۶۰ درصد است که در نتیجه امکان دسترسی کافی عامل انحلال با سطح مالاکیت را فراهم می‌کند.



شکل ۵- تأثیر دانه‌بندی (۱۰۶- و ۲۵۰- میکرون) بر بازیابی مس در سه عامل ثابت pH، درصد جامد و زمان

از سوی دیگر با مقایسه مقدار بازیابی در دانه‌بندی‌های مختلف ملاحظه می‌شود تنها زمانی دانه‌بندی ریزتر اثر مثبت بر میزان بازیابی دارد که میزان اسید کافی در اختیار مالاکیت قرار گیرد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اثر بهبود بازیابی تنها در pH برابر ۱ ملاحظه می‌شود و در pH برابر ۲ این اثر اندک و یا ناچیز است. در آزمایش شماره ۴ حتی کاهش ابعاد از ۲۵۰- میکرون (آزمایش ۱۲) به ۱۰۶- میکرون منجر به کاهش بازیابی شده است (۶۵/۵ به ۵۹/۵ درصد). برای توضیح این رفتار می‌توان به افزایش سطح آزاد کانی‌های باطله مصرف‌کننده اسید در دانه‌بندی ریزتر اشاره کرد. این مواد با مصرف اسید ناکافی (pH برابر ۲) در سیستم از انحلال مالاکیت ممانعت به عمل آورده‌اند.

بررسی سینتیک فرایند با مقایسه میزان بازیابی در دو زمان ۹۰ و ۱۵۰ دقیقه نیز نشان می‌دهد در هر دو دانه‌بندی pH محلول عامل تعیین‌کننده سینتیک واکنش است

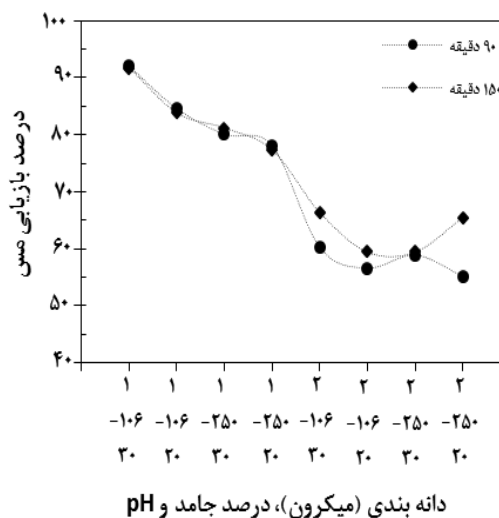


۳-۳-۴- تأثیر زمان بر انحلال مس

تأثیر زمان بر بازیابی مس در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به اینکه تأثیر عامل زمان بر روی بازیابی مس پایین است روند نسبتاً ثابتی در میزان درصد بازیابی با افزایش زمان دیده می‌شود. باین حال در زمان‌های طولانی‌تر با توجه به اینکه میزان برخورد و تماس کانی مالاکیت با عامل انحلال زیاد می‌شود، بازیابی مس اندکی افزایش می‌یابد. این اثر در غلظت‌های اسید پایین‌تر اسید (pH برابر ۲) قابل‌ملاحظه بوده درحالی‌که در غلظت‌های بالاتر به دلیل سینتیک بالای فرایند و حضور یون‌های واکنش‌گر کافی بسیار اندک است. دلیل این امر آن است که در غلظت پایین اسید به زمان کافی برای برخورد مؤثر و تماس کافی سطح مالاکیت با عامل واکنش‌گر اسیدی موردنیاز است.

۳-۳-۵- بهینه‌سازی و اعتبارسنجی شرایط لیچینگ همزنی

به‌منظور بهینه‌سازی شرایط pH برابر با ۱، دانه‌بندی ۱۰۶- میکرون، زمان ۱۵۰ دقیقه و درصد جامد ۳۰ درصد به‌عنوان شرایط بهینه به‌وسیله نرم‌افزار انتخاب شد. بازیابی پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار در این شرایط برابر با ۸۷/۷ بود. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج ۳ آزمایش در شرایط بهینه نیز انجام شد که میانگین مقادیر بازیابی در سه آزمایش برابر با ۹۱/۷ درصد بود که انطباق مناسبی با بازیابی پیش‌بینی‌شده داشت.



شکل ۷- تأثیر زمان بر بازیابی مس در سه عامل ثابت pH، دانه‌بندی و درصد جامد

۳-۳-۳- نتایج آزمایش تعیین میزان مصرف اسید

آزمایش بطری غلتان جهت تعیین میزان مصرف اسید توسط کانسنگ به مدت ۹۶ ساعت انجام شد که نتایج آن در جدول ۹ آورده شده است. با انجام آزمایش، بعد از ۹۶ ساعت، pH در حدود ۱ ثابت ماند که بیانگر این است که مصرف اسید به پایان رسیده است. با توجه به در نظر داشتن وزن اولیه نمونه، میزان اسید مصرفی برابر با ۱۱۳/۸۱ میلی‌گرم به ازای یک کیلوگرم نمونه تعیین شد. همچنین بازیابی مس به‌دست‌آمده برای آزمایش بطری غلتان برابر با ۹۱/۷۳ درصد به دست آمد.

در مقایسه با مطالعات و داده‌های صنعتی این مقدار مصرف اسید نسبتاً بالا بوده که می‌توان دلیل آن را حضور کربنات و سیلیکات بسیار بالا (جدول ۳ و ۴) دانست که با مصرف اسید و یا تشکیل ژل سیلیکاته منجر به اتلاف اسید می‌شوند.

جدول ۹- میزان مصرف اسید برای pH کنترلی برابر ۱

میزان اسید مصرفی (میلی‌گرم اسید بر کیلوگرم نمونه)	pH اولیه محلول	زمان (ساعت)
۲۹/۹۵	۶/۵	۰
۲۷/۳۸	۵/۱	۱
۱۷/۹۷	۳	۲
۱۳/۶۹	۲/۵	۴
۸/۵۶	۱/۷	۸
۷/۷۰	۱/۶	۱۶
۵/۹۹	۱/۴	۳۲
۲/۵۷	۱/۲	۶۴
۰/۰۰	۱	۹۶
۱۱۳/۸۱	مجموع	

۳-۳-۴- نتایج آزمایش‌های سم‌ناتسیون

به‌منظور بررسی عوامل مؤثر بر سم‌ناتسیون مس، میزان بازیابی در فرایند سم‌ناتسیون و انتخاب شرایط بهینه تعداد ۸ آزمایش طراحی و انجام شد که نتایج آزمایش‌های سم‌ناتسیون در جدول ۱۰ آورده شده است.

## ۳-۴-۱- تأثیر pH بر سمنتاسیون مس

مس رقابت کند اگرچه به دلیل میزان محدود اکسیژن موجود در محیط فرایندی غالب نیست. هر دو این واکنش‌های جانبی می‌تواند بر نرخ بازیابی مس در سمنتاسیون مؤثر باشد.

در مورد یون  $H^+$  که تولید گاز هیدروژن می‌کند دو اثر متقابل بر فرایند سمنتاسیون دارد: ۱- سطح کاتدیک موردنیاز برای احیا مس را کاهش داده و نرخ بازیابی سمنتاسیون را کم می‌کند. ۲- با ایجاد اختلاط بیشتر نرخ انتقال جرم را افزایش داده و بر بازیابی مس اثر مثبتی دارد. با توجه به افزایش بازیابی در pH های پایین‌تر به نظر می‌رسد مکانیزم تولید گاز هیدروژن در این فرایند مؤثرتر از مصرف آهن توسط یون‌های  $H^+$  بوده و منجر به بهبود بازیابی شده است. همچنین در غلظت‌های اسید پایین امکان تشکیل اکسید و هیدروکسید آهن بر سطح آهن افزوده شده دارد که منجر به کاهش بازیابی می‌شود. محلول‌های مس به شدت اسیدی از هیدرولیز آهن و تشکیل هیدروکسید آهن جلوگیری می‌کنند. رسوب هیدروکسید آهن ممکن است عیار رسوب مس را نیز کاهش دهد [۱۵]. اثر دیگری که در داده‌های مربوط به سمنتاسیون مس مشاهده می‌شود اثر pH در سینتیک فرایند است به طوری که در pH های پایین سینتیک فرایند به شدت بالا بوده و مثلاً در دمای ۶۰ درجه در ۱۰ دقیقه اول تمام مس موجود ترسیب کرده است. در pH های بالاتر این فرایند به زمان بیشتری نیاز داشته و حتی در دمای ۶۰ درجه نیز تفاوت چشم‌گیری در میزان مس رسوب کرده در مدت زمان ۱۰ و ۳۰ دقیقه مشاهده می‌شود.

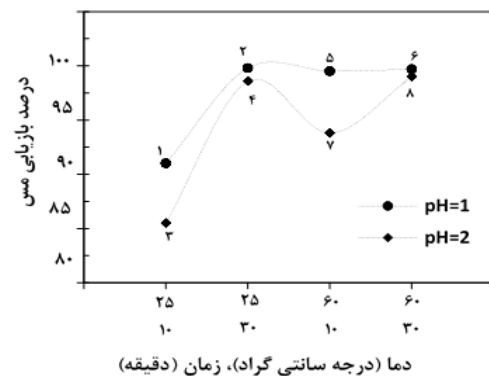
## ۳-۴-۳- تأثیر دما بر سمنتاسیون مس

شکل ۹ تأثیر عامل دما بر سمنتاسیون مس در pH های ثابت ۱ و ۲ و زمان‌های ۱۰ و ۳۰ دقیقه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش دما تقریباً در تمام نقاط منجر به بهبود بازیابی در سمنتاسیون مس شده است. در واقع درجه حرارت یک پارامتر کلیدی در تعیین سرعت واکنش و مکانیسم‌ها در سمنتاسیون است. سرعت سمنتاسیون با افزایش دما افزایش می‌یابد زیرا افزایش دما می‌تواند با کاهش ویسکوزیته و در نتیجه افزایش ضریب نفوذ (افزایش نفوذپذیری یون‌های

شکل ۸ تأثیر عامل pH بر سمنتاسیون در مدت‌زمان‌های ثابت ۱۰ و ۳۰ دقیقه و دماهای ۲۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمام شرایط دما و مدت‌زمان میزان بازیابی سمنتاسیون مس در pH برابر ۱ بالاتر از pH برابر ۲ بوده است.

جدول ۱۰- نتایج آزمایش‌های سمنتاسیون مس

شماره آزمایش	زمان (دقیقه)	pH	دما (سانتی‌گراد)	درصد بازیابی مس
۱	۱۰	۱	۲۵	۹۱/۰
۲	۳۰	۱	۲۵	۹۹/۸
۳	۱۰	۲	۲۵	۸۵/۵
۴	۳۰	۲	۲۵	۹۸/۶
۵	۱۰	۱	۶۰	۹۹/۵
۶	۳۰	۱	۶۰	۹۹/۷
۷	۱۰	۲	۶۰	۹۳/۸
۸	۳۰	۲	۶۰	۹۹/۰



شکل ۸- تأثیر pH بر درصد بازیابی سمنتاسیون مس در دو عامل ثابت دما و زمان

همان‌طور که پیش‌ازاین تشریح شد سمنتاسیون مس از یک فرایند الکتروشیمیایی پیروی می‌کند که در آن آهن به دلیل تمایل آندیک بالاتر از مس اکسید شده و الکترون آزاد شده را در اختیار مس قرار می‌دهد تا احیا گردد. یون  $H^+$  موجود در محلول با یون مس برای دریافت الکترون از آهن رقابت می‌کنند. به عبارت دیگر انحلال اسیدی می‌تواند مانع سمنتاسیون مس شده و میزان بازیابی را کاهش دهد. اکسیژن موجود در محیط نیز می‌تواند برای دریافت الکترون از آهن با

است، بنابراین واکنش سمنتاسیون در دقایق ابتدایی کامل می‌شود و تأثیر زمان بر سمنتاسیون کاهش می‌یابد.

### ۳-۴-۴- بهینه‌سازی سمنتاسیون مس

بدین منظور آزمایش با شرایط زمان ۳۰ دقیقه، pH برابر با ۱ و دمای محیط به‌عنوان آزمایش بهینه انتخاب گردید. پس از انجام آزمایش در این شرایط، پودر مس سمنت شده جهت انجام آنالیز XRF به آزمایشگاه XRF دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس ارسال شد. نتایج آنالیز XRF در جدول ۱۱ آورده شده است. میزان درصد خلوص مس ۹۶/۹۱ درصد و ناخالصی پودر مس سمنت شده (عمدتاً آهن) ناچیز است.

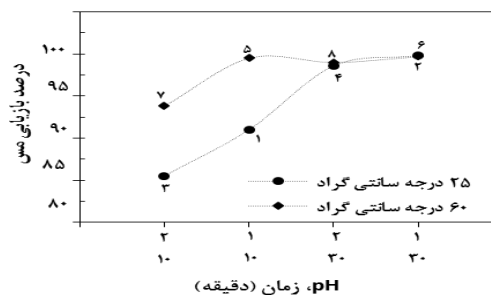
جدول ۱۱- نتایج مربوط به آنالیز XRF پودر مس سمنت شده

ترکیب اکسید	درصد	عنصر	درصد
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۹۹۰	Cu	۹۶/۹۰۸
SiO <sub>2</sub>	۰/۷۵۵	Zn	۰/۱۷۲
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۴۹۰	Pb	۰/۰۹۸
SO <sub>3</sub>	۰/۳۵۹	Cr	۰/۰۲۰
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۱۳۹	Cl	۰/۰۱۷
MnO <sub>2</sub>	۰/۰۵۲		

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بازیافت مس از باطله‌های فرآوری معدن سرب قله کفتران به روش لیچینگ همزنی و سمنتاسیون بررسی شد. به‌منظور شناخت بهتر فرایند و عوامل مؤثر بر آن و همچنین بررسی امکان بهینه‌سازی فرآیند، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سیستماتیک با شرایط عملیاتی تعیین شده انجام شد. با توجه به مطالعات کانی‌شناسی و XRD مشخص شد که کانی ملاکیت کانی اصلی حاوی مس است. عیار مس در حدود ۱ درصد تعیین شد. نتایج مطالعات لیچینگ همزنی نشان داد که از میان چهار عامل مورد بررسی pH و اندازه ذرات دارای تأثیر بیشتری بر بازیابی مس هستند و درصد جامد و زمان اثر کمتری دارند. بیشترین بازیابی مس در مدت زمان ۹۰ دقیقه، pH برابر با ۱، دانه‌بندی ۱۰۶ میکرون و درصد جامد ۳۰ به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط بهینه عملیاتی بیشینه میزان بازیابی ۹۱/۷ درصد خواهد بود. نتیجه آزمایش بطری غلتان حاکی از این بود که میزان اسید مصرفی باطله

مس) و تماس مؤثرتر با سطح آهن منجر به افزایش نرخ سمنتاسیون شود [۱۸].

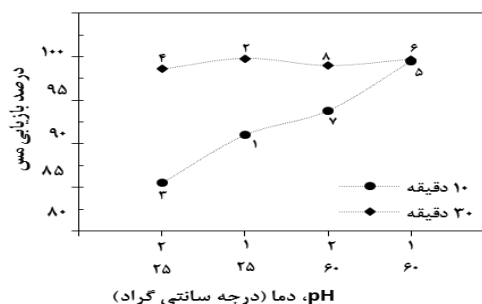


شکل ۹- تأثیر دما بر درصد بازیابی سمنتاسیون مس در دو عامل ثابت pH و زمان

همچنین با توجه به شکل تأثیر دما در مدت زمان ۳۰ دقیقه به دلیل آنکه واکنش سمنتاسیون در همان دقایق ابتدایی کامل می‌شود، کاهش می‌یابد.

### ۳-۴-۳- تأثیر زمان بر سمنتاسیون مس

شکل ۱۰ تأثیر عامل زمان بر سمنتاسیون مس به ترتیب در دماهای ثابت ۲۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش زمان منجر به افزایش میزان سمنتاسیون مس شده است. افزایش زمان تماس منجر به افزایش میزان سمنتاسیون مس می‌شود و پس از یک‌زمان خاص بسته به مقدار آهن موجود و غلظت یون‌های مس در محلول، واکنش سمنتاسیون مس کامل می‌شود؛ بنابراین مقدار مس رسوب شده با زمان تماس در شرایط ثابت دیگر پارامترها متناسب است [۱۵].



شکل ۱۰- تأثیر زمان بر درصد بازیابی سمنتاسیون مس در دو عامل ثابت pH و دما

با توجه به شکل ۱۰ با توجه به اینکه در دمای ۶۰ درجه سینتیک سمنتاسیون بیشتر از دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

شرایط بهینه انتخاب شد. نتایج حاصل از آنالیز پودر مس سمنت شده نشان داد که درصد خلوص مس ۹۶/۹ درصد و ناخالصی پودر مس ناچیز و عمدتاً اکسید آهن است. میزان بازیابی کل مس در فرایند لیچینگ همزنی و سمنتاسیون در شرایط بهینه ۸۸/۹ درصد تعیین شد.

[10] Apua C, Kime M-B, Mukuna Patrick M.,2013. A study of Leaching of Copper Oxide Ore by Sulphuric Acid.

[۱۱] قراباغی م، ایران نژاد ا، آزاد مهر ا. ۱۳۹۰. بهینه سازی استحصال مس از کانسنگ طارم با استفاده از لیچینگ و استخراج حلالی. اولین همایش ملی مس.

[12] Bayati B, Azizi A, Karamoozian M.,2018. A Comprehensive Study of The Leaching Behavior and Dissolution Kinetics of Copper Oxide Ore in Sulfuric Acid Lixiviant, Chemistry, Chemical Engineering.

[۱۳] نظری روشن کودهی ب، کاراموزیان م، شفایی ض. ۱۳۹۳. ارزیابی اجرای عملیات تانک لیچینگ بر روی نرمة معدن چاه موسی: دانشگاه صنعتی شاهرود. پایان نامه کارشناسی ارشد.

[14] Dönmez B, Sevim F, Saraç HJH.,1999. A Kinetic Study Of The Cementation Of Copper From Sulphate Solutions Onto A Rotating Aluminum Disc.

[15] Fouad O, Basir S.,2005. Cementation-Induced Recovery Of Self-Assembled Ultrafine Copper Powders From Spent Etching Solutions Of Printed Circuit Boards.

[۱۶] ایران نژاد م، سالاری راد م، آقا محمدی م. ۱۳۸۸. مطالعه و بررسی سینتیک سمنتاسیون مس نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر.

[۱۷] رستاخیز ش، رنجبر م، شفایی م، دانش پژوه ش. ۱۳۹۱. بهینه سازی پارامترهای عملیاتی سمنتاسیون مس از محلول های لیچینگ در مقیاس پایه. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید باهنر کرمان. شهرپور.

[18] Gros F, Baup S, Arousseau MJH.,2011. Copper Cementation On Zinc And Iron Mixtures: Part 2: Fluidized Bed Configuration.

فرآوری معدن متروکه قله کفتران برابر با ۱۱۳/۸ کیلوگرم بر تن است. تأثیر عوامل pH، دما و زمان بر روی میزان سمنتاسیون مس نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که هر سه عامل pH، زمان و دما بر سمنتاسیون مس مؤثر است. همچنین شرایط عملیاتی pH برابر با ۲، زمان ۳۰ دقیقه و دمای محیط به عنوان

#### منابع

[1] Kiraz E.,2014. Recovery of Copper from Oxide Copper Ore by Flotation and Leaching: Middle East Technical University.

[2] Schlesinger Me, King Mj, Sole Kc, Davenport Wg.,2011. Extractive Metallurgy of Copper: Elsevier.

[3] Grossoehme N, Kehl-Fie Te, Ma Z, Adams Kw, Cowart Dm, Scott Ra, Et Al.,2011. Control of Copper Resistance and Inorganic Sulfur Metabolism by Paralogue Regulators in Staphylococcus Aureus. Journal of Biological Chemistry.

[4] Popescu Ic, Ilea P, Imre-Lucaci F., 2011, Electrochemical Methods for Recovery of Copper from Waste Waters and Solid Wastes.

[5] Shabani M, Irannajad M, Azadmehr A.,2012. Metallurgy,, Materials. Investigation On Leaching Of Malachite By Citric Acid.

[6] Bogdanović GD, Stanković VD, Trumić MS, Antić DV, Trumić MŽ.,2016. Leaching Of Low-Grade Copper Ores: A Case Study For'kraku Bugaresku-Cementacija'deposits (Eastern Serbia). Journal Of Mining And Metallurgy A: Mining.

[۷] رستاخیز ش، رنجبر م، شفایی م، دانش پژوه ش. ۱۳۹۱. بهینه سازی پارامترهای عملیاتی سمنتاسیون مس از محلول های لیچینگ در مقیاس پایه. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید باهنر کرمان. شهرپور.

[8] Demirkiran N, Kuenkuel Ajtonmsoc, 2011. Recovering Of Copper with Metallic Aluminum.

[9] Ata ON, Çolak S, Ekinçi Z, Çopur MJCE, 2001. Determination of the Optimum Conditions for Leaching of Malachite Ore in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Solutions, Engineering- Biotechnology TICPEP.

پی نوشت

- 1 Agitation Leaching
- 2 Cementation
- 3 Ata et al.
- 4 Clotilde Apua
- 5 Bayati et al.
- 6 Donmez et al.
- 7 Fouad and Basir