



Imam Khomeini International University
Vol. 8, No. 3, Autumn 2023



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Technical Note

Determining the Correlation of Elements in the Mining Area of Sineqan in Markazi Province in Order to Be Used in the Feasibility Studies of Copper and Rare Earth Elements Processing

Soltani F.^{1*}, Mojeddifar S.¹, Hemmati Chegeni M.¹, Darabi H.²

1- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Arak University of Technology, Markazi, Iran
2- Ph.D, Dept. of Mineral Processing, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 14 Feb. 2022

Accepted: 27 Aug. 2022

Abstract: Sineqan mine, 25 km away from Delijan city (Markazi province), has shown important evidences of iron oxide ores containing copper, gold and rare earth elements (REE) in the early stages of exploration. In the present study, a low-grade sample of the mine from the albite zone containing 0.69% of copper and 223, 186 and 55 g/t of cerium, lanthanum and neodymium was processed and compared with the results of elements correlation in geochemical samples. Cerium, neodymium and lanthanum showed the highest correlation with each other and with the thorium. The correlation coefficient of light REEs with phosphorus was negative. The results of ammonium sulfate leaching showed that the occurrence of REE in the sample is not as adsorption on clay minerals and the study of the correlation coefficient of REE with aluminum and sodium in geochemical samples also confirmed this result. The results of leaching with H₂SO₄ showed that selective leaching of copper is possible. The low efficiency of leaching with H₂SO₄, HCl and HNO₃ and the higher efficiency of 96% for leaching with cerium and lanthanum under acidic baking conditions showed that a significant part of REEs is in the form of refractory minerals. The concentration ratio of REEs in the magnetic concentrate was close to iron. According to the correlation analysis of elements in geochemical samples, the correlation of calcium with REE was in the range of -0.2to-0.3. In the flotation test, although the grade of calcium increased 3.5 times in the flotation concentrate, this was not the case for REEs. The results of this research can be used in similar cases in the early stages of exploration and processing feasibility studies.

Keywords: Geochemical prospecting, Feasibility study, Rare earth elements, Sineqan mine.

How to cite this article

Soltani, F., Mojeddifar, S., Hemmati Chegeni, M., and Darabi, H. (2023). "Determining the correlation of elements in the mining area of Sineqan in Markazi province in order to be used in the feasibility studies of copper and rare earth elements processing". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(3): 107-121.

DOI: [10.30479/JMRE.2022.16908.1577](https://doi.org/10.30479/JMRE.2022.16908.1577)

*Corresponding Author Email: faraz.soltani@arakut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2023 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

Rare earth elements (REEs) are a group of 15 lanthanide elements plus yttrium and scandium. The main ores of REEs include monazite and bastnasite minerals, and secondary ores include minerals such as xenotime, apatite, and clays minerals containing REEs, allanite, zircon, eugenite, and loparite [1]. Due to the growing importance of REEs in high-tech industries, different countries have paid special attention to the extraction of REEs from their secondary sources.

Sineqan mine is located in Markazi province (Iran) and 25 km away from Dilijan city. The mine is currently in the early stages of exploration, which has shown significant evidences of iron oxide ores containing copper, gold and rare earth elements. For the first time in Iran, Karimpour introduced iron oxides type deposits containing copper and gold (IOCG) in the Khaf-Kashmar-Bardaskan belt [2].

In this research, the results of initial geochemical studies and the results obtained from processing a low-grade sample of the mine were investigated. In the geochemical studies, the correlation between REEs with other elements was investigated and compared with the results of processing low-grade mine samples by magnetic, flotation and leaching methods with the aim of identifying the behavior of rare earth minerals.

MATERIALS AND METHODS

Preparation of geochemical and mineral processing test samples

The geochemical samples (26 samples) were crushed to -3.34 mm using laboratory jaw and roller crushers and divided using a Jones riffler. Sub-samples were pulverized and analyzed by ICP-MS method.

100 kg of feldspar samples (probably from albitic alteration zone of the mine) was crushed by jaw crusher (two stages in open circuit) and roller crusher (in a closed circuit with 3.34 mm control screen) and ground by using a laboratory ball mill. The results of the chemical analysis of the sample used in the processing tests are shown in Table 1. Results of the semi-quantitative XRD analysis of the feldspar sample showed that the main minerals in the sample are albite (60%), chlorite (19%), quartz (16%) and hematite (3%).

Table 1. Chemical analysis of the sample used in the processing tests

Size fraction (micron)		As	CaO	MgO	Na ₂ O	Cu	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Y	Nd	La	Ce
	Wt.%	ppm	ppm	%	%	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm
Feed	100	28	6861	3	7.07	6900	15.06	6.12	28	55	186	223
+150	10.7	28	5000	3.04	6.31	7401	14.18	6.62	22	38	128	163
-150+106	20.4	28	4400	2.58	6.17	4667	13.33	5.87	20	45	158	190
-106+75	7.8	10	8500	2.51	6.16	4519	13.28	5.61	21	50	180	214
-75+38	16.0	34	5800	2.41	6.31	4942	13.49	5.54	24	73	269	317
-38	45.2	30	8500	3.20	7.12	7804	15.56	6.37	35	59	184	221

Mineral processing tests

Initial processing tests included magnetic concentration, flotation, alkaline and acid leaching, and acid baking (temperatures higher than 100°C) using sulfuric acid. The degree of freedom studies of the sample showed that more than 80% of the iron minerals are free in the +53-75 micron size fraction. For this reason, the sample with d80 of 64 micron was used for preliminary processing tests.

Calculation of correlation coefficient of elements in geochemical samples

Pearson's linear correlation coefficient method was used to check the correlation of elements in the geochemical samples. Pearson's linear correlation coefficient is the most common method for determining the correlation coefficient. In this method, the following averages are calculated for Xa column in X matrix and Yb column in Y matrix [3].

$$\bar{X}_a = \sum_{i=1}^n (X_{a,i})/n \quad (1)$$

$$\bar{Y}_b = \sum_{j=1}^n (X_{b,j})/n \quad (2)$$

Pearson's linear correlation coefficient (rho(a,b)) is defined as follows:

$$rho(a,b) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{a,i} - \bar{X}_a)(Y_{b,i} - \bar{Y}_b)}{\{\sum_{i=1}^n (X_{a,i} - \bar{X}_a)^2 \sum_{i=1}^n (Y_{b,i} - \bar{Y}_b)^2\}^{1/2}} \quad (3)$$

Where:

n: is the length of each column.

The correlation coefficient values obtained from this method are in the range of +1 to -1. A value of -1 indicates a completely negative correlation and a value of +1 indicates a completely positive correlation. A value of 0 indicates that there is no correlation among the columns [3].

RESULTS AND DISCUSSION

The results of preliminary exploration studies (mineralogy of the trench samples) of the sineqan mine

Preliminary mineralogical studies of the trench samples indicated that the host rocks of the area are andesite (basaltic andesite) and tuff. About 15-20% of the rock volume is in the form of coarse crystals, of which 70-75% of the coarse crystals belong to plagioclase, 15-20% to pyroxene, and about 5-10% to hornblende. Metallic minerals make up about 4-5% of the rock volume and are often seen in the form of fine crystals in the rock background.

Investigating the correlation of elements in geochemical samples

In 26 geochemical samples taken from Sineqan mine, Al_2O_3 grades range from 5.98 to 16.24%, Fe_2O_3 grades range from 0.97 to 42.79%, copper grades range from 22 ppm to 2.29%, and the range of total REEs is from 70 to 1600 ppm. Results of the correlation studies showed that the cerium, neodymium and lanthanum light REEs have the highest correlation with each other and with the thorium element with a correlation coefficient of about 1. A noteworthy point is the low correlation coefficient of the cerium, lanthanum and neodymium with the yttrium as a heavy REE.

PROCESSING TESTS RESULTS

Leaching

The results of ammonium sulfate leaching of the sample showed that the occurrence of elements in the examined sample is not in the form of absorption on clay minerals. On the other hand, investigating the correlation coefficient of rare earth elements with aluminum and sodium in geochemical samples also confirmed this issue and the correlation coefficient of aluminum with cerium and lanthanum elements was obtained as -0.6 and -0.5, respectively.

Considering that sulfuric acid is a common acid for the leaching of copper minerals, the sulfuric acid leaching behaviors of copper, iron and REEs were investigated. Increasing the concentration of sulfuric acid from 1 to 2 M increased the copper leaching efficiency from 65 to 89%. The maximum leaching efficiency of cerium and lanthanum elements was 10 and 14%, respectively, which shows that some of the minerals containing REEs are not refractory in nature (such as apatite).

The possibility of the sample leaching with hydrochloric acid and nitric acid at a temperature of 70°C and for 60 minutes was studied. The results showed that the leaching efficiency of cerium and lanthanum elements with hydrochloric acid was 22.6 and 23%, respectively, and with nitric acid was 18.6 and 22.7%, respectively. The maximum leaching efficiency of iron and copper was 85.4% and 95% using hydrochloric acid and 70.6% and 97% using nitric acid, respectively.

Finally, in order to confirm the presence of rare earth elements in the refractory minerals such as monazite [4] and sphene, acid baking tests were performed. By performing an acid baking test at 250°C and 120 minutes and then leaching the resulting paste with water for 60 minutes at room temperature, it is possible

to leach 96% of cerium and lanthanum and all the iron and copper. This result confirms the presence of a significant part of rare earth elements in the form of refractory minerals.

Magnetic concentration and flotation

The purpose of the flotation test was to concentrate the rare earth minerals with calcium (such as apatite and sphene). The concentration ratio of cerium, lanthanum and neodymium in magnetic separation concentrate was very close to iron. This trend was also been observed in the flotation test. According to the correlation analysis of elements in geochemical samples, the correlation of calcium with rare earth elements cerium, lanthanum and neodymium was in the range of -0.2 to -0.3. In the flotation test, despite the fact that calcium increased 3.5 times in the concentrate, this increase was less for REEs.

CONCLUSIONS

Correlation analysis of the elements in geochemical samples showed that, unlike other deposits of the Iran that are usually associated with phosphorus, REEs in Sineqan mine do not have a significant positive correlation with phosphorus element. The results of leaching with ammonium sulfate showed that the occurrence of REEs in the sample is not in the form of absorption on clay minerals, and the correlation coefficient of the occurrence of REEs with aluminium and sodium in geochemical samples also confirmed this issue. The results of leaching with H_2SO_4 showed that there is a possibility of selective leaching of copper compared to REEs. The leaching efficiency of 96% of cerium and lanthanum under acidic baking conditions showed that a significant part of REEs is in the form of refractory minerals. The concentration ratio of REEs in magnetic concentrate was close to iron. According to the correlation analysis of elements in geochemical samples, the correlation of calcium with REE was in the range of -0.2 to -0.3. In the flotation test, despite the fact that calcium increased 3.5 times in the concentrate, this increase was less for REEs.

REFERENCES

- [1] Krishnamurthy, N., and Gupta, C. K. (2015). *“Extractive metallurgy of rare earths”*. CRC press, pp. 540.
- [2] Karimpour, M. H. (2005). *“Iron oxides Cu-Au deposits (IOCG) and examples from Iran”*. In The 9th Conference of the Geological Society of Iran, Tehran, Iran, 710-725. (In Persian).
- [3] Hollander, M., Wolfe, D. A., and Chicken, E. (2013). *“Nonparametric statistical methods”*. John Wiley & Sons, pp. 751.
- [4] Soltani, F., Abdollahy, M., Petersen, J., Ram, R., Becker, M., Koleini, S. M. J., and Moradkhani, D. (2018). *“Leaching and recovery of phosphate and rare earth elements from an iron-rich fluorapatite concentrate: Part I: direct baking of the concentrate”*. *Hydrometallurgy*, 177: 66-78.



یادداشت فنی

تعیین همبستگی عناصر در محدوده معدنی سینقان استان مرکزی به منظور استفاده در مطالعات امکان‌سنجی فرآوری مس و عناصر نادر خاکی

فراز سلطانی^{۱*}، سعید مجدی فرا^۱، محسن همتی چگنی^۱، حسنا دارابی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

۲- دکترا، گروه مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

چکیده

معدن سینقان در فاصله ۲۵ کیلومتری شهرستان دلیجان (استان مرکزی) شواهد مهمی از کانسنگ اکسیدهای آهن حاوی مس، طلا و عناصر نادر خاکی (REE) را نشان داده است. در تحقیق حاضر، نمونه کم‌عیار معدن از زون آلپینی حاوی ۰٫۶۹ درصد مس و ۲۲۳، ۱۸۶ و ۵۵ گرم در تن سریم، لانتانیم و نئودیمیم فرآوری و با نتایج همبستگی عناصر در نمونه‌های ژئوشیمیایی مقایسه شد. سریم، نئودیمیم و لانتانیم بیشترین همبستگی را با یکدیگر و با عنصر توریم نشان دادند. ضریب همبستگی REE سبک با فسفر غالباً منفی بوده است. نتایج لیچینگ با سولفات آمونیم نشان داد که رخدادهای REE در نمونه به صورت جذب روی کانی‌های رسی نیست و بررسی ضریب همبستگی REE با آلومینیم و سدیم در نمونه‌های ژئوشیمیایی نیز موید این موضوع بوده است. نتایج لیچینگ با H_2SO_4 نشان داد که امکان لیچینگ انتخابی مس وجود دارد. راندمان کم لیچینگ با HCl ، H_2SO_4 و HNO_3 در نهایت، راندمان لیچینگ ۹۶ درصد سریم و لانتانیم در شرایط پخت اسیدی نشان داد که بخش قابل توجهی از REE در قالب کانی‌های مقاوم است. نسبت عیار REE در کنسانتره مغناطیسی نزدیک به آهن است. مطابق آنالیز همبستگی عناصر در نمونه‌های ژئوشیمیایی، همبستگی کلسیم با REE در محدوده ۰٫۲- تا ۰٫۳- است. در آزمایش فلوتاسیون نیز علیرغم اینکه کلسیم ۳/۵ برابر در کنسانتره افزایش عیار داده است، این افزایش برای REE کمتر بوده است. از نتایج این تحقیق می‌توان در موارد مشابه به ویژه در مطالعات مراحل اولیه اکتشاف و امکان‌سنجی فرآوری استفاده کرد.

کلمات کلیدی

پی‌جویی ژئوشیمیایی، امکان‌سنجی فرآوری، عناصر نادر خاکی، معدن سینقان.

استناد به این مقاله

سلطانی، ف.، مجدی فرا، س.، همتی چگنی، م.، دارابی، ح.؛ ۱۴۰۲؛ "تعیین همبستگی عناصر در محدوده معدنی سینقان استان مرکزی به منظور استفاده در مطالعات امکان‌سنجی فرآوری مس و عناصر نادر خاکی". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۳، ص ۱۲۱-۱۰۷.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.16908.1577



۱- مقدمه

معدن سینقان و نتایج حاصل از فرآوری نمونه کم‌عیار حاوی مس و عناصر نادر خاکی از این معدن بررسی شده است. در مطالعات گذشته، در ارتباط با روش‌های تغلیظ و فرآوری عناصر نادر خاکی و همچنین ارتباط آن با فرآوری مس در اینگونه ذخایر گزارشی منتشر نشده است، بنابراین در مقاله پیش رو، همبستگی عناصر نادر خاکی با عناصر مختلف در نمونه‌های ژئوشیمیایی بررسی و این همبستگی با هدف شناسایی رفتار کانی‌های نادر خاکی با نتایج فرآوری نمونه کم‌عیار معدن به روش‌های مغناطیسی، فلوتاسیون و لیچینگ مقایسه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- عملیات اکتشاف مقدماتی و تهیه نمونه‌های ژئوشیمیایی و آزمایش‌های فرآوری

معدن سینقان در استان مرکزی و در فاصله ۲۵ کیلومتری شهرستان دلجان واقع شده است و از طریق یک جاده آسفالت به دلجان متصل است. تعداد ۲۶ نمونه ژئوشیمیایی و یک نمونه برای انجام آزمایش‌های امکان‌سنجی اولیه فرآوری تهیه و به آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشگاه صنعتی اراک منتقل شد. نمونه‌های ژئوشیمیایی پس از مراحل سنگ‌شکنی فکی و غلطکی تا ابعاد ۳/۳۴ میلی‌متر، با استفاده از ریفیل تقسیم شده و پس از پودر شدن به وسیله پودرکن آنالیز شد.

۱۰۰ کیلوگرم نمونه فلدسپات سدیک معدن (احتمالاً زون آلتراسیون آلبیتی) نیز پس از خردایش به وسیله سنگ‌شکن فکی (دو مرحله در مدار باز) و سنگ‌شکن غلطکی (در مدار بسته با سرند کنترلی ۳/۳۴ میلی‌متر) با استفاده از آسیای گلوله‌ای تر خردایش شده و پس از خشک شدن و تقسیم برای مطالعات شناسایی و آزمایش‌های فرآوری آماده شد.

۲-۲- شناسایی نمونه‌ها

آنالیز شیمیایی عناصر آلومینیم، سدیم و سیلیسیم موجود در نمونه با استفاده از روش ذوب قلیایی با لیتیم برات (شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزما) و آنالیز سایر عناصر به روش ICP-OES انجام شد. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی نمونه مورد استفاده در آزمایش‌های فرآوری و همچنین نمونه‌های محدوده‌های ابعادی در جدول ۱ ارایه شده است. آنالیز XRD نیمه کمی نمونه فلدسپات موجود در معدن (احتمالاً زون آلتراسیون آلبیتی) در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق

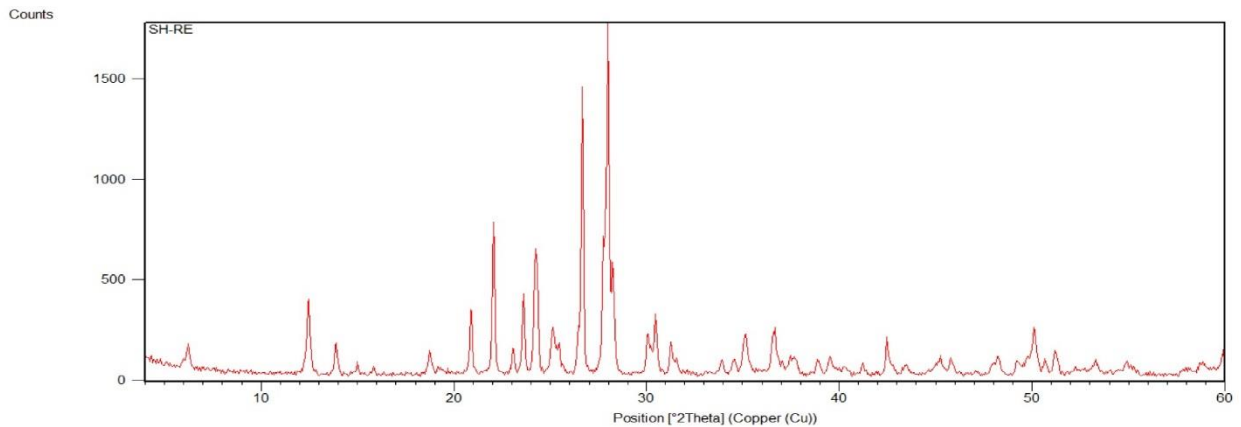
عناصر نادر خاکی، مجموعه‌ای از ۱۵ عنصر لانتانیدها به علاوه ایتیریم و اسکاندیم‌اند. کانسنگ‌های اصلی عناصر نادر خاکی شامل کانی‌های مونازیت و باستنزیت و کانسنگ‌های فرعی شامل کانی‌هایی همچون زنوتیم، آپاتیت، رس‌های حاوی عناصر نادر خاکی، آلانیت، زیرکن، اوژنیت و لوپاریت است [۱]. با توجه به اهمیت روزافزون عناصر نادر خاکی در صنایع با تکنولوژی بالا، کشورهای مختلف توجه ویژه‌ای را معطوف استحصال عناصر نادر خاکی از منابع ثانویه آن کرده‌اند. در کشور ما، تاکنون منبع اولیه غنی از این عناصر شناسایی نشده است.

معدن سینقان در استان مرکزی و در فاصله ۲۵ کیلومتری شهرستان دلجان واقع شده است. این معدن در حال حاضر در مراحل اولیه اکتشاف است که شواهد مهمی از کانسنگ‌های اکسیدهای آهن حاوی مس، طلا و عناصر نادر خاکی را نشان داده است. کریم‌پور برای اولین بار در ایران این تیپ کانسنگ را در کمر بند خواف- کاشمر- بردسکن به عنوان کمر بند حاوی کانسنگ‌های تیپ اکسیدهای آهن حاوی مس و طلا (IOCG) معرفی کرده است [۲].

در ارتباط با تنوع کانی‌شناسی [۳] و فرآوری اکسیدهای آهن، مس و طلا از کانسنگ‌های IOCG تحقیقات زیادی انجام شده و واحدهای صنعتی متعددی در سراسر دنیا این تیپ کانسنگ را فرآوری می‌کنند، اما در ارتباط با مقدار و روش‌های فرآوری کانی‌های نادر خاکی از این نوع ذخایر اطلاعات چندانی منتشر نشده است.

کانی‌های حاوی عناصر نادر خاکی در ذخایر IOCG، بسته به شرایط تشکیل ذخیره متنوع‌اند. در کانسنگ‌هایی که در آنها مگنتیت غالب است، کانی‌های نادر خاکی شامل آپاتیت، تیتانیت (اسفن) و اپیدوت- آلانیت است. در مجموعه‌های غنی از هماتیت، کانی نادر خاکی شامل آپاتیت، فسفات‌ها (مونازیت، زنوتیم و بریتولیت)، کربنات‌ها (باستنزیت و سینکسیت) و سیلیکات‌ها (آلانیت و استیلولیت) است [۴]. نکته قابل توجه در مورد ذخایر IOCG این است که برخی معادن مانند معدن Bayan Obo در چین (با عیار REO_2O_3 برابر با ۶ درصد) و Olympic Dam در استرالیا (با عیار REO برابر با ۰/۳۲ درصد)، حاوی مقادیر قابل توجهی از این عناصر به عنوان منابع ثانویه‌اند [۵].

در تحقیق پیش رو، نتایج مطالعات اولیه ژئوشیمیایی



Ka = Cu Fil. = Ni

Sample	Phase(s)
SH-RE	Quartz (33-1161) = 16%
LAB: SH-RE	SiO2
Date :	Albite (09-0466) = 60%
18.8.2021	NaAlSi3O8
kV = 40	Hematite (33-0664) = 3%
mA = 30	Fe2O3
Ka. = Cu	Chlorite (29-0701) = 19%
Fil. = Ni	(Mg,Fe)6(Si,Al)4O10(OH)8

شکل ۱: آنالیز XRD نیمه کمی نمونه کم‌عیار معدن

جدول ۱: آنالیز شیمیایی نمونه مورد استفاده برای آزمایش‌های فرآوری (نمونه خوراک و نمونه آسیا شده با d80 حدود ۱۳۰ میکرون)

As	CaO	MgO	Na ₂ O	Cu	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Y	Nd	La	Ce	عنصر اترکیب	محدوده ابعادی
ppm	ppm	%	%	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	درصد وزنی	(میکرون)
۲۸	۶۸۶۱	۳	۷,۰۷	۶۹۰۰	۱۵,۰۶	۶,۱۲	۲۸	۵۵	۱۸۶	۲۲۳	۱۰۰	خوراک
۲۸	۵۰۰۰	۳,۰۴	۶,۳۱	۷۴۰۱	۱۴,۱۸	۶,۶۲	۲۲	۳۸	۱۲۸	۱۶۳	۱۰,۷	+۱۵۰
۲۸	۴۴۰۰	۲,۵۸	۶,۱۷	۴۶۶۷	۱۳,۳۳	۵,۸۷	۲۰	۴۵	۱۵۸	۱۹۰	۲۰,۴	-۱۵۰+۱۰۶
۱۰	۸۵۰۰	۲,۵۱	۶,۱۶	۴۵۱۹	۱۳,۲۸	۵,۶۱	۲۱	۵۰	۱۸۰	۲۱۴	۷,۸	-۱۰۶+۷۵
۳۴	۵۸۰۰	۲,۴۱	۶,۳۱	۴۹۴۲	۱۳,۴۹	۵,۵۴	۲۴	۷۳	۲۶۹	۳۱۷	۱۶,۰	-۷۵+۳۸
۳۰	۸۵۰۰	۳,۲۰	۷,۱۲	۷۸۰۴	۱۵,۵۶	۶,۳۷	۳۵	۵۹	۱۸۴	۲۲۱	۴۵,۲	-۳۸

گلوله‌ها جدا شده به روش تر سرد و برای توزین به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. مطابق شکل ۲، d80 نمونه پس از ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه آسیاکنی به وسیله آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۱۳۰، ۹۹ و ۶۴ میکرون بوده است. مطالعات درجه آزادی نمونه نشان داد بیشتر از ۸۰ درصد کانی‌های آهن در محدوده ابعادی ۷۵-۵۳+ میکرون آزاد هستند. به همین علت، نمونه با d80 ۶۴ میکرون برای آزمایش‌های فرآوری اولیه استفاده شد. از نمونه با d80 ۱۳۰ میکرون نیز برای بررسی توزیع عناصر در محدوده‌های ابعادی استفاده شد (جدول ۱).

آنالیز، کانی‌های اصلی موجود در نمونه شامل آلبیت (۶۰ درصد)، کلریت (۱۹ درصد)، کوارتز (۱۶ درصد) و هماتیت (۳ درصد) است.

۲-۳- آزمایش‌های فرآوری

برای تعیین زمان بهینه آسیاکنی نمونه، پس از خردایش نمونه اولیه به وسیله سنگ‌شکن فکی (دو مرحله در مدار باز) و سنگ‌شکن غلطکی (در مدار بسته با سرند کنترلی ۳/۳۴ میلی‌متر) نمودار زمان بهینه آسیاکنی نمونه در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه‌ها پس از انجام هر مرحله آسیاکنی از

مورد نیاز محلول لیچینگ به بشر اضافه، تنظیم دما در مقدار معین انجام و سپس ۱۰۰ گرم جامد به آرامی به ظرف بشر اضافه شد. در آزمایش پخت اسیدی نیز، ۱۵ گرم جامد با ۳۰ گرم اسید سولفوریک ۹۸ درصد به صورت خمیر آماده‌سازی شد و در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲۰ در کوره آزمایشگاهی قرار گرفت. پس از اتمام عملیات پخت، لیچینگ خمیر سفت حاصل با استفاده از ۶۰ گرم آب به مدت ۶۰ دقیقه در دمای محیط انجام شد. پس از گذشت مدت زمان لازم در هر آزمایش لیچینگ، پالپ با استفاده از فیلتر خلا آزمایشگاهی فیلتر شده و پس از دوبرابر شستشوی پسماند لیچینگ، پسماند به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در خشک کن قرار گرفت. در نهایت، محلول باردار لیچینگ و محلول‌های شستشو و همچنین پسماند خشک و توزین شده برای آنالیز ارسال شد. در آزمایش‌های لیچینگ از نمک سولفات آمونیم با فرمول شیمیایی $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ساخت شرکت مرک آلمان، اسید سولفوریک با عیار ۹۸ درصد ساخت شرکت مرک آلمان، اسید کلریدریک با عیار ۳۷ درصد ساخت شرکت فخر رازی، اسید نیتریک ۶۵ درصد ساخت شرکت دکتر مجللی استفاده شد. در تمامی آزمایش‌ها از آب شهری برای لیچینگ استفاده شد.

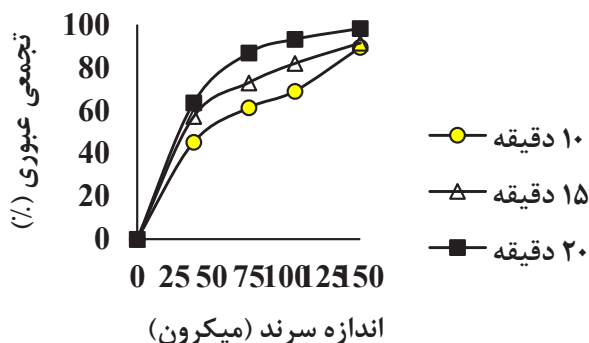
۴-۲ - محاسبه ضریب همبستگی عناصر در نمونه‌های ژئوشیمیایی

از روش ضریب همبستگی خطی پیرسون (Pearson) برای بررسی همبستگی عناصر در نمونه‌های ژئوشیمیایی استفاده شد. ضریب همبستگی خطی پیرسون، متداول‌ترین روش تعیین ضریب همبستگی است. در این روش برای ستون X_a در ماتریس X و ستون Y_b در ماتریس Y ، که میانگین‌های زیر را دارند ضریب همبستگی خطی پیرسون $(\text{rho}(a,b))$ ، به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود [۶]:

$$\bar{X}_a = \sum_{i=1}^n (X_{a,i})/n \quad (1)$$

$$\bar{Y}_b = \sum_{j=1}^n (X_{b,j})/n \quad (2)$$

$$\text{rho}(a,b) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{a,i} - \bar{X}_a)(Y_{b,i} - \bar{Y}_b)}{\{\sum_{i=1}^n (X_{a,i} - \bar{X}_a)^2 \sum_{i=1}^n (Y_{b,i} - \bar{Y}_b)^2\}^{1/2}} \quad (3)$$



شکل ۲: زمان بهینه آسیابانی نمونه

آزمایش‌های فراوری اولیه شامل پرعیارسازی مغناطیسی، فلوتاسیون، لیچینگ قلیایی و اسیدی و پخت اسیدی (دمای بیشتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) با استفاده از اسید سولفوریک بوده است. برای آزمایش پرعیارسازی مغناطیسی که بیشتر برای بررسی همراهی آهن با مس و عناصر نادر خاکی انجام شد از یک میله مغناطیسی به طول ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۲۰ میلی‌متر از جنس استیل ضدزنگ با شدت میدان مغناطیسی ۶۰۰۰ گاوس (ساخت شرکت ایران مگنت) در یک بشر با درصد جامد حدود ۲۰ درصد به کمک همزن مکانیکی استفاده شد. آزمایش فلوتاسیون با هدف پرعیارسازی کانی‌های حاوی فسفر و کلسیم و ارتباط آن با پرعیارسازی عناصر نادر خاکی با استفاده از ۵۰۰ گرم در تن کلکتور Flu-YS20 (که از مشتقات اسیدهای چرب با فرمول شیمیایی RCOOH و برای کانی‌های حاوی عنصر کلسیم مناسب است) ساخت شرکت اصفهان کوپلیمر در pH حدود ۸٫۹۲ (تنظیم شده به وسیله کربنات سدیم با دستگاه pH متر پورتابل HANNA مدل HL8014)، ۵۰۰ گرم در تن سیلیکات سدیم به عنوان متفرق‌کننده، ۵۰ گرم در تن کفساز MIBC و ۴ دقیقه کف‌گیری استفاده شد. برای انجام آزمایش فلوتاسیون از سلول فلوتاسیون مدل دنور با ۵۵۰ گرم خوراک، ۱۲۸۰ میلی‌لیتر آب در سلول ۱٫۶ لیتری با دور روتور ۹۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. کف فلوتاسیون پس از جمع‌آوری با کاردک مخصوص، به همراه باطله فیلتر شده و به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه خشک‌کن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک، سپس توزین و عیارسنجی شد. آزمایش‌های لیچینگ قلیایی (سولفات آمونیم) و لیچینگ اسیدی (اسید سولفوریک، اسید کلریدریک و اسید نیتریک) با استفاده از هات پلیت آزمایشگاهی و در یک ظرف بشر ۵۰۰ میلی‌لیتری انجام شد. طی مراحل لیچینگ نمونه، ابتدا مقدار

که در آن:

n: طول هر ستون است. مقادیر ضریب همبستگی حاصل از این روش، در محدوده +1 تا -1 است. مقدار 1- نشان دهنده همبستگی کاملاً منفی و مقدار 1+ نشان دهنده همبستگی کاملاً مثبت است. مقدار صفر نشان می‌دهد هیچگونه همبستگی بین ستون‌ها وجود ندارد [6].

۳- نتایج و بحث

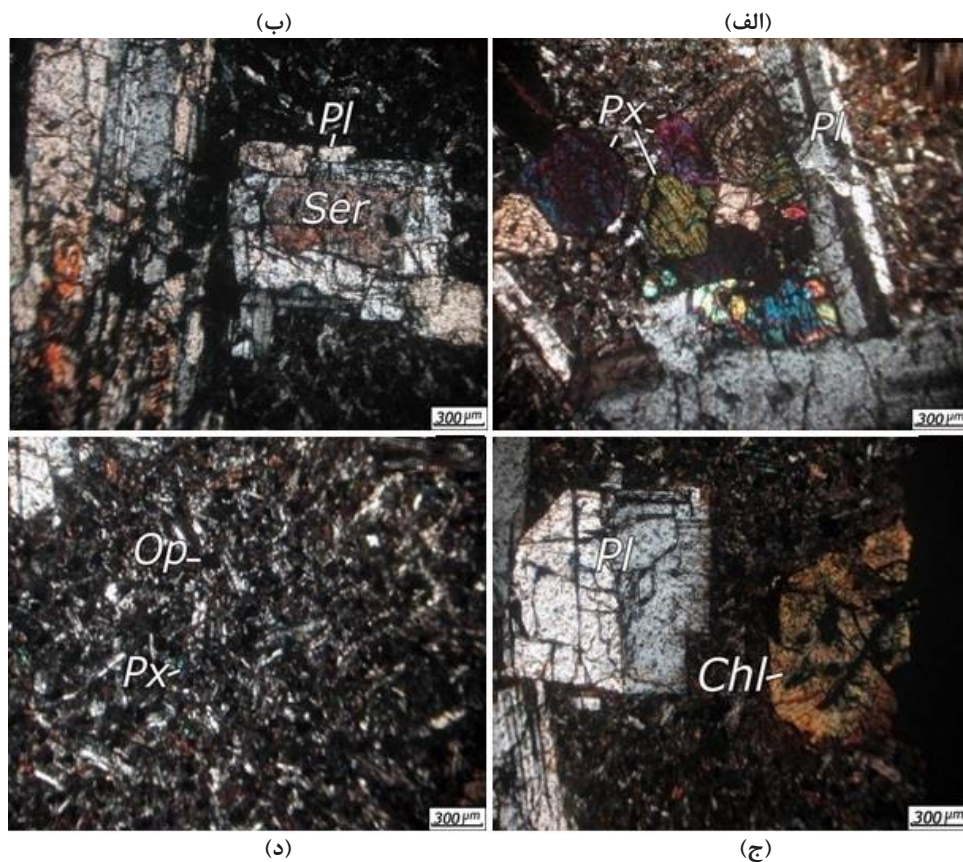
۳-۱- نتایج مطالعات اکتشافی اولیه (کانی‌شناسی نمونه‌های ترانشه) معدن سینقان

مطالعات اولیه کانی‌شناسی نمونه‌های ترانشه اکتشافی حاکی از این است که سنگ میزبان منطقه، سنگ‌های آندزیتی (آندزیت بازالتی) و توف است. حدود ۲۰-۱۵٪ حجم سنگ به صورت درشت بلور بوده که ۷۵-۷۰٪ درشت بلورها متعلق

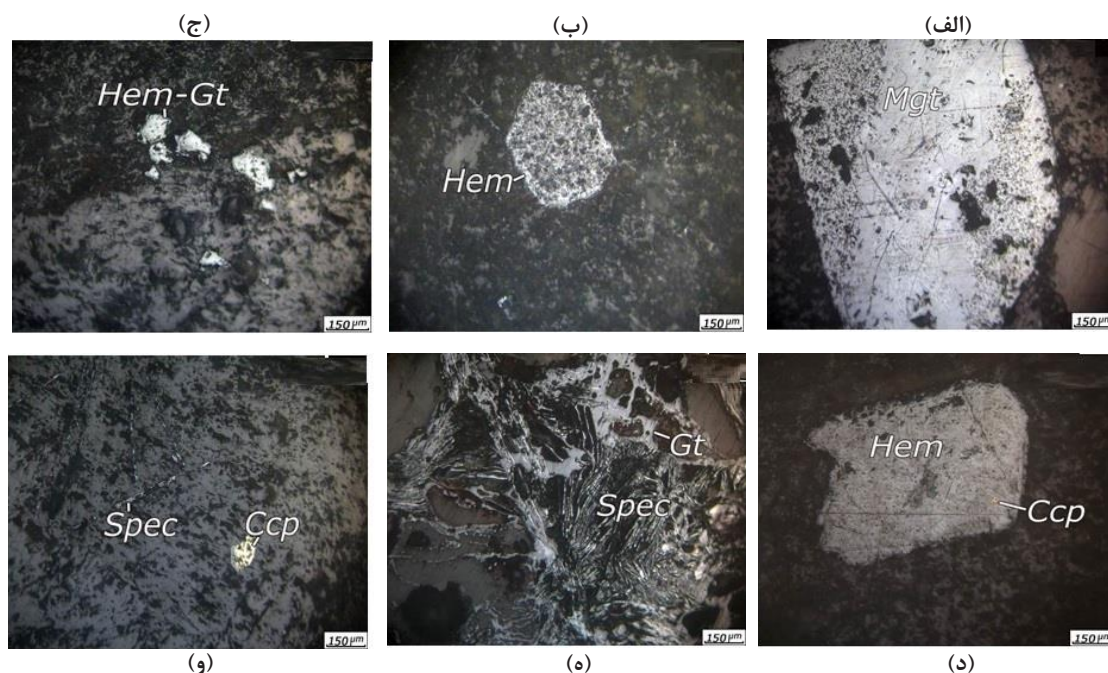
به پلاژیوکلاز، ۲۰-۱۵٪ پیروکسن و حدود ۱۰-۵٪ متعلق به هورنبلند است. کانی‌های فلزی حدود ۵-۴٪ حجم سنگ را تشکیل داده و اغلب به شکل بلورهای ریز در خمیره دیده می‌شوند.

دگرسانی سنگ نسبتاً کم بوده و شامل سرسیتی شدن پلاژیوکلاز و کلریتی شدن هورنبلند است. پیروکسن گاه با اکسیدهای آهن ثانویه جایگزین شده است. در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب، تصاویر میکروسکوپی در نور عبوری و نور انعکاسی

ارایه شده است. زون‌های آلتراسیون پروپلیتی و پتاسیک در منطقه به وضوح دیده می‌شود. زون آلتراسیون آلبیتی نیز همراه با کوارتز، کلریت، اسپیکولاریت و کالکوپیریت تشخیص داده شده است (شکل ۴) که شباهت زیادی با زون‌های آلتراسیون کانسار طلای کوه زر تربت حیدریه دارد. طبق مطالعات کریم‌پور در کمرند خواف- کاشمر- بردسکن [۲]، شواهد



شکل ۳: الف) تجمع بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن به شکل بافت گلمروپورفیری، ب) درشت بلورهای پلاژیوکلاز که از حاشیه به سرسیت تبدیل شده است، ج) درشت بلورهای پلاژیوکلاز و کلریت حاصل از هورنبلند، د) خمیره سنگ متشکل از کانی‌های اپاک، پیروکسن، پلاژیوکلاز (Pl): پلاژیوکلاز، Ser: سرسیت، Px: پیروکسن، Op: اپاک، Chl: کلریت)



شکل ۴: تنوع کانی‌های فلزی موجود در نمونه‌های ترانشه (Mgt: مگنتیت، Hem: هماتیت، Gt: گوتیت، Ccp: کالکوپیریت، Spec: اسپکیولاریت)

با یکدیگر و با عنصر توریم با ضریب همبستگی حدود ۱ نشان می‌دهند. نکته قابل توجه، همبستگی کم عناصر نادر خاکی سبک سریم، لانتانیم و نئودیمیم با عنصر نادر خاکی سنگین ایتیریم است.

قابل توجه است که ضریب همبستگی عناصر نادر خاکی سبک با فسفر غالباً منفی اما ضریب همبستگی ایتیریم با فسفر عدد ۰٫۶ است، بنابراین فرضیه همراهی تمامی عناصر نادر خاکی سبک با کانی‌های حاوی فسفر همانند آپاتیت یا مونازیت از دیدگاه همبستگی عناصر رد می‌شود.

در شکل ۵، عیار عناصر نادر خاکی سریم، لانتانیم، نئودیمیم و ایتیریم در محدوده‌های ابعادی مختلف پس از عملیات آسیاکنی برای نمونه فرآوری نشان داده شده است. مطابق شکل، رفتار کانی حاوی سه عنصر سریم، لانتانیم و نئودیمیم نسبت به کانی حاوی عنصر ایتیریم متفاوت است. این نتیجه در ماتریس همبستگی عناصر (جدول ۲) نیز به خوبی نشان داده شده است.

مطابق شکل ۶، علیرغم ضریب همبستگی مثبت عنصر آهن با عناصر نادر خاکی (۰٫۴ تا ۰٫۶)، توزیع این عناصر در محدوده‌های ابعادی روندی عکس یکدیگر دارد. مطابق آنالیز XRD نمونه معرف آزمایش‌های فرآوری، منشا عنصر آهن

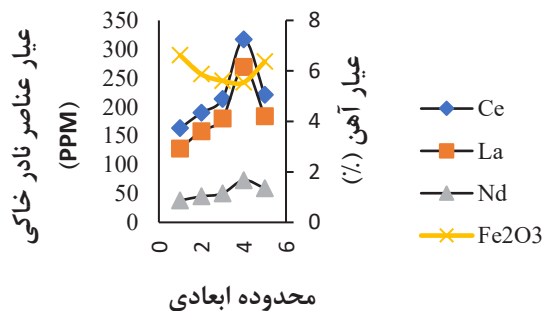
کانی‌سازی مس- طلا همراه با مگنتیت- اسپکیولاریت در نمونه‌های برداشت شده از معدن سینقان نشان می‌دهد که تیپ کانی‌سازی معدن سینقان از نوع اکسیدهای آهن- مس- طلا (IOCG) است. غالب کانی‌های آهن موجود در نمونه‌ها از نوع اسپکیولاریت و کمتر مگنتیت است که نشان‌دهنده دور بودن از سنگ منشا است. از دیگر دلایل دور بودن از سنگ منشا نیز به عیار بیشتر عناصر نادر خاکی در نمونه‌ها می‌توان اشاره کرد [۲]. البته اثبات این موضوع نیاز به مطالعات اکتشافی با جزییات بیشتری دارد.

۳-۲- بررسی همبستگی عناصر در نمونه‌های ژئوشیمیایی و ارتباط آن با آماده‌سازی نمونه فرآوری

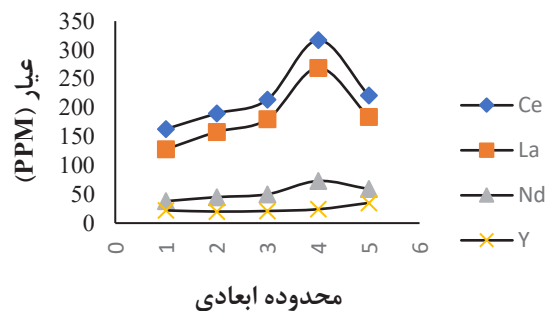
در ۲۶ نمونه ژئوشیمیایی برداشت شده از معدن سینقان که در مراحل اولیه اکتشاف است، محدوده عیار Al_2O_3 از ۵٫۹۸ تا ۱۶٫۲۴ درصد، محدوده عیار Fe_2O_3 از ۰٫۹۷ تا ۴۲٫۷۹ درصد، محدوده عیار مس از ۲۲ گرم در تن تا ۲٫۲۹ درصد و محدوده مجموع عناصر نادر خاکی از ۷۰ تا ۱۶۰۰ گرم در تن بوده است. ماتریس همبستگی عناصر برای ۲۶ نمونه ژئوشیمیایی در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق جدول ۲، عناصر نادر خاکی سبک سریم، نئودیمیم و لانتانیم بیشترین همبستگی را

جدول ۲: ماتریس همبستگی عناصر برای ۲۶ نمونه ژئوشیمیایی

	Al ₂ O ₃	As	CaO	Cd	Ce	Co	Cu	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	La	Li	MgO	Na ₂ O	Nd	S	Sc	Th	Y	Yb	P
Al ₂ O ₃	1.0	-0.5	0.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.8	0.3	-0.5	0.1	0.2	0.6	-0.4	-0.6	0.2	-0.6	0.3	-0.6	-0.2
As	-0.5	1.0	-0.3	0.6	-0.1	0.6	0.7	0.6	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.5	-0.2	0.7	0.0	-0.1	-0.4	0.4	0.0
CaO	0.1	-0.3	1.0	-0.5	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	0.3	-0.2	0.0	-0.1	0.0	-0.2	-0.2	0.2	-0.3	0.4	-0.3	0.5
Cd	-0.8	0.6	-0.5	1.0	0.6	0.6	0.6	1.0	-0.3	0.5	0.0	0.0	-0.6	0.5	0.5	0.0	0.6	-0.3	0.8	0.0
Ce	-0.6	-0.1	-0.3	0.6	1.0	0.1	0.0	0.6	-0.2	1.0	-0.1	-0.1	-0.3	1.0	-0.1	-0.1	1.0	-0.1	0.6	0.0
Co	-0.5	0.6	-0.4	0.6	0.1	1.0	0.8	0.6	-0.4	0.1	0.1	0.2	-0.4	0.1	0.7	0.0	0.1	0.0	0.6	0.2
Cu	-0.5	0.7	-0.4	0.6	0.0	0.8	1.0	0.6	-0.2	-0.1	0.1	0.1	-0.5	-0.1	0.8	0.0	0.0	-0.3	0.4	0.1
Fe ₂ O ₃	-0.8	0.6	-0.5	1.0	0.6	0.6	0.6	1.0	-0.3	0.5	0.0	0.0	-0.6	0.4	0.5	0.0	0.6	-0.4	0.8	0.0
K ₂ O	0.3	-0.2	0.3	-0.3	-0.2	-0.4	-0.2	-0.3	1.0	-0.2	0.4	0.2	-0.4	-0.2	-0.2	0.4	-0.2	0.1	-0.2	-0.1
La	-0.5	-0.2	-0.2	0.5	1.0	0.1	-0.1	0.5	-0.2	1.0	-0.1	-0.1	-0.2	1.0	-0.1	-0.2	1.0	0.0	0.6	0.0
Li	0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1	0.1	0.1	0.0	0.4	-0.1	1.0	0.8	-0.4	-0.1	0.0	0.3	-0.1	0.0	0.0	-0.2
MgO	0.2	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.2	0.1	0.0	0.2	-0.1	0.8	1.0	-0.3	-0.1	-0.1	0.5	-0.1	0.3	0.2	-0.1
Na ₂ O	0.6	-0.5	0.0	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.4	-0.2	-0.4	-0.3	1.0	-0.2	-0.5	-0.2	-0.3	0.3	-0.5	-0.1
Nd	-0.4	-0.2	-0.2	0.5	1.0	0.1	-0.1	0.4	-0.2	1.0	-0.1	-0.1	-0.2	1.0	-0.2	0.0	1.0	0.1	0.6	0.0
S	-0.6	0.7	-0.2	0.5	-0.1	0.7	0.8	0.5	-0.2	-0.1	0.0	-0.1	-0.5	-0.2	1.0	-0.1	0.0	-0.3	0.3	0.0
Sc	0.2	0.0	0.2	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.4	-0.2	0.3	0.5	-0.2	0.0	-0.1	1.0	-0.1	0.5	0.4	0.1
Th	-0.6	-0.1	-0.3	0.6	1.0	0.1	0.0	0.6	-0.2	1.0	-0.1	-0.1	-0.3	1.0	0.0	-0.1	1.0	-0.1	0.6	0.0
Y	0.3	-0.4	0.4	-0.3	-0.1	0.0	-0.3	-0.4	0.1	0.0	0.0	0.3	0.3	0.1	-0.3	0.5	-0.1	1.0	0.2	0.6
Yb	-0.6	0.4	-0.3	0.8	0.6	0.6	0.4	0.8	-0.2	0.6	0.0	0.2	-0.5	0.6	0.3	0.4	0.6	0.2	1.0	0.3
P	-0.2	0.0	0.5	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.6	0.3	1.0



شکل ۴: توزیع عناصر نادر خاکی سریم، لانتانیم و نئودیمیم و عنصر آهن در محدوده‌های ابعادی (۱: ۱۵۰+ میکرون، ۲: ۱۰۶+۱۵۰- میکرون، ۳: ۱۰۶+۷۵- میکرون، ۴: ۳۸+۷۵- میکرون و ۵: ۳۸- میکرون)



شکل ۵: توزیع عناصر نادر خاکی سریم، لانتانیم، نئودیمیم و ایتیریم در محدوده‌های ابعادی (۱: ۱۵۰+ میکرون، ۲: ۱۰۶+۱۵۰- میکرون، ۳: ۱۰۶+۷۵- میکرون، ۴: ۳۸+۷۵- میکرون و ۵: ۳۸- میکرون)

۳-۳- نتایج مطالعات فرآوری

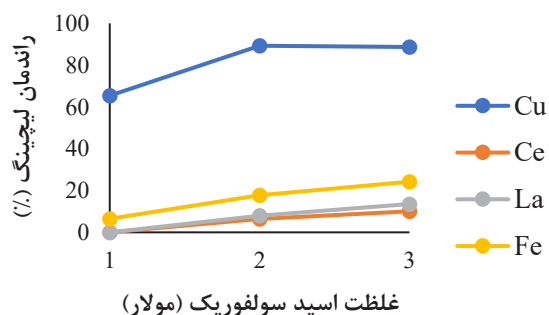
بررسی نمونه مورد مطالعه از دیدگاه فرآوری نشان داد که با توجه به کانی‌های موجود در نمونه، استحصال مس، عناصر نادر خاکی و همچنین فلدسپار باید مورد توجه قرار گیرد. در

دو کانی کلریت و هماتیت است که ممکن است هریک رفتار متفاوتی در عملیات خردایش داشته باشند. وجود عناصر نادر خاکی در شبکه کانی‌های حاوی آهن به ویژه هماتیت توسط سایر محققان نیز ادعا شده است [۷].

مولار)، pH محلول افزایش یافته و عناصر نادر خاکی حل شده رسوب می‌کنند. در ارتباط با لیچینگ مس و آهن نیز، حداکثر راندمان لیچینگ به ترتیب ۱۹ درصد و ۷ درصد بوده است. نتایج لیچینگ با سولفات آمونیم نشان داد که رخداد عناصر در نمونه مورد بررسی به صورت جذب بر روی کانی‌های رسی نیست. از سوی دیگر نیز، بررسی ضریب همبستگی عناصر نادر خاکی با آلومینیم و سدیم در نمونه‌های ژئوشیمیایی نیز موید این موضوع بوده است و ضریب همبستگی آلومینیم با عناصر سربیم و لانتانیم به ترتیب ۰/۶- و ۰/۵- به دست آمد.

۳-۱-۲- لیچینگ با اسید سولفوریک

با توجه به اینکه اسید سولفوریک اسیدی مرسوم برای لیچینگ کانی‌های مس است، رفتار لیچینگ مس، آهن و عناصر نادر خاکی سربیم و لانتانیم به وسیله اسید سولفوریک بررسی شد. در شکل ۸، اثر غلظت اسید سولفوریک در شرایط دمای محیط، زمان ۱۲۰ دقیقه، نسبت مایع به جامد ۱ به ۱ (حجمی به وزنی) نشان داده شده است. مطابق شکل ۸، افزایش غلظت اسید سولفوریک از ۱ تا ۲ مولار سبب افزایش راندمان لیچینگ مس از ۶۵ تا ۸۹ درصد شده است. حداکثر راندمان لیچینگ عناصر سربیم و لانتانیم به ترتیب ۱۰ و ۱۴ درصد بوده است که نشان می‌دهد بخشی از کانی‌های حاوی عناصر نادر خاکی ماهیت مقاوم ندارد (مانند آپاتیت). از طرفی، می‌توان بیان کرد که در ارتباط با این نمونه، امکان لیچینگ انتخابی مس نسبت به عناصر نادر خاکی وجود دارد.



شکل ۸: اثر غلظت اسید سولفوریک بر راندمان لیچینگ عناصر آهن، مس، سربیم و لانتانیم (دمای محیط، نسبت مایع به جامد ۱ به ۱ و زمان ۱۲۰ دقیقه)

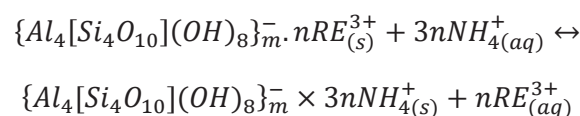
ادامه نتایج آزمایش‌های لیچینگ، پرعبارسازی مغناطیسی و فلوتاسیون مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱-۳- لیچینگ

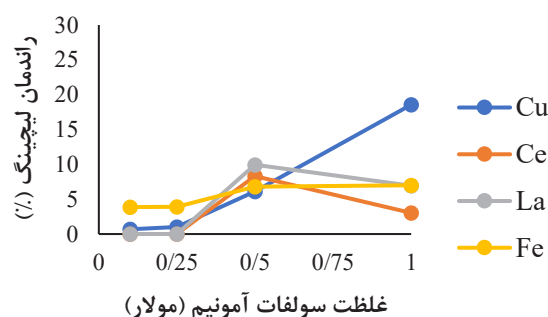
در آزمایش‌های لیچینگ، بر مبنای فرضیه‌های در نظر گرفته شده برای کانی حاوی عناصر نادر خاکی، آزمایش‌هایی در شرایط مختلف انجام شد.

۳-۱-۳-۱- لیچینگ با سولفات آمونیم

لیچینگ قلیایی با سولفات آمونیم برای شرایطی که عناصر نادر خاکی جذب سطحی کانی‌های رسی شده‌اند کاربرد دارد. در این شرایط، مطابق با واکنش زیر، عناصر نادر خاکی که به صورت سطحی جذب کانی‌های رسی شده‌اند با مکانیزم تبادل یونی با یون آمونیم وارد محلول لیچینگ می‌شوند [۹،۸].



در شکل ۷، نتایج لیچینگ با غلظت‌های مختلف سولفات آمونیم در دمای محیط، نسبت وزنی مایع به جامد ۳ به ۱ و زمان ۶۰ دقیقه ارائه شده است.



شکل ۷: اثر غلظت سولفات آمونیم بر راندمان لیچینگ عناصر آهن، مس، سربیم و لانتانیم (دمای محیط، نسبت وزنی مایع به جامد ۳ به ۱ و زمان ۶۰ دقیقه)

مطابق شکل ۷، بیشترین راندمان لیچینگ عناصر نادر خاکی سربیم و لانتانیم (۸ درصد و ۱۰ درصد به ترتیب برای سربیم و لانتانیم) در غلظت ۰/۵ مولار سولفات آمونیم بوده است. در واقع غلظت‌های کم سولفات آمونیم قدرت کافی برای لیچینگ عناصر را ندارد و در غلظت‌های بیشتر نیز (غلظت ۱

۳-۱-۳-۳- لیچینگ با اسید نیتریک و اسید کلریدریک

در لیچینگ سولفوریکی عناصر نادر خاکی و در وجود کلسیم امکان تشکیل ژپیس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) وجود دارد. در صورت تشکیل ژپیس در محلول و با توجه به مشابهت شعاع یونی عناصر نادر خاکی با کلسیم احتمال هم‌رسوبی این عناصر در شبکه ژپیس وجود دارد [۱۰]. به همین دلیل امکان لیچینگ نمونه با اسید کلریدریک و اسید نیتریک در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه (مطابق جدول ۳) بررسی شد. نتایج نشان داد که راندمان لیچینگ عناصر سربیم و لانتانیم با اسید کلریدریک به ترتیب ۲۲/۶ و ۲۳ درصد و با اسید نیتریک به ترتیب ۱۸/۶ و ۲۲/۷ درصد بوده است، بنابراین این فرضیه که تشکیل ژپیس ممکن است عامل کاهش راندمان لیچینگ عناصر نادر خاکی باشد نیز در مورد این نمونه رد می‌شود. حداکثر راندمان لیچینگ آهن و مس نیز با استفاده از اسید کلریدریک ۸۵/۴ و ۹۵ درصد و با استفاده از اسید نیتریک ۷۰/۶ و ۹۷ درصد بوده است.

۳-۱-۳-۴- لیچینگ در شرایط پخت اسیدی

در نهایت، برای تایید وجود عناصر نادر خاکی در کانی‌های مقاومی مانند مونازیت [۱۱،۷] و اسفن، آزمایش‌های پخت اسیدی انجام شد. شرایط و نتایج آزمایش‌های دما بالای اسید سولفوریک و پخت اسیدی در جدول ۴ ارائه شده است. افزایش دمای لیچینگ اسید سولفوریک ۲ مولار تا ۷۸ درجه سانتی‌گراد، سبب افزایش راندمان لیچینگ سربیم و لانتانیم تا

۲۳/۸ و ۲۵/۲ درصد شده است، اما تاثیری در راندمان لیچینگ مس نداشته است. همچنین نتایج نشان داد که از افزایش دما در لیچینگ با اسید سولفوریک می‌توان برای حذف آهن از نمونه فلدسپات استفاده کرد. مطابق جدول ۴، با انجام آزمایش پخت اسیدی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۲۰ دقیقه و سپس لیچینگ خمیر حاصل با آب به مدت ۶۰ دقیقه در دمای محیط امکان لیچینگ ۹۶ درصد سربیم و لانتانیم و کل آهن و مس وجود دارد. این نتیجه موید وجود بخش قابل توجهی از عناصر نادر خاکی در قالب کانی‌های مقاوم است.

۳-۳-۲- پرعیارسازی مغناطیسی و فلوتاسیون

هدف از انجام آزمایش فلوتاسیون، پرعیارسازی کانی‌های نادر خاکی دارای کلسیم (مانند آپاتیت و اسفن) بوده است. در آزمایش‌های فلوتاسیون در واقع باید بین یون اسیدچرب (RCOO^-) و کلسیم سطحی واکنش شیمیایی رخ دهد [۱۲]. نتایج پرعیارسازی نمونه به روش مغناطیسی و فلوتاسیون در جدول ۵ و شکل ۹ نشان داده شده است. نسبت عیار عناصر نادر خاکی سبک سربیم، لانتانیم و نئودیمیم در کنسانتره پرعیارسازی مغناطیسی بسیار نزدیک به آهن است. در حالی که عنصر نادر خاکی ایتیریم چنین رفتاری نداشته است. این روند در پرعیارسازی به روش فلوتاسیون نیز مشاهده شده است. مطابق آنالیز همبستگی عناصر در نمونه‌های ژئوشیمیایی، همبستگی کلسیم با عناصر نادر خاکی سربیم، لانتانیم و نئودیمیم در محدوده ۰/۲- تا ۰/۳- است. در آزمایش

جدول ۳: شرایط و نتایج آزمایش‌های لیچینگ با اسید کلریدریک و اسید نیتریک

راندمان لیچینگ (درصد)				دما (°C)	زمان (دقیقه)	محلول	غلظت (مولار)	عامل لیچینگ	خوراک (گرم)
Cu	Ce	La	Fe						
۹۵	۲۲/۶	۲۳	۸۵/۴	۷۰	۶۰	۱۰۰ g	۳۷%	HCL	۱۰۰
۹۷	۱۸/۶	۲۲/۷	۷۰/۶	۷۰	۶۰	۲۰۰ g	۳۲/۵%	HNO ₃	۱۰۰

جدول ۴: شرایط و نتایج آزمایش‌های لیچینگ با اسید سولفوریک در دمای بالا و پخت اسیدی

راندمان لیچینگ (درصد)				دما (°C)	زمان (دقیقه)	محلول	غلظت (مولار)	عامل لیچینگ	خوراک (گرم)
Cu	Ce	La	Fe						
۸۸	۲۳/۸	۲۵/۲	۸۰/۷	۷۸	۶۰	۲۰۰ g	۲	H ₂ SO ₄	۱۰۰
				۲۵۰	۱۲۰	۳۰ g	۹۸%	H ₂ SO ₄	۱۵
۱۰۰	۹۶	۹۶	۱۰۰/۰	محیط	۶۰	۶۰ g	-	آب	۱۵

جدول ۵: نسبت عیار کنسانتره پرعیارسازی مغناطیسی و کنسانتره فلوتاسیون به عیار خوراک

عنصر/ترکیب	Y	Th	Nd	Na ₂ O	MgO	La	Fe ₂ O ₃	Cu	Ce	CaO	Al ₂ O ₃
محصول	ppm	ppm	ppm	%	%	ppm	%	%	ppm	%	%
کنسانتره مغناطیسی	۴۸	۶۱	۱۵۶	۵٫۴۳	۴٫۳۰	۵۹۶	۱۸٫۲۴	۰٫۹۲	۶۶۸	۱٫۲۱	۱۴٫۲۷
نسبت عیار کنسانتره مغناطیسی به خوراک	۱٫۷۳	۳٫۸۴	۲٫۸۴	۰٫۷۷	۱٫۴۳	۳٫۲۰	۲٫۹۸	۱٫۳۳	۲٫۹۹	۱٫۷۶	۰٫۹۵
کنسانتره فلوتاسیون	۵۲	۴۲	۱۱۷	۶٫۷۹	۴٫۱۲	۳۵۱	۷٫۹۳	۲٫۰۲	۳۷۲	۲٫۴۰	۱۵٫۹۳
نسبت عیار کنسانتره فلوتاسیون به خوراک	۱٫۸۶	۲٫۶۵	۲٫۱۳	۰٫۹۶	۱٫۳۷	۱٫۸۹	۱٫۳۰	۲٫۹۳	۱٫۶۷	۳٫۵۰	۱٫۰۶
خوراک	۲۸	۱۶	۵۵	۷٫۰۷	۳٫۰۰	۱۸۶	۶٫۱۲	۰٫۶۹	۲۲۳	۰٫۶۹	۱۵٫۰۶

نشان داد بر خلاف سایر ذخایر موجود در کشور که معمولاً همراه با فسفر هستند، عناصر نادر خاکی در معدن سینقان همبستگی مثبت معناداری با عنصر فسفر ندارد. نتایج لیچینگ با سولفات آمونیم نشان داد که رخداد عناصر نادر خاکی در نمونه به صورت جذب بر روی کانی‌های رسی نیست و بررسی ضریب همبستگی رخداد عناصر نادر خاکی با آلومینیم و سدیم در نمونه‌های ژئوشیمیایی نیز موید این موضوع بوده است. نتایج لیچینگ با H₂SO₄ نشان داد که امکان لیچینگ انتخابی مس نسبت به عناصر نادر خاکی وجود دارد. راندمان لیچینگ ۹۶ درصد سریم و لانتانیم در شرایط پخت اسیدی نشان داد که بخش قابل توجهی از عناصر نادر خاکی در قالب کانی‌های مقاوم است. نسبت عیار عناصر نادر خاکی در کنسانتره مغناطیسی نزدیک به آهن است. مطابق آنالیز همبستگی عناصر در نمونه‌های ژئوشیمیایی، همبستگی کلسیم با REE در محدوده ۰٫۲- تا ۰٫۳- است. در آزمایش فلوتاسیون نیز علیرغم اینکه کلسیم ۳٫۵ برابر در کنسانتره افزایش عیار داده است، این افزایش برای عناصر نادر خاکی کمتر بوده است.

۵- سپاس‌گزاری

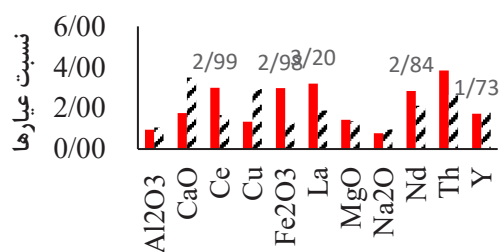
نویسندگان مقاله بدینوسیله از حمایت‌های مالی و همچنین تدارک امکانات توسط شرکت آریا تجارت پارس توکل در قالب طرح فرصت مطالعاتی اعضای هیات علمی در جامعه و صنعت سپاسگزاری می‌نمایند.

۶- مراجع

[1] Krishnamurthy, N., and Gupta, C. K. (2015). "Extractive metallurgy of rare earths". CRC press, pp. 540.

[۲] کریم پور، م. ح.؛ ۱۳۸۴؛ "کانی‌سازی مس-طلا همراه با مگنتیت-

فلوتاسیون / مغناطیسی



شکل ۹: نسبت عیار کنسانتره پرعیارسازی مغناطیسی و کنسانتره فلوتاسیون به عیار خوراک

فلوتاسیون نیز علیرغم اینکه کلسیم ۳٫۵ برابر در کنسانتره افزایش عیار داده است، این افزایش برای عناصر نادر خاکی کمتر بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

در ۲۶ نمونه ژئوشیمیایی برداشت شده از معدن سینقان که در مراحل اولیه اکتشاف است، محدوده Al₂O₃ از ۵٫۹۸ تا ۱۶٫۲۴ درصد، Fe₂O₃ از ۰٫۹۷ تا ۴۲٫۷۹ درصد، مس ۲۲ تا ۷۰ درصد و مجموع عناصر نادر خاکی ۷۰ تا ۱۶۰۰ گرم در تن بوده است. نمونه کم‌عیار معدن نیز که برای آزمایش‌های فرآوری انتخاب شد، حاوی ۶۳٫۶۲ درصد SiO₂، ۶٫۱۲ درصد Fe₂O₃، ۱۵٫۰۶ درصد Al₂O₃، ۰٫۶۹ درصد مس و ۲۲۳، ۱۸۶ و ۵۵ گرم در تن سریم، لانتانیم و نفودیمیم بوده است. نمونه مورد فرآوری پس از آماده‌سازی با استفاده از آزمایش‌های پرعیارسازی مغناطیسی، فلوتاسیون و لیچینگ فرآوری شد.

بررسی همبستگی غلظت عناصر در نمونه‌های ژئوشیمیایی

- and Kexian, O. (2010). "Kinetics on leaching rare earth from the weathered crust elution-deposited rare earth ores with ammonium sulfate solution". Hydrometallurgy, 101(3-4): 166-170.
- [9] Moldoveanu, G. A., and Papangelakis, V. G. (2013). "Recovery of rare earth elements adsorbed on clay minerals: II. Leaching with ammonium sulfate". Hydrometallurgy, 131: 158-166.
- [10] Soltani, F., Abdollahy, M., koleini, S. M. J., and Moradkhani, D. (2017). "Selection of an appropriate leaching method for light REEs from Esfordi flotation concentrate based on mineral characterization". Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 117(5): 443-450.
- [11] Soltani, F., Abdollahy, M., Petersen, J., Ram, R., Becker, M., koleini, S. M. J., and Moradkhani, D. (2019). "Leaching and recovery of phosphate and rare earth elements from an iron-rich fluorapatite concentrate: Part II: Selective leaching of calcium and phosphate and acid baking of the residue". Hydrometallurgy, 184(1): 29-38.
- [۱۲] فورستینو، م.، میلر، ج.، کان، م.؛ ۱۳۶۴؛ "شیمی فلوتاسیون". ترجمه: عبداللهی، م. (۱۳۹۱)، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۸۴ صفحه.
- اسپکیولاریت (IOCG) و مثال هایی از ایران". همایش انجمن زمین شناسی ایران.
- [3] Skirrow, R. G. (2022). "Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits—A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification". Ore Geology Reviews, 140: 1-36.
- [4] Barton, M. (2013). "Iron oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) systems, in Geochemistry of mineral deposits". Elsevier Inc., 515-541.
- [5] Corriveau, L. (2007). "district metallogeny, the evolution of geological provinces, and S.p.n. exploration methods, Iron oxide copper-gold ($\pm Ag \pm Nb \pm P \pm REE \pm U$) deposits: a Canadian perspective". Special Publication, 5: 307-328.
- [6] Hollander, M., Wolfe., D. A., and Chicken, E. (2013). "Nonparametric statistical methods". John Wiley & Sons, pp. 751.
- [7] Soltani, F., Abdollahy, M., Petersen, J., Ram, R., Becker, M., koleini, S. M. J., and Moradkhani, D. (2018). "Leaching and recovery of phosphate and rare earth elements from an iron-rich fluorapatite concentrate: Part I: direct baking of the concentrate". Hydrometallurgy, 177(1): 66-78.
- [8] Jun, T., Jingqun, Y., Ruan, C., Guohua, R., Mintao, J.,