

جدایش مغناطیسی برای شناسایی فاز همراه طلا در کانسنگ زایلیک

وحید رسولی^۱، محمود عبدالهی^{۱*}، سید محمد جواد کلینی^۱، احمد امینی^۲

۱. گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

مشخصات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۱ مهر ۹۲

دریافت پس از اصلاح: ۲۱ بهمن ۹۳

پذیرش نهایی: ۳ اسفند ۹۳

کلمات کلیدی:

طلا

زایلیک

جدایش مغناطیسی.

مطالعات کانی‌شناسی بر روی کانه طلای زایلیک آذربایجان شرقی نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از نمونه را کانی‌های سیلیسی و آهن دار تشکیل می‌دهد. برای شناسایی فاز همراه طلا، از مطالعات میکروسکوپی SEM، آنالیز Map و آزمایش‌های جدایش مغناطیسی استفاده شد. نتایج آزمایش‌های جدایش مغناطیسی نشان داد که استفاده از دو مرحله جدایش مغناطیسی، منجر به حذف بیش از ۶۹٪ وزنی خوراک اولیه با عیار نهایی کمتر از ۰/۹ ppm طلا می‌شود. در نتیجه این فرایند، کنسانتره مغناطیسی با وزن تقریبی ۳۱٪ خوراک اولیه با بازیابی طلای بیشتر از ۹۳٪ تولید شد. گرچه کاربرد این روش منجر به حذف حدود ۷٪ از طلای موجود در نمونه اولیه می‌شود، اما به دلیل حذف بخش قابل توجهی از خوراک ورودی به مرحله لیچینگ، نقش مهمی در کاهش مواد شیمیایی مصرفی و در نتیجه کاهش هزینه‌های عملیاتی خواهد داشت.

حقوق ناشر محفوظ است.

* عهده‌دار مکاتبات
minmabd@modares.ac.ir

۱- مقدمه

گلوله‌ای به مدت ۵۵ دقیقه نرم شد تا محصولی با $75 \mu\text{m}$ = d_{80} تولید شود. محصول این مرحله با استفاده از روش مخروطی تقسیم شد و نهایتاً ۵۰۰ گرم نمونه معرف از آن جدا شد. عیارسنجی فلز طلا با استفاده از دستگاه پلاسما کوپل شده القایی / طیف‌سنجی نشر اتمی (ICP-OES^۳) مدل Ultima2C انجام شد. برای این منظور نمونه‌های معرف با استفاده از تیزاب سلطانی ($30 \text{ ml HCl} + 10 \text{ ml HNO}_3$) حل و محلول حاصل پس از فیلتراسیون تا حجم معینی رقیق و برای آنالیز طلا استفاده شد. عیارسنجی فلز آهن با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری مدل Cecil 7200 انجام شد. برای این منظور نمونه‌های معرف با استفاده از اسید هیدروکلریک غلیظ حل شده و محلول حاصل پس از فیلتراسیون تا حجم معینی رقیق و برای آنالیز آهن استفاده شد.

۲-۲- آزمایش مغناطیسی

برای جدایش بخش مغناطیسی از غیر مغناطیسی نمونه از دستگاه جداکننده مغناطیسی شدت بالاتری (WHIMS) استفاده شد. ۵۰ گرم از نمونه را به همراه $166/67$ گرم آب مخلوط کرده و پالپی با درصد جامد ۳۰ درصد تهیه شد. این پالپ در دستگاه مغناطیسی با شدت $1/2$ تسلا در تماس با گلوله‌های با ابعاد $6/2 \text{ mm}$ قرار داده شد. جدول ۱ شرایط استفاده شده در این آزمایش را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خصوصیات کانی‌شناسی نمونه

نمونه مورد بررسی کانسنگ طلا دار مربوط به محدوده اکتشافی زاپلیک بوده که با وسعت تقریبی ۱۲ کیلومتر مربع در فاصله ۱۱ کیلومتری غرب اهر در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. مطالعات میکروسکوپ نوری و الکترونی (مقاطع نازک- صیقلی و صیقلی) و همچنین آنالیزهای XRF و XRD نشان می‌دهد که این کانه از نوع اکسیدی می‌باشد. کانی اصلی کوارتز و کانی‌های دیگر شامل کانی‌های رسی، اکسیدهای ثانویه و آبدار آهن (در فرم هماتیت) و به ندرت پیریت، کالکوپیریت، طلا، آزوریت و ملاکیت می‌باشد [۱۱]. با روش XRD تنها کوارتز و کانی‌های رسی در نمونه تشخیص داده شده است (شکل ۱). جدول ۲ نتایج آنالیز شیمیایی نمونه را نشان می‌دهد. ذرات طلا پس از روبش دقیق و طولانی نمونه

برای جداسازی طلا از کانسنگ از روش‌های مختلف لیچینگ استفاده می‌شود که لیچینگ سیانوری روش اصلی جداسازی این فلز از کانه‌های غیرمقاوم طلا می‌باشد. طلا اغلب بخش بسیار کوچکی از کانه‌ها را تشکیل می‌دهد در حالی که ترکیبات متفاوت و بسیار دیگر، بخش عمده کانه را تشکیل می‌دهند. حضور این ترکیبات می‌تواند علاوه بر مصرف مواد شیمیایی نظیر سیانور، مشکلاتی را برای مراحل بعدی تغلیظ ایجاد کنند. به عنوان مثال حضور مس سبب مصرف مقدار زیادی از سیانور شده و با تشکیل کمپلکس‌های سیانوری مس، رقیب کمپلکس‌های سیانوری طلا برای جذب بر روی کربن فعال شده جذب طلا را کاهش می‌دهد [۱]. بنابراین شناسایی نوع کانی طلا، فاز حاوی بخش عمده طلا و کانه‌های همراه آن در تعیین و ارزیابی رفتار طلا در حین لیچینگ مهم می‌باشد. این اطلاعات می‌تواند در تعیین رفتار کانه در فرایندهای مختلف فراوری کمک کرده و در نتیجه از لحاظ اقتصادی نقش بسیار مهمی ایفا کند [۲،۳]. به طور معمول مطالعات میکروسکوپ الکترونی نظیر تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی (SEM^۱) و ارزیابی کمی مواد با میکروسکوپ الکترونی (QEMSCAN^۲) به منظور تصویربرداری از نمونه، کانی‌شناسی و مطالعات مورفولوژی سطحی و آزمایش‌های لیچینگ تشخیصی برای شناسایی توزیع طلا در فازهای کانی‌شناسی مختلف نظیر کربنات‌ها، سیلیکات‌ها و سولفیدها بکار می‌روند [۴،۵،۶،۷،۸]. با به کارگیری روش‌های ثقلی، مغناطیسی و سایر روش‌ها، این فازها از یکدیگر جدا می‌شوند [۹]. انتخاب هر یک از روش‌های جداسازی بستگی به نوع کانه و هدف نهایی تحقیق دارد. به عنوان مثال در معدن Witwatersand به دلیل همراهی طلا با پیریت از جداکننده مغناطیسی شدت بالاتری به منظور تغلیظ طلا در باطله فلوتاسیون و همچنین پسماند لیچینگ سیانوری استفاده شده است [۱۰]. هدف تحقیق حاضر شناسایی و جداسازی فاز اصلی حاوی طلا بر اساس جدایش مغناطیسی است.

۲- روش، مواد و تجهیزات

۲-۱- آماده سازی و آنالیز نمونه

ابتدا ۲ کیلوگرم نمونه اولیه با ابعاد بزرگتر از ۲ سانتی‌متر با استفاده از سنگ شکن غلتکی تا ابعاد ۶ مش (۲۳۶۰ میکرون) خرد شد. محصول این مرحله با استفاده از آسیای

^۱ Scanning Electron Microscopy

^۲ Quantitative Evaluation Of Minerals By Scanning Electron Microscopy

^۳ Inductively Coupled Plasma/Optical Emission Spectroscopy

جدایش مغناطیسی به منظور شناسایی فاز همراه طلا در کانستگ زاپلیک

جدول (۱) شرایط مورد استفاده در آزمایش مغناطیسی

۷۵	دما نمونه (میکرون)
۵۰	وزن نمونه مصرفی (گرم)
۱۶۶/۶۷	میزان آب مصرفی (گرم)
۳۰	درصد جامد
۱/۲	شدت میدان مغناطیسی (تسلا)
۲۸۰	ولتاژ میدان مغناطیسی
۳/۸۵	شدت جریان (آمپر)
۶/۲	ابعاد گلوله‌های دستگاه (میلی‌متر)

جدول (۲) نتایج آنالیز XRF نمونه اولیه*

عنصر و ترکیب	درصد
طلا	$9/45 \times 10^{-4}$ (۹/۴۵ ppm)
SiO ₂	۸۲/۶۳
Fe ₂ O ₃	۲/۶۵
Al ₂ O ₃	۹/۳۵
K ₂ O	۱/۸۶
TiO ₂	۰/۳۲
CaO	۰/۲۸
MgO	۰/۲۱
P ₂ O ₅	۰/۲
Total S	۰/۲۴
L.O.I	۲/۱۶

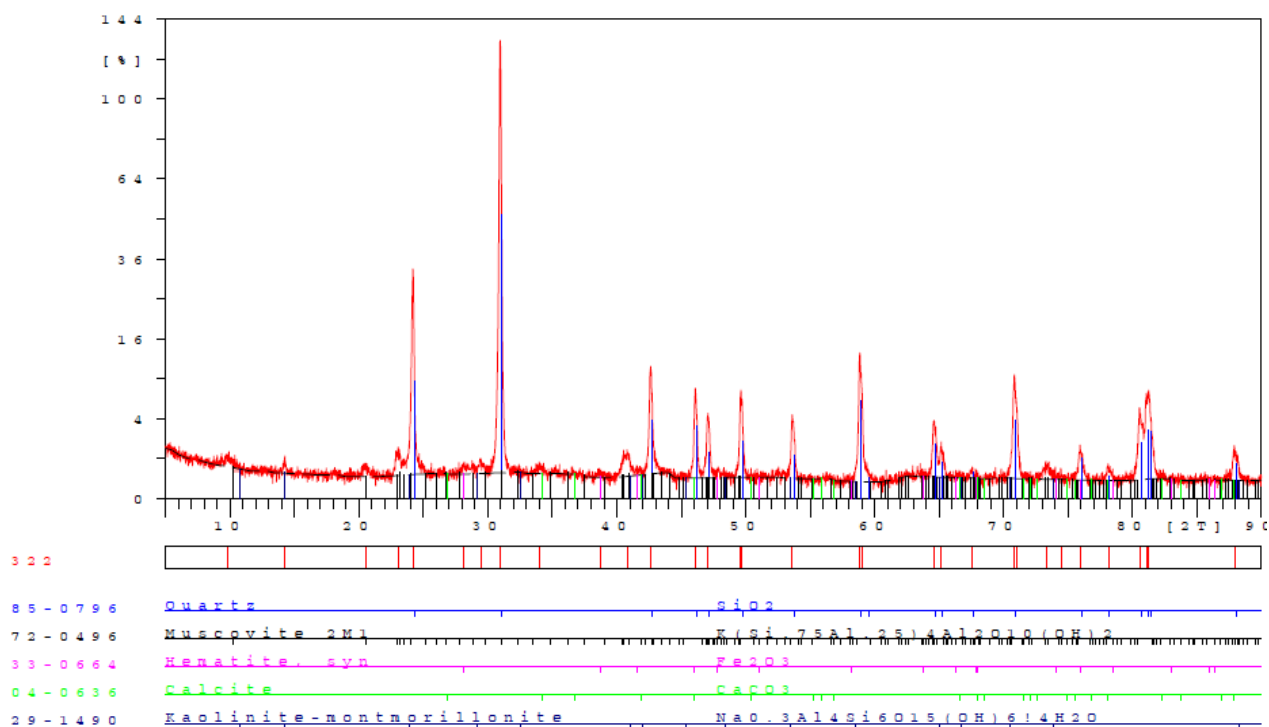
* برای آنالیز طلا از روش جذب شعله‌ای (Fire Assay)، استفاده شده است.

آنالیز سولفور با استفاده از دستگاه Leco انجام شده است.

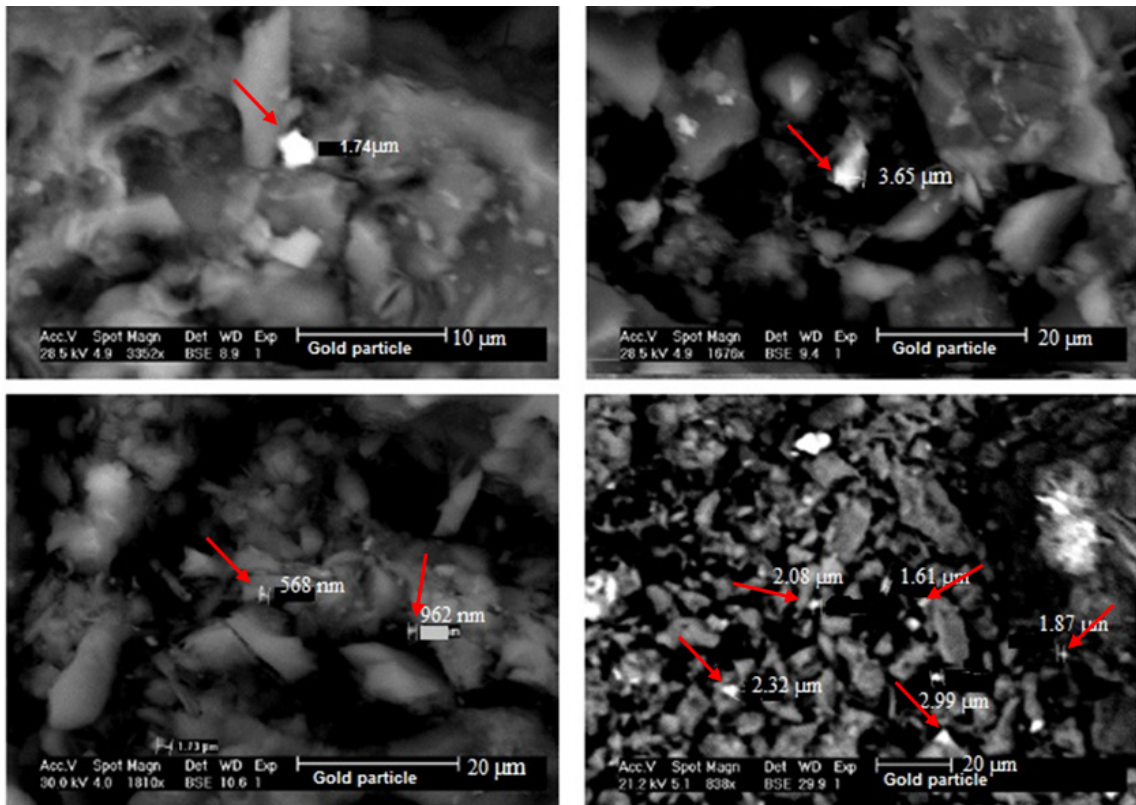
پودر شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی محیطی (ESEM) شناسایی شدند که به غیر از شکل سمت راست بالا در بقیه اشکال این نمونه، اندازه ذرات طلا کوچکتر از $3 \mu\text{m}$ می‌باشد (شکل ۲). در شکل ۳ نتایج آنالیز Map ارائه شده است. این مطالعه توزیع عناصر را در سطح نمونه مورد نظر نشان می‌دهد که در نتیجه می‌توان دریافت که به طور تقریبی توزیع عنصر طلا در کانه وابستگی بیشتری با عنصر آهن دارد. آنالیز خوراک به روش آنالیز پراکندگی انرژی اشعه ایکس (EDAX) (شکل ۴) حضور مشترک آهن - طلا را نشان می‌دهد که نتایج آنالیز Map همراهی عمده طلا با آهن را تأیید می‌کند.

۲-۳- جداسازی با روش مغناطیسی

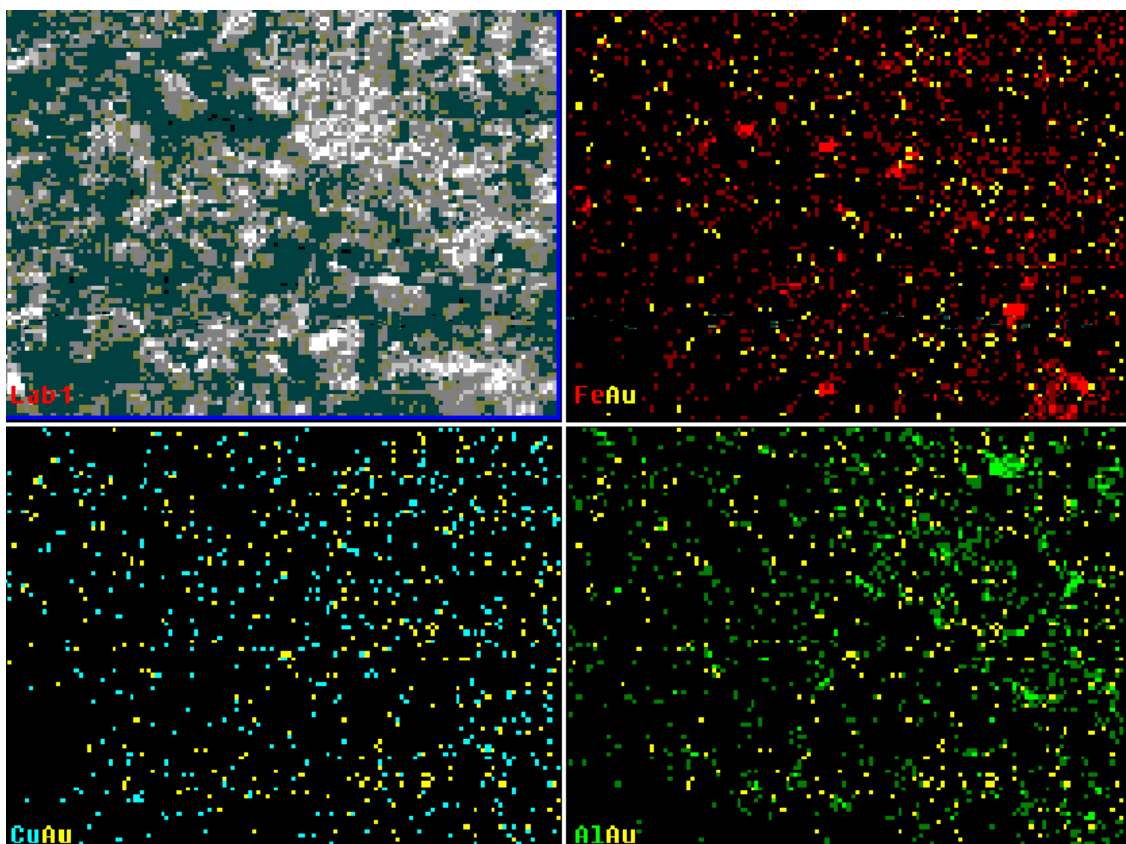
با توجه به خاصیت مغناطیسی ضعیف هماتیت و عدم مغناطیس بودن سیلیس و سایر ترکیبات موجود در کانه، می‌توان از این روش برای جداسازی این دو فاز استفاده کرد. به علت اینکه هماتیت کانه‌ای با خاصیت مغناطیسی ضعیف است، برای جدایش مؤثر، از میدان مغناطیسی با شدت بالا استفاده شد. جدول ۳ نتایج عیار و بازیابی فلزات طلا و آهن حاصل از این روش را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش عیار آهن در کنسانتره مغناطیسی، عیار طلای این بخش نیز نسبت به خوراک اولیه افزایش چشمگیری داشته است. همچنین کاهش عیار طلا در باطله غیرمغناطیسی متناسب با کاهش عیار آهن در این بخش است.



شکل (۱) آنالیز XRD نمونه خوراک

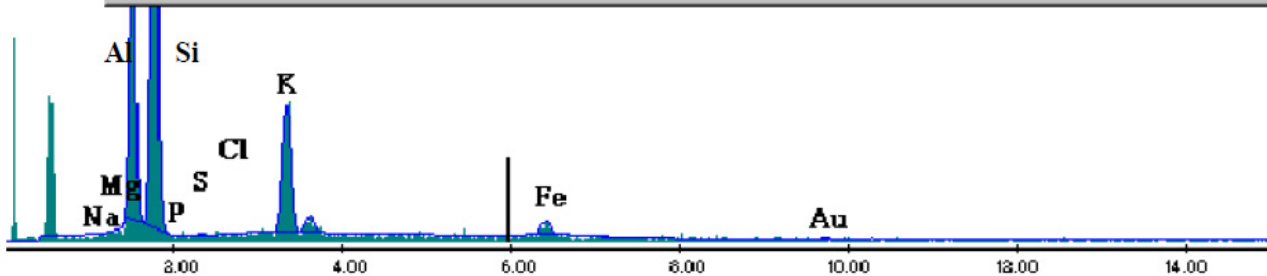


شکل (۲) ذرات طلا مشاهده شده با الکترون‌های برگشتی (BSE) توسط ESEM (به غیر از شکل سمت راست بالا، در بقیه اشکال ابعاد ذرات طلا کوچکتر از ۳ μm است)



شکل (۳) آنالیز Map عناصر طلا (زرد)، آهن (قرمز)، آلومینیوم (سبز) و مس (آبی) توسط ESEM

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
NaK	0.00	0.00	0.0000	0.9969	0.4419	1.0099
MgK	0.00	0.00	0.0000	1.0224	0.6026	1.0201
AlK	18.68	21.33	0.1423	0.9927	0.7489	1.0245
SiK	56.24	61.69	0.3520	1.0220	0.6109	1.0024
PK	0.00	0.00	0.0000	0.9885	0.3553	1.0033
SK	0.18	0.18	0.0008	1.0146	0.4444	1.0056
ClK	0.00	0.00	0.0000	0.9703	0.5490	1.0093
KK	17.81	14.03	0.1260	0.9744	0.7250	1.0010
FeK	4.20	2.32	0.0365	0.9133	0.9500	1.0020
AuL	2.88	0.45	0.0211	0.7060	1.0395	1.0000
Total	100.00	100.00				



شکل (۴) آنالیز خوراک به روش EDAX

جدول (۴) شرایط آزمایش مغناطیسی مرحله دوم

-۳۸	ابعاد نمونه (d _n) (میکرون)
۳۰	درصد جامد
۱-۱/۵	شدت میدان (تسلا)
۲۸۰	ولتاژ میدان مغناطیسی
۴	شدت جریان (آمپر)
۴/۲	ابعاد گلوله‌های دستگاه (میلیمتر)

جدول (۳) نتایج آزمایش مغناطیسی مرحله اول (d_n = ۷۴ μm)

بخش	طلا		آهن		بخش
	بازیابی وزنی (%)	عیار (ppm)	بازیابی فلز (%)	عیار (%)	
خوراک	۱۰۰	۹/۴۵	۱۰۰	۲/۶۵	۱۰۰
کنسانتره	۲۴/۹۵	۳۲/۳۳	۸۵/۳۶	۸/۵۶	۸۰/۵۹
باطله	۷۵/۰۵	۱/۸۴۳	۱۴/۶۴	۰/۶۸۵	۱۹/۴۱

جدول (۵) نتایج جدایش مغناطیسی مرحله دوم (d_n = ۳۸ μm)

بخش	طلا		آهن		بخش
	بازیابی وزنی (%)	عیار (ppm)	بازیابی فلز (%)	عیار (%)	
خوراک	-	۱/۸۴۳	-	۰/۶۸۵	-
کنسانتره	۷/۸۷	۱۳/۱۶	۵۶/۲	۴/۰۷	۴۶/۷۷
باطله	۹۲/۱۳	۰/۸۷۶	۴۳/۸	۰/۳۹۶	۵۲/۲۳

در جدول ۶ نتایج آنالیز طلا در هر یک از مراحل و در مجموع دو مرحله ارائه شده است.

بنابراین امکان دارد عیار طلا در باطله غیرمغناطیسی ناشی از همراهی آن با آهن غیرآزاد در این بخش باشد که در حین فرایند جدایش، وارد بخش مغناطیسی نشده‌اند. به عبارت دیگر امکان دارد که به دلیل درگیر بودن بخشی از ذرات حاوی آهن با بخش سیلیسی، جدایش مغناطیسی به خوبی انجام نگرفته باشد. به همین منظور این بخش با استفاده از پودرکن به ابعاد کوچکتر از ۳۸ میکرون ریز شد و بار دیگر با استفاده از دستگاه مغناطیسی با شدت بالا مورد جداسازی قرار گرفت. جدول ۴ شرایط آزمایش مغناطیسی باطله مرحله اول جدایش مغناطیسی و جدول ۵ نتایج عیار و بازیابی فلز حاصل از جدایش مغناطیسی مرحله دوم را نشان می‌دهد.

جدول (۶) نتایج نهایی جدایش مغناطیسی در دو مرحله

بخش	طلا		آهن	
	بازیابی وزنی (%)	عیار (ppm)	بازیابی فلز (%)	عیار (%)
خوراک	-	۹/۴۵	-	۲/۶۵
کنسانتره مرحله اول	۲۴/۹۵	۳۲/۳۳	۸۵/۳۶	۸/۵۶
کنسانتره مرحله دوم	۷/۸۷	۱۳/۱۶	۵۶/۲	۴/۰۷
مجموع کنسانتره‌ها	۳۰/۸۶	۲۸/۶۶	۹۳/۵۹	۷/۷۰
باطله نهایی	۶۹/۱۴	۰/۸۷۶	۶/۴۱	۰/۳۹۶

(SEM) و آنالیز Map احتمال همراهی طلا با فاز آهن دار نمونه (هماتیت) تشخیص داده شد. به منظور اثبات این مدعا، آزمایش‌های جدایش مغناطیسی با شدت بیشتر استفاده شد. در مرحله اول جدایش، بازیابی طلا در کنسانتره مغناطیسی بیش از ۸۵ درصد و در مرحله دوم بازیابی طلا از باطله مرحله اول بیش از ۵۶ درصد و در مجموع دو مرحله بیش از ۹۳ درصد طلا در کنسانتره مغناطیسی بازیابی شد. افت طلا در باطله نهایی کمتر از ۷ درصد که عیار آن کمتر از ۰/۹ ppm است. با بهره‌گیری از نتایج این آزمایش‌ها و مطالعات میکروسکوپی می‌توان اظهار کرد که بخش عمده‌ای از طلای نمونه درگیر با فاز هماتیستی می‌باشد.

با توجه به اینکه کنسانتره مغناطیسی در مجموع دو مرحله جدایش، تقریباً ۳۱ درصد از کل خوراک را تشکیل می‌دهد، بنابراین استفاده از روش جدایش مغناطیسی پیش از لیچینگ می‌تواند تقریباً ۶۹ درصد از کل خوراک ورودی به مرحله لیچینگ را حذف کند؛ در نتیجه علاوه بر این که از لحاظ عملیاتی حجم فرایند کاهش پیدا می‌کند، از لحاظ اقتصادی نیز در مصرف سیانور صرفه‌جویی می‌شود. این کاهش مصرف سیانور از لحاظ زیست‌محیطی به دلیل کاهش تولید پسماندهای سیانیدی بسیار حائز اهمیت است.

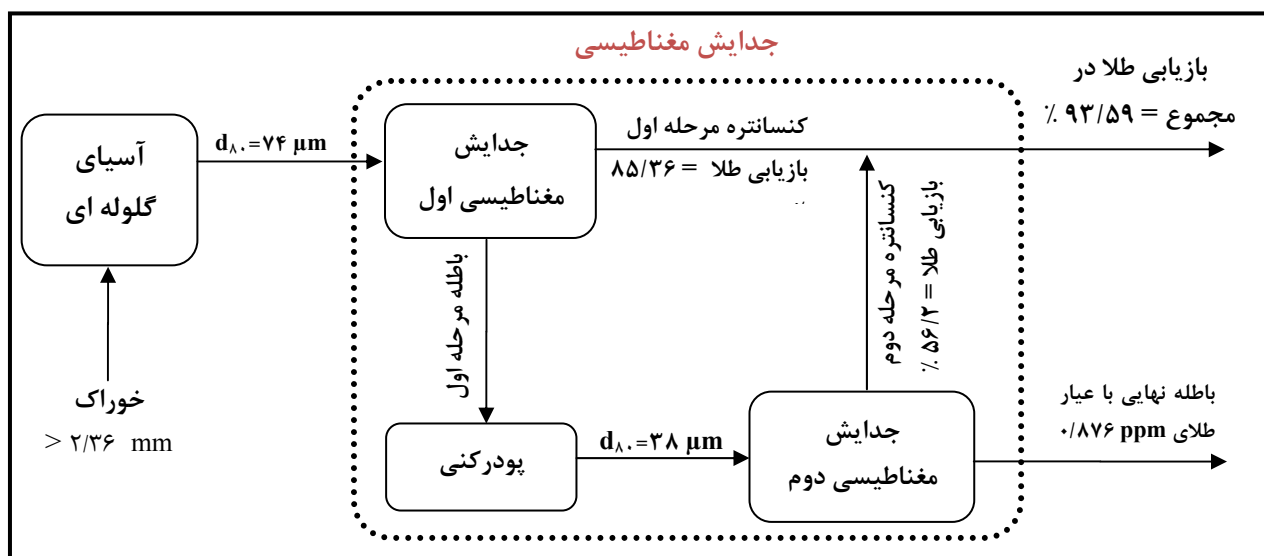
تشکر و قدردانی

تحقیق حاضر با همکاری سازمان زمین‌شناسی و دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. بدین وسیله از همکاری مسئولان دو سازمان در زمینه تهیه نمونه اولیه و انجام آنالیزها تشکر و قدردانی می‌شود.

همان طور که نتایج نشان می‌دهند، حضور بیش از ۹۳ درصد طلا در کنسانتره مغناطیسی، همراهی آن با فاز آهن دار نمونه را تأیید می‌کند. در نتیجه امکان پیش‌فرآوری نمونه خوراک با دو بار جدایش مغناطیسی وجود دارد. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده از جدول ۶ و همچنین نتایج آنالیز Map و آنالیز EDAX، می‌توان گفت که بخش عمده‌ای از طلای نمونه درگیر با فاز هماتیستی می‌باشد. در شکل ۵ شمایی کلی مراحل جدایش دو فاز مغناطیسی و غیرمغناطیسی نشان داده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

شناسایی فاز همراه طلا در کانه‌های حاوی طلا می‌تواند در پیش‌فرآوری و کاهش هزینه‌های آن بسیار کمک‌کننده و مؤثر باشد. با استفاده از مطالعات میکروسکوپ الکترونی



شکل (۵) شمایی از فرایند جدایش مغناطیسی دو مرحله‌ای بر روی نمونه خوراک اولیه

- [7] M. Coetzee, M.J. Wilkinson and J.A. Tumilty (1988) "The degree of commination required to liberate gold from Witwatersrand quartzites", *Perth Gold '88, Randol Int. Ltd.*, Golden, CO, USA, 43-48.
- [8] J. Zhou, B. Jago, and C. Martin (2004) "Establishing the Process Mineralogy of Gold Ores", *SGS MINERALS, Technical Bulletin* 1-16.
- [9] J, A. DU Plessis (2011) "Improved gold recovery by accelerated gravity separation", *M.Sc. Thesis, School of Chemical and Minerals Engineering*, North-West University.
- [10] I. J. Corrans, and J. Levin (1979) "Wet high-intensity magnetic separation for the concentration of Witwatersrand gold – uranium ores and residues", *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 210-228.
- [11] م. مرادی، (۱۳۹۱) "فرآوری کانسنگ طلای زایلیک آذربایجان شرقی" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- [1] C. A. Fleming, M. J. Nicol (1984) "The adsorption of gold cyanide onto activated carbon. III. Factors influencing the rate of loading and the equilibrium capacity", *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 84, 4, 85-93.
- [2] W.R. Goodall, P. J. Scales, and A. R. Butcher (2005) "The use of QEMSCAN and diagnostic leaching in the characterization of visible gold in complex ores", *J. Minerals Engineering*, 18, 877–886.
- [3] W.R. Goodall, P. J. Scales, and C. G. Ryan (2005) "Applications of PIXE and diagnostic leaching in the characterization of complex gold ores", *J. Minerals Engineering*, 18, 1010–1019.
- [4] K. Wang, Y. Zhou, L. Sun, and C. Ren (1994) "Study on the gold occurrence from several typical Carlin-type gold deposits in China", *Publishing House of University of Science & Technology of China*, Hefei, 114.
- [5] K. Wang, Y. Zhou, F. Li, L. Sun, J. Wang, C. Ren, S. Zhou, J. Tang and F. Yang (1992) "SPM and SEM study on the occurrence of micro grained gold in the Jinya gold deposit, Guangxi", *Chinese Science Bulletin*, 37, 22, 1906-1910.
- [6] K. Kojonen, and B. Johanson (1999) "Determination of refractory gold distribution by microanalysis, diagnostic leaching and image analysis", *Mineralogy and Petrology*, 67, 1-19.

Magnetic separation for phase characterization associated with gold in zaylik ore

Vahid Rasouli¹, Mahmoud Abdollahy^{1,*}, S. M. Javad Koleini¹, Ahmad Amini²

1. Department of Mining Engineering, Tarbiat Modares university, Tehran, Iran

2. Geological survey of Iran, Tehran, Iran

ABSTRACT

Mineralogical studies on the Zaylik gold ore of Eastern Azerbaijan showed that silica and iron were major phases in ore. To identify the phase accompany gold, SEM studies, analytical Map and magnetic separation method were used. Experimental results showed that using two stages of magnetic separation, led to the elimination of more than 69% by weight of the original feed to tailing with grade lower than 0.9 ppm gold. Also a concentrate with approximately 31% by weight of the original sample with recovery of about 93% gold obtained. In other words, about 7% of gold lost in total tailing, but due to the removal of a significant portion of the silicate compound from ore, magnetic separation has an important role in reducing chemical consumption and operating costs for leaching processes.

All right reserved.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: Oct. 13, 2013

Revised: Feb. 10, 2015

Accepted: Feb. 22, 2015

Key words:

Gold,

Zaylik,

Magnetic separation.

* Corresponding author

minmabd@modares.ac.ir
