



## Agitation and Column Leaching of Mixed Low Grade Oxide and Sulphide Ore of Sungun Copper Complex

A. Latifi Saray<sup>1</sup>, V. Aghazadeh<sup>2\*</sup>, M. Faridazad<sup>3</sup>, R. Dabbaghi<sup>1</sup>

1- MSc. Student in Mineral Processing, Sahand University of Technology

2- Professor of Mineral Processing, Sahand University of Technology

3- Assistant Professor of Mineral Exploration, Sahand University of Technology

Email: v.aghazadeh@sut.ac.ir

### Abstract

*This research was conducted with the aim of investigating the influencing factors on column and agitation leaching of copper from a mixture of low-grade oxide and sulphide ores of Sungun copper complex. After sample preparation and identification, agitation leaching experiments were conducted to investigate the effect of time parameters, sulfuric acid concentration and ore particle size on copper recovery and acid consumption by ore in pyrex glass reactor. Copper recovery reached 71.5% in 2 hours, acid concentration 30 g/l, ore particle size -75 microns. The consumption of acid in the mentioned conditions was 84 kg/t ore. Column leaching experiments were carried out in columns with a height of 130 cm and an internal diameter of 11 cm to investigate the effect of parameters of acid concentration, irrigation rate, and ore particle size. The amount of copper recovery in the columns varied from 44.01 to 62.11% and iron recovery from 17.73 to 47.09%. The amount of acid consumption by ore in columns with different leaching conditions was obtained from 31 to 55 kg/t ore. Due to the predominance of copper oxide compounds in the sample, in less than 20 days, almost more than 90% of copper oxide is dissolved and the increase in leaching time increases the recovery of iron in the process and can cause problems in the subsequent copper extraction processes, i.e. solvent extraction and electrowinning.*

Received: 16 September 2024

Accepted: 8 March 2025

Page Number: 22-35

### Keywords:

Agitation Leaching,  
Column Leaching,  
Sulphuric Acid,  
Mixture of Low Grade  
Copper,  
Sungun Copper Complex

### Please Cite this Article Using:

Latifi Saray, A., Aghazadeh, V., Faridazad, M., & Dabbaghi, R. (2026). Agitation and Column Leaching of Mixed Low Grade Oxide and Sulphide Ore of Sungun Copper Complex. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(142), 22-35, [In Persian].



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).



## لیچینگ همزنی و ستونی مخلوط کان سنگ کم عیار اکسیدی و سولفیدی مجتمع مس سونگون

علی لطیفی سرای<sup>۱</sup>، والح آقازاده<sup>۲\*</sup>، مروت فرید آزاد<sup>۳</sup>، رومینا دباغی<sup>۱</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فراوری مواد معدنی، دانشگاه صنعتی سهند

۲- استاد فراوری مواد معدنی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

۳- استادیار اکتشاف مواد معدنی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

پیام‌نگار: v.aghazadeh@sut.ac.ir

### چکیده

این تحقیق با هدف بررسی عوامل تأثیرگذار بر لیچینگ همزنی و ستونی مس از مخلوط کان سنگ کم عیار اکسیدی و سولفیدی مجتمع مس سونگون انجام شد. پس از آماده‌سازی و شناسایی نمونه، آزمایش‌های لیچینگ همزنی برای بررسی اثر مشخصه‌های زمان، غلظت اسید سولفوریک و ابعاد ذرات سنگ معدن بر بازیابی مس و میزان مصرف اسید به وسیله سنگ معدن در راکتور شیشه‌ای پیرکس انجام گرفت. بازیابی مس در مدت زمان ۲ ساعت، غلظت اسید ۳۰ گرم بر لیتر، ابعاد ذرات سنگ معدن ۷۵- میکرون به ۷۱/۵ درصد رسید. میزان مصرف اسید در شرایط مذکور ۸۴ کیلوگرم به ازای هر تن از سنگ معدن به دست آمد. آزمایش‌های لیچینگ ستونی در ستون‌های با ارتفاع ۱۳۰ و قطر داخلی ۱۱ سانتی‌متر برای بررسی اثر مشخصه‌های غلظت اسید، دبی پاشش، ابعاد ذرات انجام شد. میزان بازیابی مس در ستون‌ها از ۴۴/۰۱ تا ۶۲/۱۱ درصد و بازیابی آهن از ۱۷/۷۳ تا ۴۷/۰۹ درصد متفاوت بود. میزان مصرف اسید به وسیله سنگ معدن در ستون‌ها با شرایط مختلف لیچینگ از ۳۱ تا ۵۵ کیلوگرم به ازای هر تن کان سنگ به دست آمد. به علت غالب بودن ترکیبات اکسیدی مس در نمونه، در کمتر از ۲۰ روز تقریباً بیش از ۹۰ درصد مس اکسیدی حل می‌شود و افزایش زمان لیچینگ موجب افزایش بازیابی آهن در فرایند می‌شود و می‌تواند مشکلاتی در فرایندهای بعدی استحصال مس یعنی استخراج با حلال و الکترونیگ داشته باشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

شماره صفحات: ۲۲ تا ۳۵

### کلیدواژه‌ها:

لیچینگ همزنی،

لیچینگ ستونی،

اسید سولفوریک،

مخلوط کان سنگ کم عیار

مس،

مجتمع مس سونگون

\* تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی معدن

استناد به مقاله:

لطیفی سرای، علی، آقازاده، والح، فرید آزاد، مروت، و دباغی، رومینا. (۱۴۰۴). لیچینگ همزنی و ستونی مخلوط کان سنگ کم عیار اکسیدی و سولفیدی مجتمع مس سونگون، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴(۱۴۲)، ۲۲-۳۵.

## ۱. مقدمه

مس یکی از فلزات غیر آهنی است که در صنایع مختلف، از جمله صنایع الکتریکی، خودرو و ساختمان سازی کاربرد فراوانی دارد. این فلز در طبیعت در کانی های اکسیدی و سولفیدی یافت می شود. کانی های اکسیدی اصلی شامل مالاکیت  $Cu_2CO_3(OH)_2$ ، آزوریت  $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$  و کریزوکولا  $(Cu,Al)_2H_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$  است [۱]. مس در سولفیدها بیشتر به اشکال کالکوپیریت  $CuFeS_2$ ، بورنیت  $Cu_5FeS_4$ ، کوولیت  $CuS$  و کالکوسیت  $Cu_2S$  یافت می شود [۲]. در سال های اخیر، افزایش تقاضا برای مس به دلیل رشد اقتصادی باعث کاهش کان سنگ های سولفیدی و اکسیدی مس با عیار بالا شده و بر این اساس، کانه های کم عیار، باطله ها و منابع ثانویه به عنوان منابع مهم فلز مس مطرح شده است. از دیدگاه فرآوری مواد معدنی، مس از منابع اولیه و ثانویه خود با فرایندهای پیرومتالورژیکی و یا هیدرومتالورژیکی استحصال می شود [۳]. به دلیل آلودگی شدید زیست محیطی ناشی از تولید گاز  $SO_2$ ، بازیابی کم فلز برای منابع کم عیار و افزایش هزینه ها در روش پیرومتالورژی، تولید فلز مس به روش هیدرومتالورژی در دهه های اخیر برجسته تر شده است. لیچینگ سنگ معدن اولین مرحله در فرایند هیدرومتالورژی است که در آن سنگ معدن با عامل های اسیدی یا قلیایی برای استخراج فلز از فاز جامد و انتقال آن به فاز محلول عمل آوری می شود [۴]. هیپ لیچینگ یکی از انواع روش های لیچینگ است. هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی کم این فرایند، هیپ لیچینگ را برای سنگ معدن های کم عیار مناسب می کند [۵]. کانی های اکسید مس به راحتی لیچینگ می شوند، ولی کانی های سولفیدی مس مانند کالکوسیت، بورنیت، کوولیت تحت شرایط اکسندگی لیچینگ می شوند. کالکوپیریت در شرایط ملایم هیپ لیچینگ به میزان کمتری لیچینگ می شود. علاوه بر لیچینگ کان سنگ های با عیار پایین، هیپ لیچینگ برای بازیابی مس باقی مانده از باطله های هیپ، لیچینگ حوضچه ای، یا لیچینگ همزنی نیز استفاده می شود [۶]. کان سنگ های اکسیدی مس را می توان تحت شرایط اسیدی نسبتاً ملایم فرآوری کرد؛ زیرا بیشتر کانی های اکسیدی مس قابلیت حلالیت بالایی دارند [۷]. اگرچه کانی های سولفیدهای مس در برابر لیچینگ مقاوم هستند و نیاز به افزودن عامل های اکسیدکننده دارند، اما استخراج مس را غالباً

می توان با افزایش غلظت عامل های انحلال به ویژه در لیچینگ کان سنگ های اکسیدی مس - که در آن انحلال پذیری بیشتری در pH کمتر انجام می شود - بهبود داد؛ این امر باعث افزایش مصرف اسید به وسیله گانگ نیز می شود [۸]. بسته به کانی شناسی کان سنگ موجود در هیپ، زمان لیچینگ ممکن است از ۹۰ روز تا سه سال متغیر باشد. هیپ لیچینگ کالکوپیریت هنوز به دلیل بازیابی کمتر، سینتیک پایین و زمان زیاد فرایند، غیر اقتصادی است [۹]. شناسایی ترکیبات و کانی شناسی سنگ معدن و باطله از مهم ترین مشخصه های مؤثر بر هزینه ها و بازیابی است [۱۰]. مهم ترین مشخصه های تأثیرگذار بر استخراج مس در این روش، کانی شناسی سنگ معدن و باطله، توزیع اندازه ذرات، زمان لیچینگ، نفوذ پذیری، دبی پاشش، دما و غلظت اسید است که برخی از آن ها کنترل ناشدنی هستند [۱۱]. حضور سولفات آهن فریک به عنوان اکسیدکننده همراه با عامل انحلال باعث افزایش بازیابی مس در هیپ لیچینگ کان سنگ های سولفیدی مس می شود [۱۲].

با توجه به آنچه گذشت، مطالعات زیادی برای لیچینگ کانی های اکسیدی و سولفیدی مس به صورت مجزا انجام شده است؛ با این وجود، تحقیقات کمی برای لیچینگ مخلوط کانی های اکسیدی و سولفیدی مس وجود دارد. در ضمن، مشخصات هر کان سنگ نسبت به کان سنگ دیگری متفاوت است که این امر باعث می شود تا میزان و سرعت لیچینگ مس و مصرف مواد شیمیایی کان سنگ های مختلف، متفاوت باشد. لذا، در این تحقیق عوامل تأثیرگذار بر لیچینگ همزنی و ستونی مس از مخلوط کان سنگ کم عیار اکسیدی و سولفیدی مجتمع مس سونگون بررسی شد. آزمایش های لیچینگ همزنی با هدف دستیابی به بیشترین بازیابی در کمترین زمان ممکن و بیشترین مصرف اسید انجام شد. در ادامه، برای شبیه سازی فرایند صنعتی استحصال مس از کان سنگ کم عیار به روش هیپ لیچینگ، آزمایش های لیچینگ ستونی در شرایط مختلف انجام شد.

## ۲. مواد و روش ها

### ۲-۱ تهیه و آماده سازی نمونه

برای انجام آزمایش ها، حدود ۴۰۰ کیلوگرم نمونه از پدهای هیپ لیچینگ معدن مس سونگون برداشته شد. آماده سازی نمونه، شامل: خردایش با سنگ شکن ها، نمایش با آسیا و دانه بندی است.

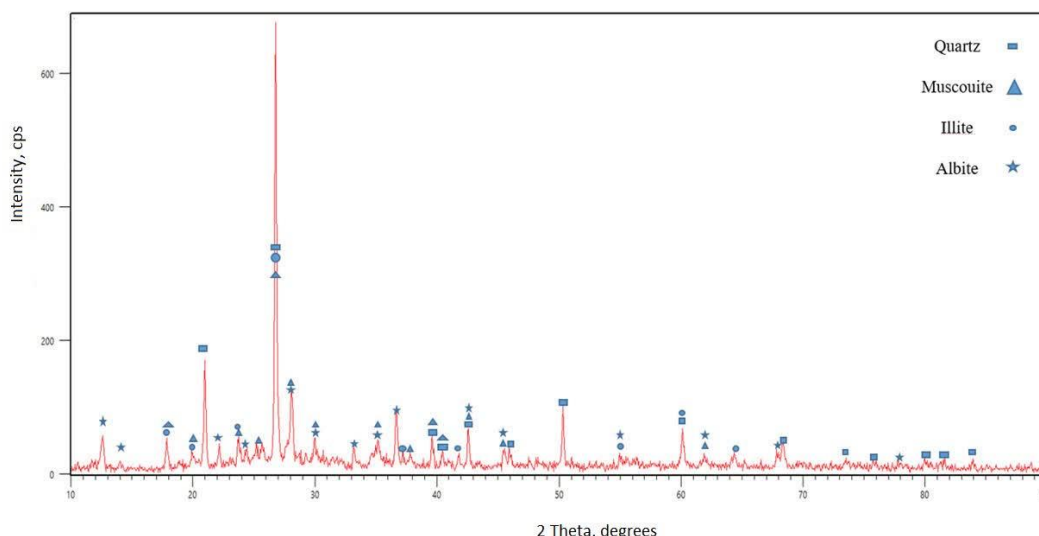
میکرون و برای آزمایش‌های لیچینگ ستونی به ابعاد ۱/۵۸، ۱/۲۷- و ۰/۶۵- سانتی‌متر خرد و به‌طور تصادفی انتخاب‌شد. سپس، نمونه‌هایی از محدوده ابعادی ۷۵- میکرون برداشته‌شد و با پراش پرتو ایکس (XRD) آنالیز کانی‌شناسی انجام‌شد. برای اندازه‌گیری مقدار عنصر مس و آهن از دستگاه جذب اتمی (AAS) استفاده‌شد. در جدول (۱) نتیجه آنالیز جذب اتمی آورده‌شده‌است. به‌کمک دستگاه جذب اتمی، مقدار مس کل در نمونه ۰/۴ درصد به‌دست‌آمد. همچنین، مقدار مس اکسیدی به‌وسیله دستگاه جذب اتمی ۰/۲۵ درصد تعیین‌شد. از تفریق مقدار مس کل و مس اکسیدی می‌توان مقدار مس سولفیدی را در نمونه به‌دست‌آورد. بنابراین، مقدار مس سولفیدی در نمونه ۰/۱۵ درصد است. الگوی XRD نمونه اولیه در شکل (۱) آورده‌شده‌است. به‌علت کم‌بودن عیار مس و در نتیجه، پایین‌بودن مقادیر کانی‌های مس در نمونه، روش XRD قادر به شناسایی کانی‌های مس نشده‌است. کانی‌های عمده موجود در نمونه اولیه کوارتز، موسکویت، آلبیت، ایلیت تشخیص‌داده‌شد.

بدین‌منظور، نمونه تهیه‌شده کاملاً مخلوط و با سنگ‌شکن‌های فکی بزرگ و کوچک تا کمتر از ۱/۵۸ سانتی‌متر خردایش‌شد. سپس، نمونه با ریفل به دو بخش ۲۰۰ کیلوگی تقسیم‌شد. نصف نمونه به‌عنوان شاهد کنار گذاشته و نصف دیگر برای انجام مطالعات شناسایی و آزمایش‌های فرایندی برداشته‌شد. در ادامه، نمونه‌های معرف برای انجام آنالیز شیمیایی، کانی‌شناسی تهیه‌شد. همچنین، حدود ۱۰ کیلوگرم نمونه بعداز خردایش با سنگ‌شکن غلتکی و در ادامه، با آسیاب گلوله‌ای تا ابعاد ۲۵۰-، ۱۵۰- و ۷۵- میکرون برای انجام آزمایش‌های لیچینگ همزنی رسانده‌شد. زمان ماند آسیا برای سه ابعاد ۲۵۰-، ۱۵۰-، ۷۵- میکرون به‌ترتیب ۱۰، ۱۵، ۲۵ دقیقه در نظر گرفته‌شد. میزان درصد گلوله در آسیای گلوله‌ای، ۳۵٪ به‌کار گرفته‌شد. برای انجام آزمایش‌ها حدود ۴۰۰ کیلوگرم سنگ معدن از پدهای هیپ‌لیچینگ معدن مس سونگون برداشته‌شد. نمونه، پس‌از همگن‌شدن و تقسیم به بخش‌های کوچک‌تر، برای آزمایش‌های لیچینگ همزنی در سه محدوده ۷۵-، ۱۵۰-، ۲۵۰-

جدول ۱. نتایج آنالیز نمونه اولیه با دستگاه جذب اتمی.

Table 1. Sample analysis results with atomic absorption device.

Element	Amount (%)
Total Copper	0.4
Copper Oxide	0.25
Copper Sulfide	0.15
Iron	4.53

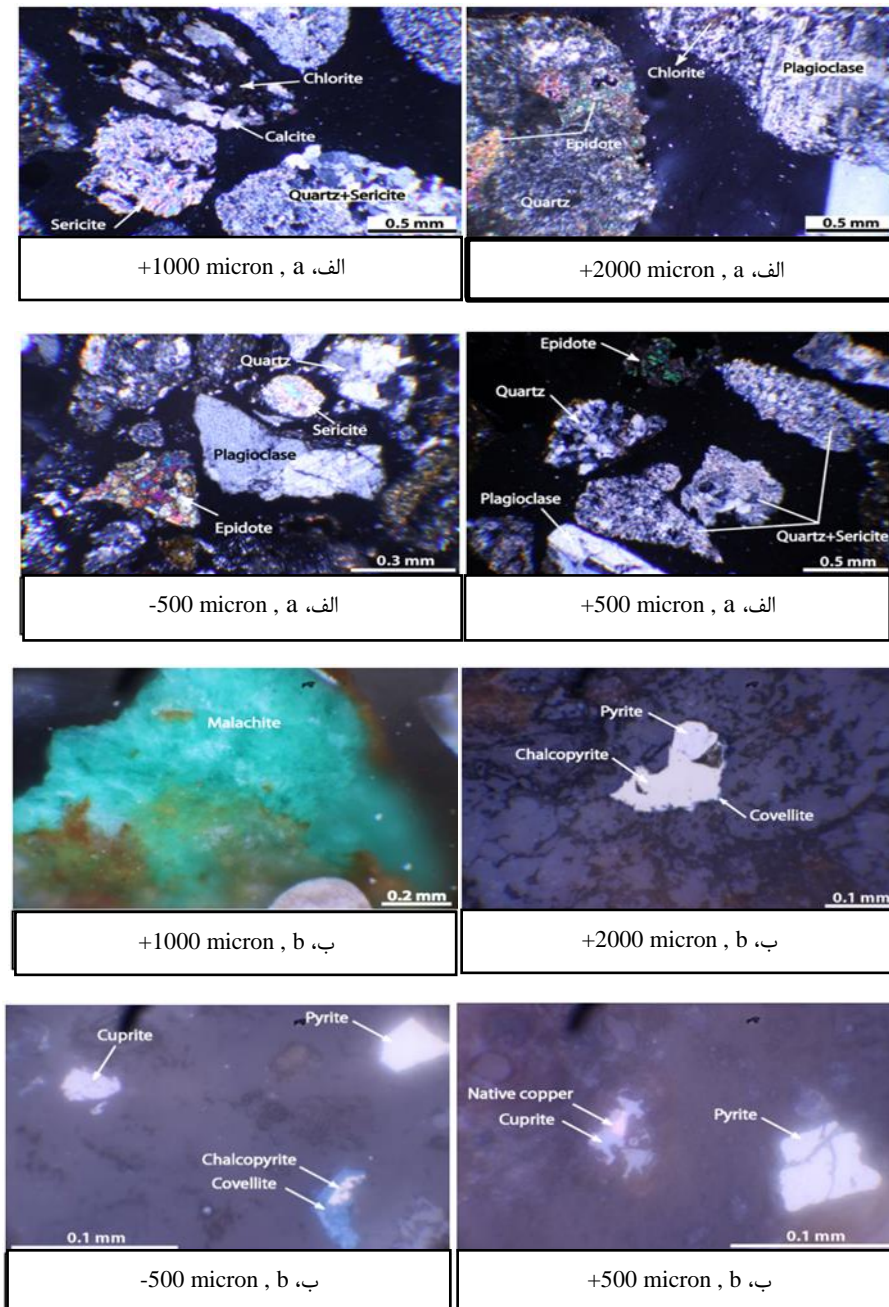


شکل ۱. نتایج آنالیز XRD نمونه اولیه.

Figure 1. XRD analysis results of the prototype.

مقاطع صیقلی در اینجا بیشتر کانی‌های مس شناسایی شدند. مطابق شکل، کانی‌های اکسیدی مس مانند مالاکیت، کوپریت و کانی‌های سولفیدی غالب نظیر کالکوپریت و کوولیت مشاهده شد.

مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک و صیقلی نمونه در چهار محدوده ابعادی +۲۰۰۰، +۱۰۰۰، +۵۰۰ و -۵۰۰ میکرون برای آنالیز کانی‌شناسی بررسی و نتایج آن در شکل (۲) آورده شد. با مطالعه مقاطع نازک کانی‌های شفاف یعنی سیلیکات‌ها و با مطالعه



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی از (a) مقاطع نازک و (b) مقاطع صیقلی.

Figure 2. Microscopic images of (a) thin and (b) polished sections.

## ۲-۲ آزمایش‌های لیچینگ همزنی و ستونی

آزمایش‌های لیچینگ همزنی با بررسی مشخصه‌هایی هم‌چون ابعاد ذرات، غلظت اسید، زمان انجام‌شد. غلظت اسید در سه محدوده ۵۰، ۳۰، ۱۰ گرم بر لیتر، ابعاد ذرات در سه محدوده ۷۵، ۱۵۰، ۲۵۰ میکرون و در زمان‌های ۱۵، ۶۰، ۱۲۰ دقیقه آزمایش‌شد. این آزمایش‌ها اطلاعات اولیه را برای استخراج مس و مصرف اسید در مدت زمان کوتاهی ارائه می‌دهند [۱۳]. مصرف اسید معمولاً در این آزمایش‌ها بیش از حد برآورد می‌شود؛ بنابراین، نتایج مصرف اسید باید به صورت نیمه کمی در نظر گرفته شود [۱۴]. این آزمایش‌ها در راکتور شیشه‌ای پیرکس به حجم کل ۱/۵ لیتر انجام‌شد. در هر آزمایش ۵۰ گرم سنگ معدن خردشده به همراه ۵۰۰ میلی‌لیتر محلول اسیدی به‌داخل راکتور شیشه‌ای ریخته می‌شد و با همزن مکانیکی با دور ثابت ۴۰۰ دور بر دقیقه و در دمای ثابت آزمایشگاه به هم زده می‌شد.

آزمایش لیچینگ ستونی، مدلی شبیه برای فرایند هیپ‌لیچینگ و هدف از انجام آزمایش‌های لیچینگ ستونی مطالعه میزان انحلال مس، مقدار مصرف اسید و تطبیق نتایج با حالت صنعتی عملیات هیپ‌لیچینگ است [۱۵]. آزمایش‌های لیچینگ ستونی معیار و مشخصه‌های اصلی هیپ‌لیچینگ را بررسی می‌کند که این مشخصه‌ها عبارت‌است از: ابعاد سنگ معدن، غلظت اسید، دبی پاشش، مدت زمان عملیات لیچینگ، میزان مصرف اسید، نفوذپذیری سنگ [۱۶]. ستون‌های لیچینگ با قطر ۱۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۳۰ سانتی‌متر برای انجام آزمایش‌های لیچینگ ستونی استفاده‌شد. شرایط تست لیچینگ ستونی در جدول (۲) ارائه شده‌است.

## ۳-۲ میزان مصرف اسید در لیچینگ همزنی

سیاهه‌ای از کانی‌های مس که حین لیچینگ اسید مصرف و یا تولید می‌کنند به همراه واکنش‌های مربوطه در جدول (۳) آمده‌است. کانی‌های اکسیدی و سیلیکاته مس مستقیماً با اسید سولفوریک حل می‌شوند و مصرف‌کننده اسید هستند (واکنش‌های ۱ تا ۵). کانی‌های سولفیدی مس علاوه بر اسید نیاز به اکسیدکننده، مانند اکسیژن و یا یون فریک دارند و بسته به شرایط محیط لیچینگ اسید سولفوریک مصرف و یا تولید می‌شود. گروه دیگری از کانی‌ها که مصرف‌کننده اسید هستند؛ گانگ همراه کانی‌های مس است. برای تعیین میزان مصرف اسید به وسیله سنگ معدن، آزمایش با شرایط غلظت اسید ۳۰ گرم بر لیتر، ۵۰ گرم جامد با ابعاد ۷۵- میکرون در ۵۰۰ میلی‌گرم محلول اسیدی، دور همزنی ۴۰۰ دور بر دقیقه در مدت زمان ۸ ساعت انجام‌شد. در پایان آزمایش با استفاده از تیتراسیون میزان مصرف اسید حساب‌شد. اسید مصرفی ۴/۲ گرم اسید به ازای ۵۰ گرم جامد و یا ۸۴ کیلوگرم به ازای یک تن از نمونه معدنی به دست آمد. این مقدار مصرف اسید برای کان‌سنگ‌های کم‌عیار مس با گانگ سیلیکاته منطقی است. کانی‌های اکسید مس به راحتی در اسید حل می‌شوند و برخی از سولفیدها مانند کالکوسیت و کولیت هم تا حدی در شرایط معمولی حل می‌شوند، اما برای شکستن شبکه‌های بلوری سولفیدهای مقاوم مس (کالکوپریت و بورنیت) برای آزاد کردن یون‌های مس به محلول، علاوه بر دما و فشار بالا، به اکسیدکننده‌هایی مثل اکسیژن و یون فریک نیاز دارند [۱].

جدول ۲. شرایط آزمایش‌های لیچینگ ستونی.

Table 2. Conditions of column leaching tests.

Column	Spray Flow (L/h/m <sup>2</sup> )	Size (mm)	Acid Concentration (g/l)	Time (Day)	Weight (kg)	Oxidizer
1	15	-6.35	30	17	17	-
2	15	-12.7	30	17	17	-
3	20	-15.8	30	13	17	-
4	10	-15.8	30	17	17	-
5	10	-15.8	30	18	17	-
6	15	-15.8	50	31	17	-
7	15	-15.8	15	33	17	-
8	15	-15.8	30	50	17	Iron(III) sulfate

جدول ۳. واکنش‌های لیچینگ کانی‌های مس در شرایط اسیدی.

Table 3. Leaching reactions of copper minerals in acidic conditions.

1	$CuO + H_2SO_4 \rightarrow Cu^{2+} + SO_4^{2-} + H_2O$	Tenorite
2	$2CuCO_3.Cu(OH)_2 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3Cu^{2+} + 3SO_4^{2-} + 2CO_2 + 4H_2O$	Azurite
3	$CuCO_3.Cu(OH)_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2Cu^{2+} + 2SO_4^{2-} + CO_2 + 3H_2O$	Malachite
4	$Cu_2O + H_2SO_4 \rightarrow 2Cu^{2+} + SO_4^{2-} + H_2O$	Cuprite
5	$CuO.SiO_2 + H_2SO_4 \rightarrow Cu^{2+} + SO_4^{2-} + SiO_2.nH_2O + (3-n)H_2O$	Chrysocolla
6	$4CuFeS_2 + 17O_2 + 4H_2O \rightarrow 4Cu^{2+} + 4SO_4^{2-} + 2Fe_2O_3 + 4H_2SO_4$	Chalcopyrite
7	$2CuFeS_2 + 4Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2Cu^{2+} + 2SO_4^{2-} + 10FeSO_4 + 4S$	Chalcopyrite
8	$CuS + 0.5O_2 + H_2SO_4 \rightarrow Cu^{2+} + SO_4^{2-} + S + H_2O$	Covellite
9	$CuS + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow Cu^{2+} + SO_4^{2-} + 2FeSO_4 + S$	Covellite
10	$Cu_2S + O_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2Cu^{2+} + 2SO_4^{2-} + S + 2H_2O$	Chalcocite
11	$Cu_2S + 2Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2Cu^{2+} + 2SO_4^{2-} + 4FeSO_4 + S$	Chalcocite

#### ۴-۲ مصرف اسید در لیچینگ ستونی

مصرف اسید در هیپ‌لیچینگ مس بیش از سایر عوامل با کانی‌شناسی گانگ مرتبط است. غلظت اسید، نرخ پاشش محلول اسیدی، دانه‌بندی کانسنگ از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در میزان مصرف اسید است [۱۷]. بدیهی است که افزایش زمان لیچینگ نیز باعث افزایش میزان مصرف اسید به تداوم تماس اسید با کانی‌های مصرف‌کننده اسید می‌شود. معمولاً، حداکثر مصرف اسید در آزمایش‌های لیچینگ ستونی حدود ۴۰ درصد اسید مصرفی در آزمایش‌های لیچینگ همزنی است [۱۸]. نتایج حاصل از میزان مصرف اسید برای هر ستون در جدول (۴) آورده شده است. باتوجه به داده‌های

جدول مصرف اسید در ستون‌ها در تحقیق حاضر، تقریباً کمتر از ۵۰ کیلوگرم اسید به‌ازای هر تن ماده معدنی است. بررسی دقیق‌تر نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که افزایش غلظت اسید، کاهش ابعاد ذرات باعث افزایش مصرف اسید می‌شود. ستون‌های ۱ و ۲ با ابعاد ذرات کوچک‌تر نسبت به سایر ستون‌ها و ستون ۶ با غلظت اسید بالا به‌کارگرفته شدند که دلیل بر افزایش مصرف اسید در این ستون‌ها شده است. ستون ۳ به‌علت پاشش با دبی بالا و ستون ۷ به‌علت پاشش با غلظت اسید پایین میزان مصرف اسید کمتری داشته‌اند. ستون‌های ۴ و ۵ با شرایط مشابه میزان مصرف اسید تقریباً یکسانی دارند.

جدول ۴. مصرف اسید در ستون‌های لیچینگ.

Table 4. Column acid consumption.

Column	Size (cm)	Acid Concentration (g/L)	Spray Flow (L/h/m <sup>2</sup> )	Acid Consumption per Ton of Ore (kg)
1	-0.65	30	15	54.52
2	-1.27	30	15	50.82
3	-1.58	30	20	31.45
4	-1.58	30	10	43.97
5	-1.58	30	10	41.49
6	-1.58	50	15	51.75
7	-1.58	15	15	32.26
8	-1.58	30	15	47.25

۶۴/۹۲ و ۶۱/۳۸ درصد به دست آمد. با افزایش ابعاد ذرات به علت کاهش سطح تماس ذرات با عامل انحلال، بازیابی کاهش می یابد. همچنین، با کاهش ابعاد ذرات به علت افزایش سطح تماس ذرات با عامل انحلال، میزان بازیابی مس افزایش می یابد. لذا، بین ابعاد ذرات و انحلال مواد رابطه ای معکوس وجود دارد که با کاهش ابعاد، بازیابی افزایش می یابد [۲۰، ۲۱]. میزان خریدایش ماده معدنی به علت هزینه بر بودن خریدایش ماده معدنی به ویژه در ابعاد ریزتر مشخصه بسیار مهمی است که باید در آزمایشگاه باتوجه به مشخصات ماده معدنی تعیین شود.

### ۳-۱-۳ تأثیر غلظت اسید بر بازیابی مس

برای بررسی اثر غلظت اسید، در این مرحله آزمایش ها با غلظت های مختلف اسید ۱۰، ۳۰، ۵۰ گرم برلیتر، ابعاد ذرات ۷۵- میکرون، زمان ۲ ساعت، دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس و دور همزنی ۴۰۰ دور بر دقیقه انجام شد (شکل (۵)). بازیابی مس در غلظت های ۱۰، ۳۰، ۵۰ گرم برلیتر به ترتیب ۶۰/۶۰، ۷۱/۰۵ و ۷۵/۴۲ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید بازیابی افزایش می یابد. به طور کلی، در هر سنگ معدن مس علاوه بر کانی های مس، سایر کانی ها هم کم و بیش اسید مصرف می کنند و هر قدر ابعاد سنگ معدن ریزتر باشد، مصرف اسید هم بیشتر می شود. برای جلوگیری از انحلال بیشتر سایر کانی ها بهتر است که غلظت اسید کمتر انتخاب شود تا عناصر مزاحم به مقدار کمتر وارد

## ۳. نتایج آزمایش ها

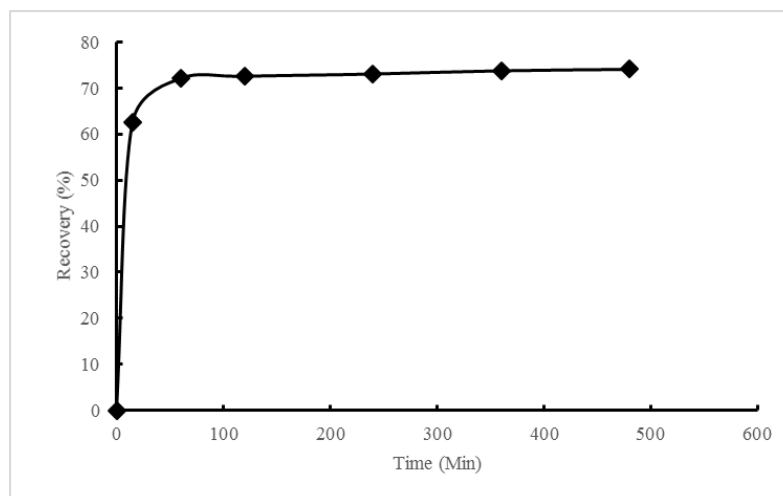
### ۳-۱ نتایج آزمون های لیچینگ همزنی

#### ۳-۱-۱ تأثیر زمان بر بازیابی مس

آزمایش با غلظت اسید ۳۰ گرم برلیتر، ابعاد ذرات ۷۵- میکرون، در دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس، دور همزنی ۴۰۰ دور بر دقیقه برای بررسی اثر زمان بر روی بازیابی مس انجام شد (شکل (۳)). با افزایش زمان، مقدار انحلال مس افزایش می یابد [۱۹]. باتوجه به نتایج، کانی های اکسیدی مس در ۲۰ دقیقه اول تقریباً به طور کامل حل شدند. در مدت زمان ۱۵، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه به ترتیب بازیابی مس ۶۲/۵۸، ۷۲/۱۲ و ۷۲/۶۱ درصد حاصل شد. باتوجه به نتایج محرز شد که بعد از ۱۲۰ دقیقه میزان بازیابی مس به صورت جزئی افزایش یافته، که از دلایل آن می توان به کم شدن غلظت اسید در محلول در طی فرایند انحلال کانی ها و باقی ماندن کانی های سولفیدی- از جمله کالکوپیریت که به سختی حل می شود- اشاره کرد. بنابراین، مدت زمان لیچینگ بهینه برای آزمایش های بعدی، ۱۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد.

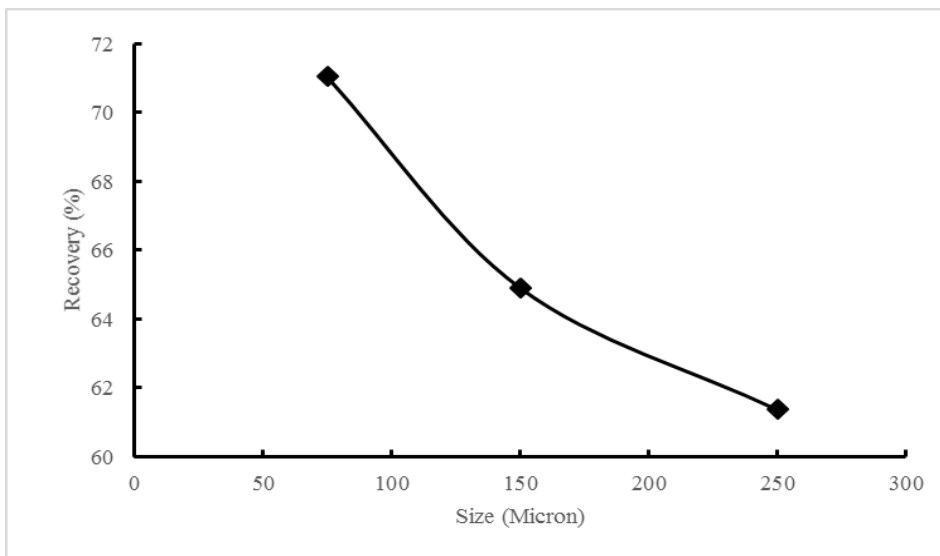
#### ۳-۱-۲ تأثیر ابعاد ذرات بر بازیابی مس

آزمایش ها با غلظت اسید ۳۰ گرم برلیتر، ابعاد ذرات ۷۵-، ۱۵۰-، ۲۵۰- میکرون، دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس و دور همزنی ۴۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان ۲ ساعت انجام شد (شکل (۴)). به ترتیب بازیابی حاصل برای ابعاد ۷۵-، ۱۵۰-، ۲۵۰- میکرون برابر ۷۱/۰۵،



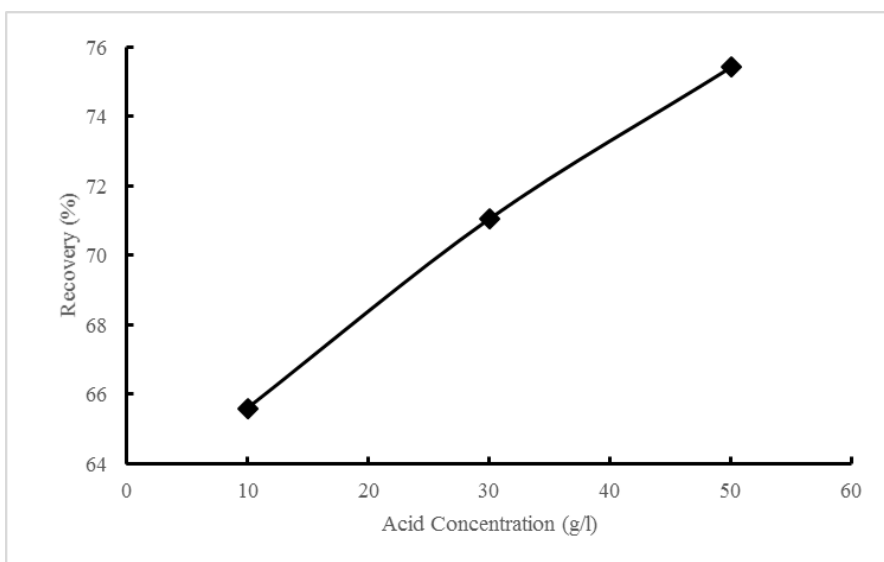
شکل ۳. تأثیر زمان بر بازیابی مس.

Figure 3. Effect of time on copper recovery.



شکل ۴. تأثیر ابعاد ذرات بر بازیابی مس.

Figure 4. Effect of particle size on copper recovery.

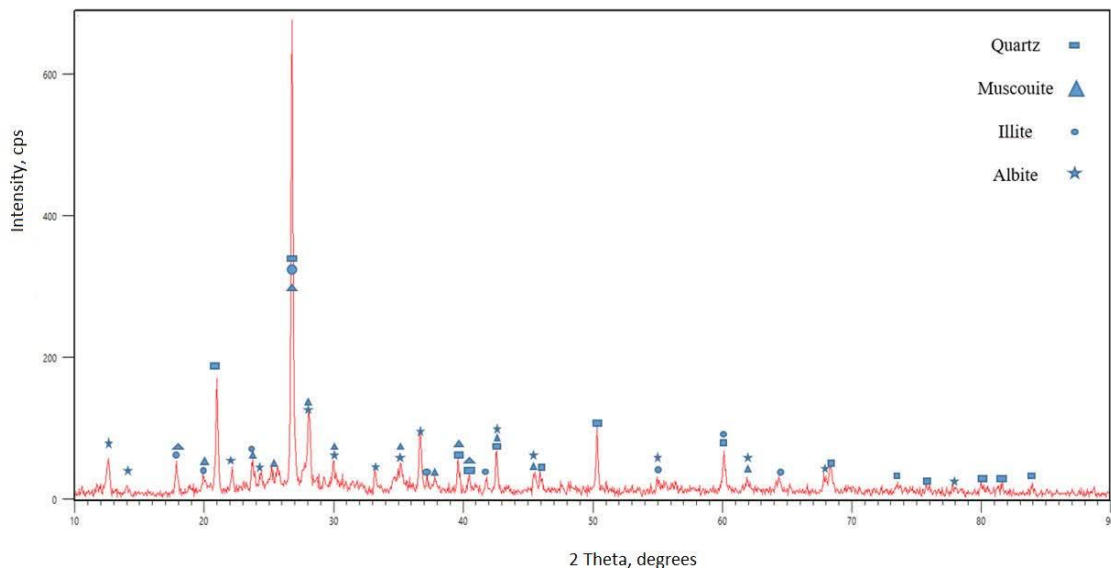


شکل ۵. تأثیر غلظت اسید بر بازیابی مس.

Figure 5. Effect of acid concentration on recovery.

۳-۱-۴ نتایج آنالیز XRD پس‌ماند لیچینگ همزنی از پس‌ماند جامد آزمایش لیچینگ همزنی با شرایط غلظت اسید ۳۰ گرم بر لیتر، ابعاد ۷۵- میکرون، زمان ۲ ساعت دمای محیط، دور همزنی ۴۰۰ دور بر دقیقه آنالیز XRD تهیه شد و نتایج نشان داد که کانی‌های سیلیکاتی نظیر کوارتز، موسکویت، آلبیت، ایلیت که در نمونه اولیه مشاهده شده بودند با شدت پیک کمتر مجدداً مشاهده شدند (شکل (۶)).

محلول باردار مس شود [۲۲]. با افزایش اسید به ۵۰ گرم بر لیتر به علت افزایش انحلال ناخالصی‌ها و وجود این ناخالصی‌ها در محلول مس، امکان ایجاد مشکلاتی در فرایندهای بعدی استحصال مس یعنی استخراج با حلال و الکترووینینگ وجود دارد. لذا، غلظت اسید ۳۰ گرم بر لیتر مناسب است.



شکل ۶. نتایج آنالیز XRD پسماند لیچینگ همزنی.

Figure 6. Results of XRD analysis of leaching residue.

### ۲-۳ نتایج آزمون‌های لیچینگ ستونی

#### ۱-۲-۳ بازبایی مس در لیچینگ ستونی

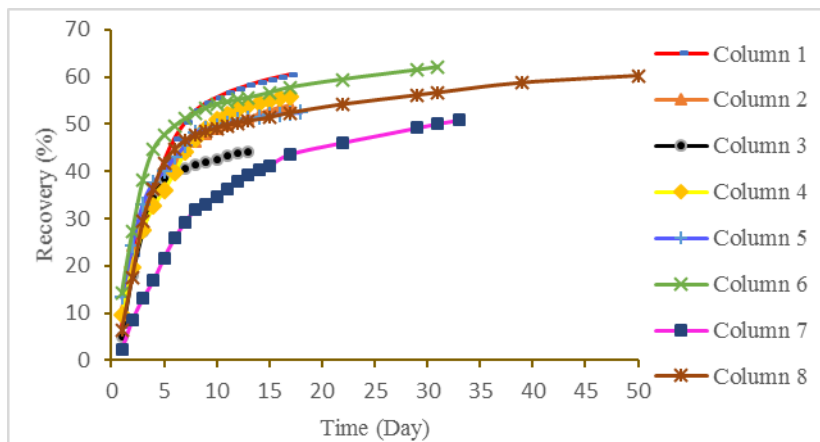
بازبایی تجمعی مس در شکل (۷) نشان داده شده است. در تمامی ستون‌ها به جز ستون ۱ و ۶ بازبایی مس به آرامی با افزایش زمان افزایش یافته است. در روزهای اول بازبایی بالا است که با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در ستون‌های ۱ و ۶ به ترتیب به دلیل کاهش ابعاد ذرات، افزایش غلظت اسید بازبایی تجمعی در روزهای ابتدایی سریع افزایش یافته است. بازبایی روزانه ستون‌ها هم حساب شد؛ نتایج نشان داد که در تمامی ستون‌ها بازبایی مس در روزهای ابتدایی بالا است و با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در ستون‌های ۱ و ۲ تأثیر ابعاد ذرات سنگ معدن بر روی بازبایی مس بررسی شد. ابعاد سنگ معدن در ستون‌های ۱ و ۲ به ترتیب ۶/۵- میلی‌متر و ۱/۳- سانتی‌متر، مشخصه‌های دبی پاشش و غلظت اسید در هر دو ستون ثابت و به ترتیب ۱۵ L/h/m<sup>2</sup> و ۳۰ g/l در نظر گرفته شد. در ستون ۱ با ریزتر شدن ابعاد سنگ معدن، بازبایی مس افزایش یافت. کاهش ابعاد ذرات در ستون‌ها هم مشابه کاهش ابعاد ذرات در لیچینگ همزنی باعث افزایش لیچینگ مس می‌شود که علت آن افزایش سطح تماس عامل لیچینگ با سطح ذرات است؛ در نتیجه، باعث نفوذ بیشتر عامل لیچینگ به ذرات سنگ معدن و متعاقباً، افزایش سرعت و میزان لیچینگ مس می‌شود [۲۳]. بازبایی مس در ستون یک به ۶۰/۴۵ درصد و در ستون دو به ۵۴/۱۱ درصد رسید. در ستون شماره ۳ با

افزایش دبی پاشش به ۲۰ L/h/m<sup>2</sup>، ابعاد ذرات ۱/۵۸- سانتی‌متر، غلظت اسید ۳۰ g/l مشاهده شد که در دبی پاشش بالا غلظت مس در محلول خروجی به علت کم بودن زمان تماس اسید با کانسنگ به شدت کاهش می‌یابد. در این شرایط، بازبایی مس ۳۱/۴۵ به دست آمد. ستون‌های ۴ و ۵ با دبی پاشش پایین ۱۰ L/h/m<sup>2</sup>، ابعاد ذرات ۱/۵۸- سانتی‌متر، غلظت اسید ۳۰ g/l انتخاب شد. میزان بازبایی مس با دبی پایین در ستون‌های ۴ و ۵ که به ترتیب ۴۳/۹۷ و ۴۱/۴۹ درصد بود، بیشتر از میزان بازبایی ستون ۳ با دبی بالا به دست آمد. مشاهده شد که پاشش با دبی پایین تأثیر مثبتی بر روی بازبایی مس دارد. می‌توان نتیجه گرفت که عامل نرخ پاشش تأثیر به‌سزایی در غلظت مس در محلول خروجی از ستون‌ها و در نتیجه، بازبایی دارد. در ستون‌های شماره ۶ و ۷ غلظت اسید به ترتیب ۵۰ و ۱۵ گرم بر لیتر، دبی پاشش ۱۵ L/h/m<sup>2</sup>، ابعاد ذرات ۱/۵۸- سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در غلظت اسید بالا (ستون ۶) غلظت مس و بازبایی روزانه مس در چند روز اول بالا بود که میزان انحلال قابل توجه مس در مدت زمان کمتر را نشان داد. بازبایی مس در ستون‌های ۶ و ۷ به ترتیب ۵۱/۷۵ و ۳۲/۲۶ درصد به دست آمد که بازبایی حاصل از ستون ۶ بیشتر از ستون ۷ نشان می‌دهد. بنابراین، افزایش غلظت اسید تأثیر مستقیم و افزایش دبی پاشش تأثیر معکوس در غلظت مس در محلول خروجی از ستون‌ها را در پی داشت. در ستون شماره ۸ با استفاده از اکسیدکننده سولفات

آهن فریک به مقدار ۲ گرم بر لیتر، غلظت اسید  $30 \text{ L/h/m}^2$ ، دبی پاشش  $15 \text{ L/h/m}^2$ ، ابعاد ذرات  $1/58$  - سانتی متر انجام شد. در ستون‌های ۶ و ۷ دلیل افزایش بازیابی روزانه در روزهای آخر به دلیل جمع کردن محلول خروجی از ستون‌ها در چند روز است. باتوجه به مطالعات کانی‌شناسی اولیه و نتایج آن (شکل (۲)) مشخص شد که کانی سولفیدی کالکوپیریت غالب است و این کانی در مطالعات کانی‌شناسی میکروسکوپی پس‌ماند لیچینگ ستون ۸ (شکل (۸)) مشاهده شد. این نشان می‌دهد که میزان انحلال این کانی در شرایط استفاده شده در ستون‌های لیچینگ این تحقیق بسیار کم است و به عبارتی، این کانی مقاوم در برابر لیچینگ شناخته می‌شود.

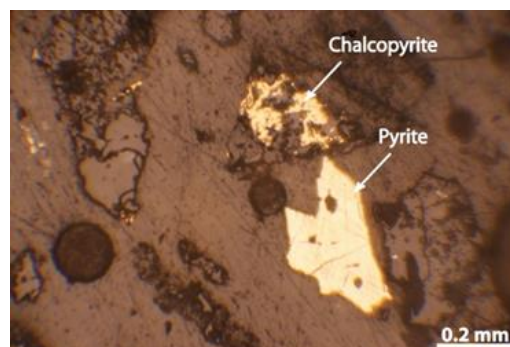
### ۲-۲-۳ بازیابی آهن در لیچینگ ستونی

میزان آهن حل شده به همراه مس به دلیل مزاحمت در ادامه فرایند



شکل ۷. بازیابی تجمعی مس در ستون‌ها.

Figure 7. Cumulative recovery of copper in the columns.



شکل ۸. کانی کالکوپیریت در پس‌ماند لیچینگ ستون شماره ۸ در محدوده ۳۵- مش.

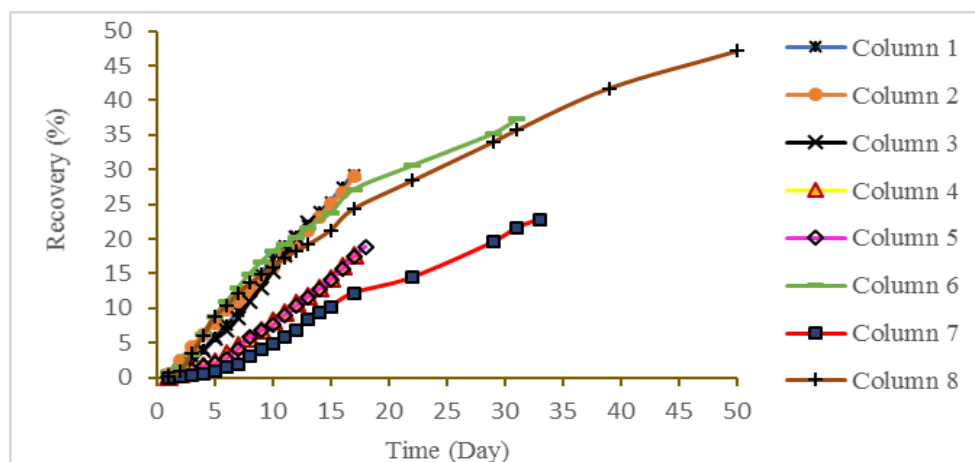
Figure 8. Chalcopyrite mineral in the leaching waste of column number 8 in the -35 mesh range.

نتایج به دست آمده، افزایش غلظت اسید، افزایش دبی پاشش، کاهش ابعاد ذرات باعث افزایش بازیابی روزانه آهن در ستون‌ها شده است. در شکل (۹) بازیابی تجمعی آهن در ستون‌ها نشان داده شده است. باتوجه به روند تغییرات بازیابی آهن همواره افزایشی است و با افزایش بیشتر زمان آهن بیشتری حل می‌شود؛ درحالی‌که بازیابی مس تجمعی (شکل (۷)) با افزایش بیشتر زمان میزان بازیابی مس به مقدار ثابتی می‌رسد و تقریباً انحلال مس متوقف می‌شود. در مورد آهن، نه تنها انحلال آهن با افزایش بیشتر زمان متوقف نمی‌شود، بلکه زیادتر هم می‌شود و لذا لازم است که زمان لیچینگ در ستون‌ها و در مقیاس صنعتی - یعنی هیپ لیچینگ - به دقت کنترل شود تا آهن بیشتری وارد محلول حاصل از لیچینگ نشود و هزینه استحصال بالا نرود.

برای این که نتایج حاصل از لیچینگ کانسنگ مس در ستون‌ها قابل مقایسه باشد، همه نتایج در جدول (۵) یکجا آورده شده است. باتوجه به نتایج حاصل شده، با افزایش غلظت اسید و کاهش ابعاد ذرات بازیابی مس و آهن افزایش یافته است. دلیل افزایش بازیابی با کاهش ابعاد ذرات، افزایش سطح تماس کانی‌ها با عامل انحلال است. تقریباً با مصرف بیشتر اسید به وسیله سنگ معدن بازیابی مس و آهن بیشتر شده است. انتظار هم همین است؛ وقتی که مصرف اسید زیادتر می‌شود، یعنی واکنش بیشتری رخ داده است و کانی‌های مس و آهن دار بیشتری لیچینگ شده است و در نتیجه، بازیابی مس و آهن زیادتر می‌شود.

افزایش یافته و بعد از چند روز کاهش و در ادامه با شیب کمتری افزایش یافته است. کانی‌های اکسیدی مس به صورت شیمیایی با اسید سولفوریک حل می‌شوند، اما کانی‌های سولفیدی مس برای انحلال با اسید سولفوریک نیاز به اکسیدکننده‌هایی هم چون یون فریک و اکسیژن دارند. لذا، در این تحقیق برای افزایش بازیابی مس یون فریک به صورت نمک سولفات فریک به ستون لیچینگ اضافه شد. با انحلال کانی سولفیدی مس آهن دار مانند کالکوپریت و یا انحلال کانی پیریت آهن موجود در این کانی‌ها به صورت آهن دوظرفیتی وارد محلول می‌شوند و در ادامه، آهن‌های دوظرفیتی می‌توانند در حضور اکسیژن به یون‌های آهن سه ظرفیتی یعنی یون فریک تبدیل می‌شوند و یون فریک هم مطابق توضیحات داده شده به عنوان اکسیدکننده باعث افزایش بیشتر لیچینگ کانی‌های سولفیدی مس می‌شود [۱۲،۲۴،۲۵].

در ستون شماره ۷ به علت استفاده از اسید با غلظت کم (۱۵ گرم بر لیتر) نسبت به سایر ستون‌ها روند افزایش میزان آهن در این ستون با گذشت زمان ملایم است. در ستون شماره ۳ به دلیل پاشش محلول با دبی بالا و افزایش حجم محلول در خروجی ستون تغییرات بازیابی روزانه آهن با شیب ملایمی افزایش یافته است. در ستون‌های ۱ و ۲ که ابعاد ذرات سنگ معدن در داخل ستون‌ها کوچک‌تر از سایر ستون‌ها بود (برای ستون ۱ ابعاد ریزتر از ابعاد ذرات برای ستون ۲ بود)، باتوجه به شیب نمودار افزایش بازیابی بیشتر آهن برای ستون ۱ نسبت به ستون ۲ حاصل شد. باتوجه به



شکل ۹. بازیابی تجمعی آهن در ستون‌ها.

Figure 9. Cumulative recovery of iron in the columns.

جدول ۵. نتایج کلی حاصل از آزمایش‌های ستونی.

Table 5. General results from column tests.

Column	Copper Recovery (%)	Iron Recovery (%)	volume of Spray Solution (L)	Acid Consumption per Ton of Ore (kg)
1	60.45	29.31	37.2	54.52
2	54.01	29.01	35.6	50.82
3	44.1	22.3	33.8	31.45
4	55.8	17.73	20.2	43.97
5	52.43	18.86	23.4	41.49
6	62.12	37.26	65.6	51.75
7	50.82	22.89	68.9	32.26
8	60.22	47.09	112.4	47.25

افزایش بازیابی آهن در فرایند می‌شود و می‌تواند مشکلاتی در فرایندهای بعدی استحصال مس داشته باشد.

#### ۵. تقدیر و تشکر

از حمایت‌های مالی مجتمع مس سونگون در انجام تحقیق حاضر تشکر و قدردانی می‌شود.

#### مراجع

- [1] Biswas, A. K., & Davenport, W. G. (2013). *Extractive metallurgy of copper: international series on materials science and technology*, 20, Elsevier.
- [2] Northey, S., Mohr, S., Mudd, G. M., Weng, Z., & Giurco, D. (2014). Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 190-201.
- [3] Hosseinzadeh, M., Entezari Zarandi, A., Pasquier, L.-C., & Azizi, A. (2021). Kinetic investigation on leaching of copper from a Low-grade copper oxide deposit in sulfuric acid solution: A case study of the crushing circuit reject of a copper heap leaching plant. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7, 1154-1168.
- [4] Free, M. L. (2021). *Hydrometallurgy: fundamentals and applications*: Springer Nature.
- [5] Azmayandeh, M., Aghazadeh, V., & Abdollahi, H. (2017). Investigation of Affecting Parameters on Heap Leaching Performance and Reducing Acid Consumption of Low Grade Oxide-Sulfide Copper Ore. *Metallurgy*, 2(4), 40-45.

#### ۴. نتیجه‌گیری

نمونه معرف از مخلوط کانسنگ اکسیدی و سولفیدی مجتمع مس سونگون تهیه شد. پس از آماده‌سازی نمونه و شناسایی شیمیایی و کانی‌شناختی (مینرالوژیکی)، آزمایش‌های لیچینگ همزنی و ستونی در شرایط مختلف انجام گرفت. نتایج آزمایش‌های لیچینگ همزنی، که هدف آن رسیدن به بیشترین بازیابی در کمترین زمان و تعیین مقدار مصرف اسید است، نشان می‌دهد که در حدود ۲ ساعت لیچینگ با دور همزنی ۴۰۰ دور بر دقیقه، غلظت اسید سولفوریک ۳۰ گرم بر لیتر و ابعاد ذرات سنگ معدن ۷۵- میکرون، بازیابی مس ۷۱/۵۰ درصد است. میزان اسید مصرفی در آزمایش لیچینگ همزنی در شرایط بازیابی فوق ۸۴ کیلوگرم به ازای هر تن از ماده معدنی به دست می‌آید. در آزمایش‌های لیچینگ ستونی، بازیابی روزانه مس به مرور زمان کاهش می‌یابد، ولی بازیابی روزانه آهن افزایش می‌یابد. همچنین، بازیابی تجمعی مس و آهن به مرور زمان بیشتر می‌شود، اما با ادامه زمان لیچینگ، بازیابی مس به مقداری ثابت می‌رسد، ولی بازیابی آهن همچنان افزایش می‌یابد. میزان بازیابی مس در ستون‌ها با توجه به تغییرات مشخصه‌های غلظت اسید، دبی پاشش، و ابعاد ذرات سنگ معدن از ۴۴/۰۱ تا ۶۲/۱۱ درصد و بازیابی آهن از ۱۷/۷۳ تا ۴۷/۰۹ درصد متفاوت است. میزان مصرف اسید به وسیله سنگ معدن در ستون‌ها با شرایط مختلف لیچینگ از ۳۱ تا ۵۵ کیلوگرم به ازای هر تن کانسنگ به دست می‌آید. به علت غالب بودن ترکیبات اکسیدی مس در نمونه، در کمتر از ۲۰ روز تقریباً بیش از ۹۰ درصد مس اکسیدی حل می‌شود و افزایش زمان لیچینگ موجب

- [6] Hongjiang, W., Aixiang, W., Xun, Z., Shaoyong, W., & ZHANG, J. (2008). Accelerating column leaching trial on copper sulfide ore. *Rare Metals*, 27(1), 95-100.
- [7] Thomas, M. (2021). Understanding gangue acid consumption in copper sulfide heap leaching: Predicting the impact of carbonates, silicates and secondary precipitates. *Minerals Engineering*, 171, 107090.
- [8] Lu, J., Dreisinger, D., & West-Sells, P. (2017). Acid curing and agglomeration for heap leaching. *Hydrometallurgy*, 167, 30-35.
- [9] Mokmeli, M. (2020). Pre feasibility study in hydrometallurgical treatment of low-grade chalcopyrite ores from Sarcheshmeh copper mine. *Hydrometallurgy*, 191, 105215.
- [10] Wu, A., Yin, S., Qin, W., Liu, J., & Qiu, G. (2009). The effect of preferential flow on extraction and surface morphology of copper sulphides during heap leaching. *Hydrometallurgy*, 95(1-2), 76-81.
- [11] Mousavi, S., Jafari, A., Yaghmaei, S., Vossoughi, M., & Sarkomaa, P. (2006). Computer simulation of fluid motion in a porous bed using a volume of fluid method: Application in heap leaching. *Minerals Engineering*, 19(10), 1077-1083.
- [12] Nikoloski, A. N., & O'Malley, G. P. (2018). The acidic ferric sulfate leaching of primary copper sulfides under recycle solution conditions observed in heap leaching. Part 1. Effect of standard conditions. *Hydrometallurgy*, 178, 231-239.
- [13] Savov, G., Angelov, T., Tsekov, V., Grigorova, I., & Nishkov, I. (2011). *Heap and Dump Leach Process at the Buchim Cooper Project-Metallurgical Testwork*. Paper presented at the XXII World Mining Congress.
- [14] Peacey, J., Guo, X.-j., & Robles, E. (2004). Copper hydrometallurgy-current status, preliminary economics, future direction and positioning versus smelting. *TRANSACTIONS-NONFERROUS METALS SOCIETY OF CHINA-ENGLISH EDITION*, 14(3), 560-568.
- [15] Jergensen, G.V. (1999). *Copper leaching, solvent extraction, and electrowinning technology*: SME.
- [16] de Andrade Lima, L. (2006). Liquid axial dispersion and holdup in column leaching. *Minerals Engineering*, 19(1), 37-47.
- [17] Sherlock, E., Lawrence, R., & Poulin, R. (1995). On the neutralization of acid rock drainage by carbonate and silicate minerals. *Environmental Geology*, 25, 43-54.
- [18] D, D. F. A. L. (1992). *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*, B. *Academic Press Inc.*
- [19] Cheghini, M., Mahdavi Hasab, S. (1400). *Investigating Copper Extraction from the Tappeh Siah Deposit Using Agitation Leaching Method*. Paper presented at the Fifth International Conference on Technology, Mining and Geology Engineering Technology Development, Tehran-Iran, [In Persian]. <https://civilica.com/doc/1425986>
- [20] Hoseyni, S. A., Khalilzadeh, M. A., Jamshidi Bonab, A., Ghebraei, R. (1390). Kinetic Study of Leaching Spent Catalysts from Reforming Units with Steam in Sulfuric Acid Environment. *Journal of Iranian Chemical Engineering*, 10(55), 30-38, [In Persian].
- [21] Aghazadeh, V., Nabizadeh, A. (1394). Study and Suitable Method Selection for Copper Leaching from Its Oxide Ore: Case Study of Ghare Tappeh Copper Ore. *Journal of Mining Engineering*, 10(28), 34-42, [In Persian].
- [22] Koizhanova, A., Magomedov, D., Abdyldayev, N., Kamalov, E., Yerdenova, M., & Bakrayeva, A. (2022). Copper Extraction from Complex Waste Dumps by Biochemical Leaching Method. *Journal of Ecological Engineering*, 23, 283-290. doi:10.12911/22998993/152342
- [23] Xu, J., Qin, S., Zheng, C., Sun, H., Yang, B., Liu, S., ... Ma, H. (2024). Study on Column Leaching Behavior of Low-Grade High Calcium and Magnesium Copper Ore. *Minerals*, 14(8), 822.
- [24] Cordoba, E. M., Munoz, J. A., Blazquez, M. L., Gonzalez, F., Ballester, A. (2008a). Leaching of Chalcopyrite with Ferric Ion. Part I: General Aspects. *Hydrometallurgy*, 93.
- [25] Cordoba, E. M., Munoz, J. A., Blazquez, M. L., Gonzalez, F., Ballester, A. (2008b). Leaching of Chalcopyrite with Ferric Ion. Part II: Effect of Redox Potential *Hydrometallurgy*, 93.