



Imam Khomeini International University

Vol. 7, No. 4, Winter 2022



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering  
(JMRE)

## Research Paper

# Recovery of Rare Earth Elements from the Tailings Dam of Chador Melo Iron Ore Processing Plant

Seyed Alizadeh Ganji S.M.<sup>1\*</sup>, Hayati M.<sup>1</sup>

1- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Received: 20 Feb. 2021

Accepted: 12 Oct. 2021

**Abstract:** The tailings dam of the Chadormelo iron ore processing plant has rare earth elements and its identification operation was carried out in the first step. The results showed that the tailings dam is composed of major minerals such as hematite, quartz, fluorapatite, calcite, goethite, and dolomite so that about 84.75% by weight of this sample is iron oxides with 41.52% by weight, calcium and magnesium oxides with 17.74% by weight, quartz with 20.2% by weight, and aluminum oxides with 5.29% by weight respectively. The total grade of rare elements in the sample is 1068.57 ppm, of which 84.61% by weight are light rare elements and 15.39% by weight are heavy rare elements. The d80 of the sample is 46.35 microns. SEM studies showed that the minerals monazite, xenotime, and apatite in this sample contain rare elements and the monazite mineral is dispersed in the amount of iron and apatite in a few microns. The wet magnetic separation method was used as a pre-concentration method for iron removal and pre-concentration of rare elements, which due to the high grade of rare elements in the magnetic product (802 ppm) as a pre-concentration method for rare elements before the leaching operation Not used.

**Keywords:** Iron Ore tailings dam, Chadormelo, Rare element recovery, Monazite, Apatite.

### How to cite this article

Seyed Alizadeh Ganji, S. M., and Hayati, M. (2022). "Recovery of rare earth elements from the tailings dam of Chador Melo iron ore processing plant". Journal of Mineral Resources Engineering, 7(4): 123-140.

DOI: [10.30479/JMRE.2021.15103.1493](https://doi.org/10.30479/JMRE.2021.15103.1493)

\*Corresponding Author Email: [ganji.m@lu.ac.ir](mailto:ganji.m@lu.ac.ir)

### COPYRIGHTS



©2022 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

The diverse optical, magnetic, electrical, catalytic, chemical, metallurgical, and nucleus properties of rare elements have led to new technologies such as LCDs, permanent magnets, home batteries, and mobile rechargeable batteries have application. [1-3]. There are about 200 minerals of rare elements, among which, monazite (Ce, La) PO<sub>4</sub>, xenotim (YPO<sub>4</sub>) are economic minerals [3,4]. There are a variety of processing methods for preconcentration rare elements. After extraction and crushing, the ore is preconcentrated by methods such as flotation, magnetic separation, or gravity to obtain concentrates of rare elements. Then, to recover the compounds of rare elements, the obtained concentrate is subjected to leaching with hydrochloric, nitric, or sulfuric acid [5,6]. The choice of each of the sulfuric, nitric, and hydrochloric acids as a leaching agent depends on the selected properties in the separation of rare elements, the type of gänge minerals in the ore and the type of organic solvents used in the extraction step. [7,8]. After leaching, by methods such as extraction with organic solvent [9], ion exchange [10] and precipitation [11], the operations of enrichment and purification of rare elements are performed, and finally, after purification, rare elements in solution are recovered as carbonate, sulfide and hydroxide deposits [12]. Iran is one of the importers of rare elements. For this reason, sampling was done from the waste dam of Chadormelo iron ore ores factory, which contains rare elements, and to determine the appropriate method of ores, pre-processing and extraction of its rare elements, identification was performed in the first step.

## IDENTIFICATION STUDIES

### Sampling

From the tailings dam of Chadormelo iron ore processing factory with dimensions of approximately 200 meters by 300 meters, ten separate points with a distance of approximately 50 meters from each other, using a mechanical excavator, a well with a depth of approximately 5 meters and a diameter of approximately 2 meters was dug at each point. And from different parts of the excavated materials, 5 sub-samples and a total of 50 sub-samples with a total weight of 1327 kg were sampled at each point. After drying and passing the samples at each point through a 500 micron sieve, homogenization and sample division were performed.

### Materials and methods

ASTM model sieves have been used for more sieve analysis. Aligent 7900 ICP-MS was used to analyze the rare elements. Magix pro (Pw 2440) XRF device was used to identify the oxide composition of the constituent elements of the materials in the tailings dam.

### ICP-Mass analysis

The results of analyzes performed on ten samples separately and combined samples showed that the difference in the grade of rare elements in the samples taken from different parts of the tailings dam with the combined sample is very small, so instead of interpreting on separate samples, experiments and interpretations have been performed on composite samples prepared from a mixture of 10 separate samples. Figures 1 and 2 show the average grade of light and heavy rare elements in terms of ppm in the composite sample, respectively.

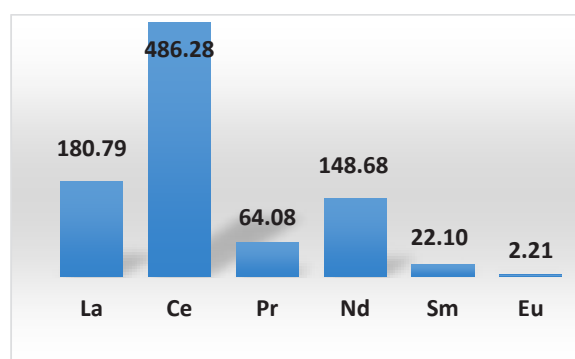


Figure 1. Average grade of rare light elements in terms of ppm in the composite sample

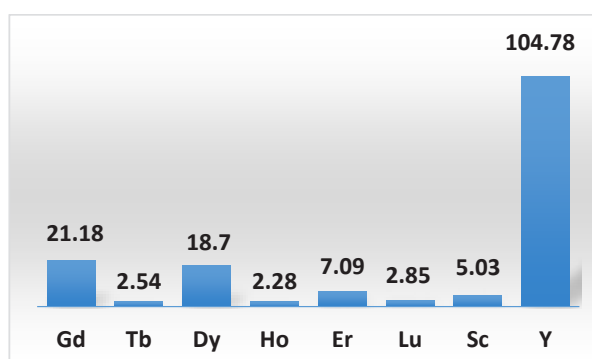


Figure 2. Average grade of rare heavy elements in terms of ppm in the composite sample

### XRF analysis

XRF results showed that about 84.75% by weight of the total sample were iron oxide minerals (hematite and goethite minerals) with 41.52 wt%, calcium and magnesium oxides (calcite and dolomite minerals) with 17.74 wt% and quartz with 20.2% by weight, and aluminum oxides with 5.29% by weight.

### Sieve analysis

Sieves of 106, 90, 75, 63, 53, 45 and 38 microns were used for sieve analysis. d80 The representative sample is 46.35 microns.

### XRD analysis

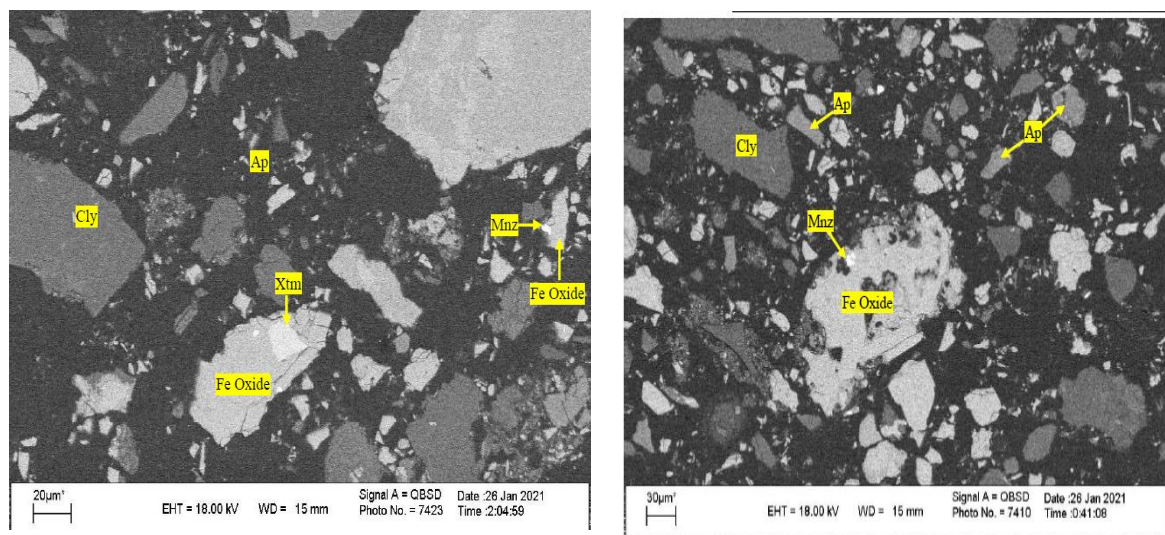
The results of XRD analysis on the sample show that the tailings dam is composed of major minerals such as hematite, quartz, fluorapatite, calcite, goethite, and dolomite, respectively

### SEM study

The results showed that the monazite and apatite minerals in the sample contained rare elements. Monazite mineral is a few microns more scattered in apatite mineral. The involvement of monazite with iron oxides is also observed in many parts of the samples. In some areas, monazite is also found to be involved with carbonate minerals such as calcite and dolomite. Xenotime (yttrium-bearing mineral) is also seen to a lesser extent in the sample, which is involved with monazite and apatite.

## INVESTIGATION OF UPGRADING OF RARE ELEMENTS BY WET MAGNETIC SEPARATION METHOD (HIGH INTENSITY)

A high-intensity magnetic separation operation (17,000 gauss) was performed on the feed. A magnetic separation operation was performed on the magnetic product with an intensity of 12,000 gauss to separate the ferromagnetic material from the diamagnet. It carries the weight of rare elements and this part in terms of weight constitutes 35.48% of the total weight of the input load with 802 ppm. Lack of sufficient degree of freedom and the involvement of minerals containing rare elements such as monazite, apatite, and xenotime with iron oxide minerals, the results of SEM studies in Figure 3 also confirm the involvement of these minerals with iron oxides.



**Figure 3.** Involvement of monazite, apatite, and xenotime with iron oxides in the magnetic separation product

## CONCLUSION

The sample taken from the tailings dam of the Chadormelo iron ore processing plant contains rare elements and to preconcentration and select a suitable method for recovering the rare element, it is necessary to identify the studied sample. The results of these studies are summarized as follows:

Hematite, quartz, fluorapatite, calcite, goethite, and dolomite are the main constituent minerals,

respectively, and about 84.75% by weight of the total sample are iron oxides (hematite and goethite minerals) with 41.52 wt%, respectively. Calcium and magnesium oxides (calcite and dolomite minerals) with 17.74 wt%, quartz with 20.2 wt%, and aluminum oxides with 5.29 wt%. The average grade of iron in the sample is about 28.51% and the grade of iron increases from 19.24 to 30.31% by decreasing the grain size from 110 microns to less than 45 microns, respectively. The results of SEM studies have shown that the minerals monazite, xenotime, and apatite in this sample contain rare elements. Monazite mineral is observed in a few microns more scattered in apatite mineral. However, monazite interactions with iron oxides can also be seen in many parts of the sample. In some areas, monazite is also found to be involved with carbonate minerals such as calcite and dolomite. 53.5, 19.99, and 16.44 percent of the total weight of rare light elements. Of the heavy elements, the elements yttrium, gadolinium and dysprosium have the highest grade and make up about 63.71, 12.88, and 11.37% by weight of all rare heavy elements, respectively. The total average grade of light and heavy rare elements is about 904.12 and 164.45 ppm, respectively, and the total average grade of all rare elements in this sample is about 1068.57 ppm, of which 84.61 its weight percentage consists of rare light elements and 15.39% of its weight consists of rare heavy elements. The results of sieve analysis also show that the  $d_{80}$  of the studied sample without crushing with only the initial preparation is equal to 46.35 microns. Due to the high percentage of iron in the test sample, high-intensity magnetic separation method was performed to remove iron and preconcentration rare elements. Due to the interaction of rare element minerals with iron oxides, the isolated magnetic product contained 802 ppm of rare elements. It shows that the magnetic separation method has not performed well in the field of preconcentration and the direct acid leaching method with nitric and hydrochloric acids is recommended to recover rare elements.

## REFERENCES

- [1] Haxel, G. B., Hedrick, J. B., and Orris, J. J. (2002). "Rare earth elements critical resources for high technology". USGS Facts Sheet 087-02.
- [2] Jorjani, E., Bagherieh, A. H., and Rezai, B. (2007). "Determination of rare earth elements in products of Chadormalu Iron ore beneficiation plant (Iran) from beneficiation point of view". Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, Jahad Daneshgahi, 26(4): pp. 11.
- [3] Jia, Q., and Tong, Sh. (2009). "Solvent extraction of rare earth elements with mixtures of sec-octylphenoxy acetic acid and bis(2,4,4-trimethylpentyl) dithiophosphinic acid". Separation and Purification Technology, 64: 345-350.
- [4] Kanazawa, Y., and Kamitani, M. (2006). "Rare earth minerals and resources in the world". Journal of Alloys and Compounds, 408-412: 1339-134.
- [5] Gupta, C. K., and Krishnamurthy, N. (2005). "Extractive metallurgy of rare earths". CRC press, Boca Raton London New York Washington DC, pp. 159.
- [6] Xie, F., Zhang, T. A., Dreisinger, D., and Doyle, F. (2014). "A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous Solutions". Minerals Engineering, 56: 10-28.
- [7] Ritcey, G. M., and Ashbrook, A. W. (1979). "Solvent extraction: principles and applications to process metallurgy". Part-II. Elsevier, Amsterdam, 386-420.
- [8] Abdulkarim, Y., Abdullah, O., and Ismail, G. (2003). "Effect of thiourea on sulphuric acid leaching of bastnaesite". Hydrometallurgy, 68: 195-202.
- [9] Das, S., Behera, S. S., Murmu, B. M., Mohapatra, R. K., Mandal, D., Samantray, R., Parhi, P. K., and Senanayake, G. (2018). "Extraction of scandium (III) from acidic solutions using organo-phosphoric acid reagents: a comparative study". Separation and Purification Technology, 202: 248-258.
- [10] Lopez, J., Reig, M., Gibert, O., and Cortina, J. L. (2019). "Integration of nanofiltration membranes in recovery options of rare earth elements from acidic mine waters". Journal of Cleaner Production, 210: 1249-1260.
- [11] Li, F., Wang, Y., Su, X., and Sun, X. (2019). "Towards zero-consumption of acid and alkali recycling rare earths from scraps: a precipitation-stripping-saponification extraction strategy using CYANEX®572". Journal of Cleaner Production, 228: 692-702.

- [12] Jyothi, R. K., Thenepalli, T., Ahn, J. W., Parhi, P. K., Chung, K. W., and Lee, J.-Y. (2020). "Review of rare earth elements recovery from secondary resources for clean energy technologies: Grand opportunities to create wealth from waste". *Journal of Cleaner Production*, 267: 122048.



## بازیابی عناصر نادر خاکی از سد باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن چادر ملو

سیدمحمد سیدعلیزاده گنجی<sup>۱\*</sup>، محمد حیاتی<sup>۱</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه لرستان، خرم آباد

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۰

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲

### چکیده

سد باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن چادرملو عناصر نادر خاکی دارد و برای تعیین روش مناسب برای بازیابی عناصر نادر موجود در آن به شناسایی کانی‌های حاوی عناصر نادر، کانی‌های همراه، نحوه درگیری این کانی‌ها با همدیگر، عیار عناصر نادر، توزیع ابعادی و نظایر آن نیاز است. به همین منظور شناسایی کاملی از نمونه انجام گرفت. نتایج این مطالعات نشان داد که سد باطله از کانی‌های اصلی مانند هماتیت، کوارتز، فلوروآپاتیت، کلسیت، گوتیت و دولومیت تشکیل شده است، به طوری که حدود ۸۴/۷۵ درصد وزنی از کل این نمونه را به ترتیب اکسیدهای آهن با ۴۱/۵۲ درصد وزنی، اکسیدهای کلسیم و منیزیم با ۱۷/۷۴ درصد وزنی، کوارتز با ۲۰/۲ درصد وزنی و اکسیدهای آلومینیم با ۵/۲۹ درصد وزنی تشکیل داده است. عیار کل عناصر نادر در نمونه ۱۰۶۸/۵۷ پی‌پی‌ام است که از این مقدار ۸۴/۶۱ درصد وزنی آن را عناصر نادر سبک و ۱۵/۳۹ درصد وزنی آن را عناصر نادر سنگین تشکیل می‌دهد.  $d_{80}$  نمونه مورد مطالعه برابر ۴۶/۳۵ میکرون است. مطالعات SEM نشان داد که کانی‌های مونازیت، زنونیم و آپاتیت در این نمونه حاوی عناصر نادر هستند و کانی مونازیت در حد چند میکرون به صورت ادخال در کانی‌های آهن و آپاتیت پراکنده شده است. روش جدایش مغناطیسی تر به عنوان یک روش پرعبارسازی برای حذف آهن و پرعبارسازی عناصر نادر استفاده شد که به دلیل بالا بودن عیار عناصر نادر در محصول مغناطیسی (۸۰۲ پی‌پی‌ام) به عنوان یک روش پرعبارسازی برای عناصر نادر قبل از عملیات لیچینگ مورد استفاده قرار نگرفت.

### کلمات کلیدی

سد باطله سنگ آهن، چادرملو، بازیابی عناصر نادر، مونازیت، آپاتیت.

### استناد به این مقاله

سیدعلیزاده گنجی، س. م.، حیاتی، م.؛ ۱۴۰۱؛ "بازیابی عناصر نادر خاکی از سد باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن چادر ملو". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۴، ص ۱۴۰-۱۲۳.

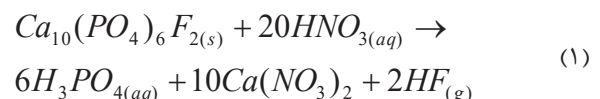
DOI: 10.30479/JMRE.2021.15103.1493



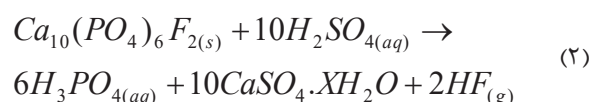


## ۱- مقدمه

خواص متنوع اپتیکی، مغناطیسی، الکتریکی، کاتالیستی، شیمیایی، متالورژیکی و هسته‌ای عناصر نادر باعث کاربرد آنها در تکنولوژی‌های جدید، ساخت سنگ آتش‌زنه فندک‌ها، تابنده‌ها (لامپ‌های فلورسنت)، صفحه نمایش (LCD)، لوح فشرده (CD)، آهنرباهای دائمی، باتری‌های خانگی و باتری‌های قابل شارژ تلفن همراه، سوپر هادی دمای بالا و سوپر آلیاژهای مورد استفاده در صنعت هوا و فضا و نظایر آن شده است. با توجه به موارد بالا تقاضای روز افزون این فلز در صنایع مختلف دنیا موجب افزایش قیمت این عناصر در سال‌های اخیر شده است، به طوری که روش‌های تولید عناصر نادر با خلوص بالا جاذبه خاصی پیدا کرده و قیمت آن‌ها با افزایش درصد خلوص به طور تصاعدی افزایش یافته است [۳-۱]. حدود ۲۰۰ کانی از عناصر نادر به صورت هالیدها، کربنات‌ها، فسفات‌ها، سیلیکات‌ها و نظایر آن وجود دارند که در بین آنها بستنیت  $(Ce,La)(CO_3)F$ ، مونازیت  $(Ce,La)PO_4$ ، زنونیم  $(YPO_4)$  سه کانی اقتصادی هستند که حاوی مقدار قابل توجهی از عناصر نادر است [۳،۴]. روش‌های فرآوری متنوعی برای بازیابی عناصر نادر وجود دارند. بعد از استخراج و خردایش، کانه به وسیله روش‌هایی مانند فلوتاسیون، جدایش مغناطیسی یا ثقلی پرعبارسازی می‌شود تا کنسانتره‌های از عناصر نادر به دست آید، سپس برای بازیابی ترکیبات عناصر نادر، کنسانتره به دست آمده تحت فرآیند لیچینگ با اسید کلریدریک، نیتریک یا سولفوریک قرار می‌گیرد [۵،۶]. در فرآیند لیچینگ آپاتیت با اسید سولفوریک، بیشتر عناصر نادر در پسماند جامد (ژیپس) متمرکز می‌شوند و برای بازیابی آن باید از اسید نیتریک استفاده شود. با وجود گرانی اسید نیتریک در مقایسه با اسید سولفوریک، مشکلات مربوط به تولید ژپس، مصرف اسید سولفوریک را محدود می‌کند [۲،۷]. مهم‌ترین واکنش شیمیایی آپاتیت هنگام لیچینگ با اسید نیتریک به صورت رابطه ۱ است [۸].



مهم‌ترین واکنش شیمیایی وقتی که با اسید سولفوریک لیچینگ می‌شود به صورت رابطه ۲ است [۹].



لیچینگ مونازیت بیشتر با هیدروکسید سدیم در دما و فشار بالا طبق رابطه ۳ انجام می‌گیرد [۱۰].



انتخاب هر یک از اسیدهای سولفوریک، نیتریک و کلریدریک به عنوان یک عامل لیچینگ<sup>۲</sup> (فروشویی) به خواص انتخابی در جدایش عناصر نادر، نوع کانی‌های گانگ در کانه و نوع حلال‌های آلی که در مرحله استخراج استفاده می‌شوند، بستگی دارد [۱۱، ۱۲]. بعد از انجام عملیات لیچینگ به وسیله روش‌هایی مانند استخراج با حلال آلی [۱۳]، تعویض یونی [۱۴] و ترسیب [۱۵] عملیات تغلیظ و تخلیص عناصر نادر انجام می‌گیرد و در نهایت بعد از عملیات خالص‌سازی، عناصر نادر موجود در محلول به صورت رسوبات کربناته، سولفیدی و هیدروکسیدی بازیابی می‌شوند [۱۶]. اگرچه وجود آنومالی‌های متعدد در ایران مانند سنگ آهن چادرملو برای این عناصر به اثبات رسیده است، اما ایران یکی از کشورهای وارد کننده عناصر نادر است. به همین دلیل از سد باطله کارخانه کانه‌آرایی سنگ آهن چادرملو نمونه‌گیری به عمل آمد که حاوی عناصر نادر است و برای تعیین روش مناسب کانه‌آرایی، پیش‌فرآوری و استحصال عناصر نادر در گام نخست شناسایی فازهای موجود در نمونه شامل کانی هدف و باطله، عیار، نحوه پراکندگی و توزیع عناصر نادر در بخش‌های مختلف دانه‌بندی، تعیین بافت، ساخت و درجه آزادی نیاز است. اگرچه شناسایی نمونه کاری پرهزینه است، اما با توجه به اهمیت کار سعی شده است شناسایی کامل نمونه سد باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن چادرملو با استفاده از مطالعه XRD، XRF، SEM، آزمون تجزیه سردی، آنالیز شیمیایی و ICP-MS، به طور دقیق بررسی و در نهایت روش‌های پیش‌فرآوری ثقلی و مغناطیسی ارزیابی شود.

## ۲- مطالعات شناسایی نمونه معرف

## ۲-۱- نمونه‌برداری از سد باطله و همگن‌سازی

برای نمونه‌گیری صحیح از سد باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن چادرملو با ابعاد تقریبی ۲۰۰ متر در ۳۰۰ متر، ابتدا یک شبکه فرضی نمونه‌برداری طراحی و بر اساس آن ده نقطه مجزا با فاصله تقریبی ۵۰ متر از هم، برای نمونه‌برداری در نظر گرفته شده است، به طوری که با استفاده از بیل مکانیکی در هر نقطه یک چاهک با عمق تقریباً ۵ متر و قطر تقریباً ۲ متر

دستگاه ICP-MS مدل Aligent 7900 استفاده گردید. برای شناسایی ترکیب اکسیدی عناصر تشکیل دهنده مواد موجود در سد باطله از دستگاه XRF مدل Magix pro(Pw 2440) استفاده شده است. دستگاه جدایش مغناطیسی تر شدت بالای مورد استفاده از نوع ماتریکس گلوله‌ای است. در قسمت شناسایی نمونه از مواد شیمیایی خاصی استفاده نشده است.

### ۲-۳- آنالیز ICP-Mass

نتایج آنالیزهای به دست آمده از نمونه‌های مجزا و نمونه ترکیبی به روش ICP-Mass در جدول ۱ آمده است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب عیار عناصر نادر سبک و سنگین در نقاط مختلف نمونه برداری از سد باطله را نشان می‌دهد.

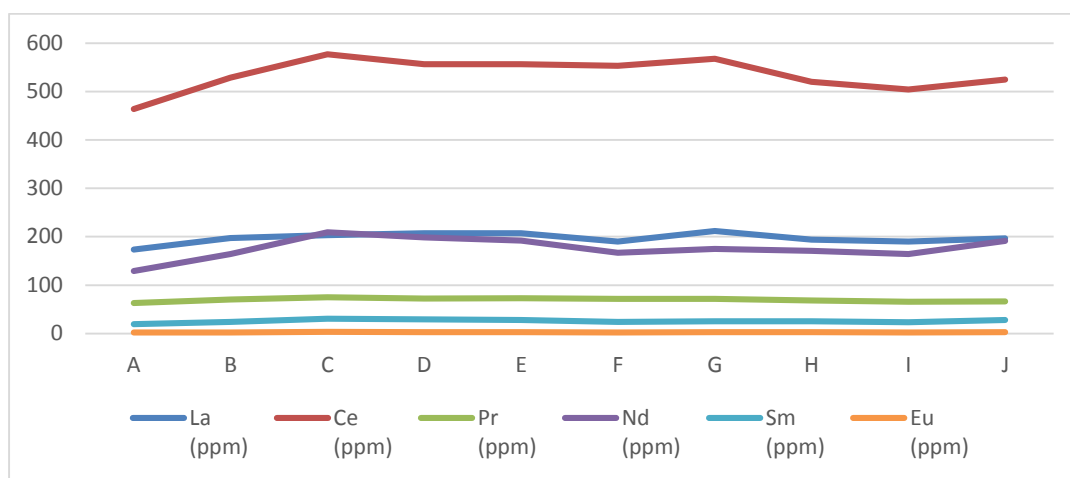
### ۲-۴- آنالیز XRF

آنالیز XRF برای شناسایی ترکیبات تشکیل دهنده نمونه سد باطله انجام گرفت. با توجه به نتایج XRF در جدول ۲ می‌توان این نتایج را گرفت که حدود ۸۴٫۷۵ درصد وزنی از کل نمونه را به ترتیب کانی‌های اکسیدهای آهن (کانی‌های هماتیت و گوتیت) با ۴۱٫۵۲ درصد وزنی، اکسیدهای کلسیم و منیزیم (کانی‌های کلسیت و دولومیت) با ۱۷٫۷۴ درصد وزنی و کوارتز با ۲۰٫۲ درصد وزنی و اکسیدهای آلومینیم با ۵٫۲۹ درصد وزنی تشکیل داده است. افت حرارتی ۸٫۲۱ درصد وزنی، بیشتر مربوط به کانی‌های کربناته (کلسیت و دولومیت) است که با تصاعد گاز دی‌اکسید کربن در اثر حرارت به وجود می‌آید.

حفر شده و به این ترتیب از قسمت‌های مختلف مواد حفاری شده در هر نقطه ۵ زیرنمونه و در مجموع ۵۰ زیرنمونه به وزن کل ۱۳۲۷ کیلوگرم نمونه‌گیری به عمل آمد. برای همگن‌سازی اولیه، هر یک از این ده نمونه مجزا، جداگانه از سرنده ۵۰۰ میکرون عبور داده شدند و ابعاد بزرگتر از ۵۰۰ میکرون برای باز شدن ذرات از همدیگر از سنگ‌شکن فکی عبور داده شدند تا کل این ۱۰ نمونه بعد از خشک کردن در خشک‌کن از سرنده ۵۰۰ میکرون عبور داده شوند. از تقسیم‌کن شانه‌ای برای همگن‌سازی و تقسیم اولیه نمونه‌ها استفاده و بخش یک دوم مرحله اولیه و یک دوم مرحله دوم هر یک از نمونه‌ها به عنوان نمونه شاهد بایگانی شد. بخش یک دوم برجای مانده مرحله دوم طی تقسیمات متوالی به جزء نمونه‌های دو کیلویی تقسیم و از این جزء نمونه‌های به دست آمده از ده نمونه مختلف، نمونه‌هایی برای آنالیزهای شیمیایی، XRF و ICP-Mass ارسال شد. همچنین وزن یکسانی در حد دو کیلوگرم از هر یک از این ده نمونه مجزا موجود برداشته و با هم مخلوط و به عنوان یک نمونه ترکیبی بعد از مخلوط کردن و همگن‌سازی، نمونه‌ای نیز برای آنالیزهای شیمیایی، XRF و ICP-Mass ارسال شد.

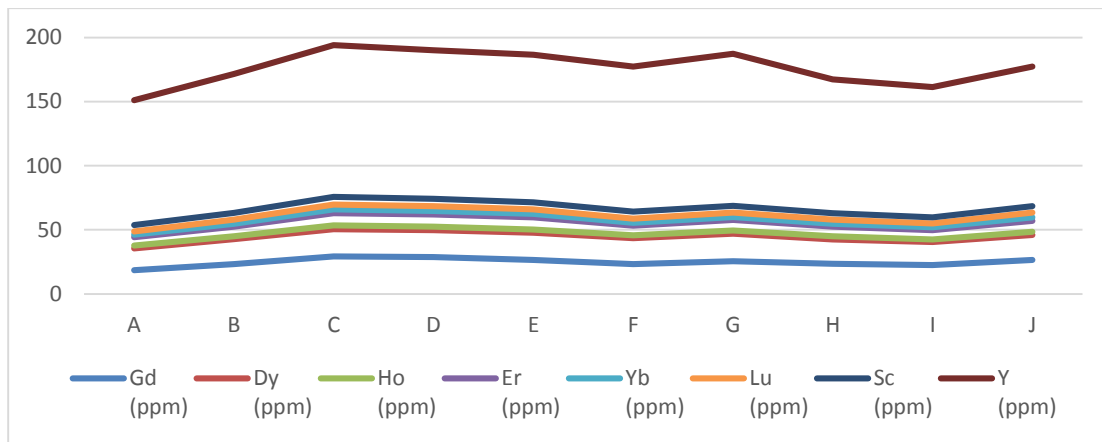
### ۲-۲- مواد و روش

برای شناسایی نمونه از نمونه ترکیبی به دست آمده از مخلوط و همگن‌سازی نقاط مختلف نمونه برداری شده از سد باطله معدن چادرملو و از سرندهای مدل ASTM برای تجزیه سرندهی تر استفاده شده است. برای آنالیز عناصر نادر از



شکل ۱: عیار عناصر نادر سبک در ده نقطه مختلف نمونه برداری از سد باطله





شکل ۲: عیار عناصر نادر سنگین در ده نقطه مختلف نمونه برداری از سد باطله

جدول ۱: نتایج آنالیز ICP-Mass نمونه‌های مجزا و نمونه ترکیبی

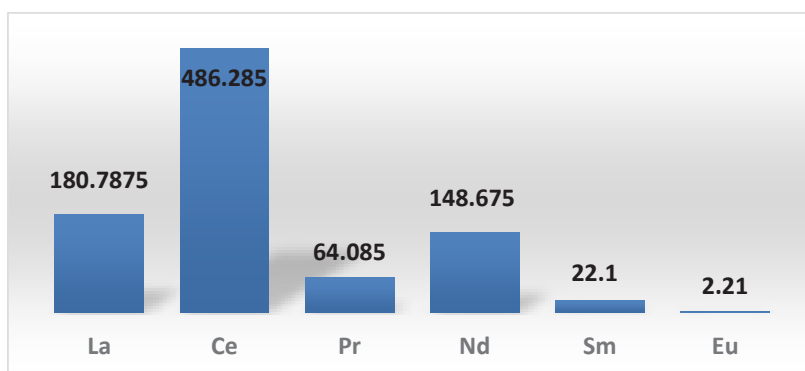
Mix (repeat)	mix	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A	واحد	علامت
۲,۲۶	۲,۲۴	۲,۳۳	۲,۱	۲,۱۹	۲,۲۸	۲,۴۸	۲,۵۲	۲,۵۶	۲,۵۱	۲,۳۶	۲,۲۷	(%)	Al
۲۶۸,۳۷	۱۵۵,۸۸	۱۵۳,۹۷	۱۶۷,۴۳	۳۵۵,۵۹	۱۶۷,۸۸	۱۷۳,۸	۱۶۳,۳۲	۱۸۰,۵۸	۴۲۹,۳۳	۱۸۱,۶۶	۱۸۳,۷۹	(ppm)	Ba
۷,۰۲	۶,۷۲	۶,۸۲	۶,۷۵	۶,۷۴	۷,۳۳	۷,۰۴	۷,۴۵	۷,۶۲	۷,۴۵	۷,۳۶	۶,۶۵	(%)	Ca
۴۹۲,۶۵	۴۷۹,۹۲	۵۲۴,۷۵	۵۰۳,۹۲	۵۱۹,۸	۵۶۷,۸۶	۵۵۳,۴	۵۵۶,۳۵	۵۵۶,۴۱	۵۷۶,۹۹	۵۲۸,۹۷	۴۶۳,۷۵	(ppm)	Ce
<۱	<۱	۲,۵۶	۱,۵۵	۱,۳	۱,۱۳	۳,۷۷	۳,۰۶	۴,۳۶	۴,۶۵	۲,۱۸	۱,۹۳	(ppm)	Cs
۱۸,۷۹	۱۸,۶۱	۱۹,۳۳	۱۷,۹۷	۱۸,۹۸	۲۱,۳۶	۲۰,۲۴	۲۱,۱۲	۲۰,۹۸	۲۱,۳۹	۱۹,۵	۱۷,۱۲	(ppm)	Dy
۸,۷	۵,۴۸	۸,۳۴	۷,۱۷	۷,۵۸	۸,۲	۷,۴۳	۹,۲۹	۹,۳۲	۹,۵۱	۷,۵۴	۶,۵۹	(ppm)	Er
۲,۷	۱,۷۲	۲,۸۴	۲,۴۸	۲,۵۷	۲,۶۴	۲,۴۷	۲,۹۸	۳,۱۱	۳,۲۴	۲,۴۶	۱,۹۴	(ppm)	Eu
۲۲,۸۲	۱۴,۴۱	۲۱,۶	۲۰,۸	۳۹,۱۹	۲۰,۷۸	۱۹,۵۶	۲۳,۷۷	۲۶,۱۹	۵۴,۵۸	۲۲,۶۸	۲۰,۸۷	(ppm)	Ga
۲۵,۶۱	۱۶,۷۶	۲۶,۵۶	۲۲,۴	۲۳,۵۲	۲۵,۵۳	۲۳,۱۷	۲۶,۵	۲۸,۷۱	۲۹,۱۲	۲۳,۱۶	۱۸,۴۶	(ppm)	Gd
۲,۸۸۵	۱,۶۷۵	۲,۶۵۴	۲,۲۱۲	۲,۳۵۹	۲,۵۵۴	۲,۳۹۴	۲,۷۰۱	۲,۸۷	۲,۹۵	۲,۲۸۳	۲,۰۳۷	(ppm)	Ho
۱۸۲,۳۵	۱۷۹,۲۱	۱۹۶,۸۶	۱۹۰,۱۷	۱۹۴,۳	۲۱۱,۸۷	۱۹۰,۲۲	۲۰۷,۲۹	۲۰۷,۴۶	۲۰۲,۹۲	۱۹۷,۴۸	۱۷۳,۱۴	(ppm)	La
۳,۴۳	۲,۲۷	۳,۷۸	۳	۳,۳۵	۳,۵۸	۳,۲۶	۳,۵۸	۳,۷۵	۳,۹۴	۳,۱۲	۲,۵	(ppm)	Lu
۱۷۹,۴۶	۱۱۷,۸۹	۱۹۱,۲۵	۱۶۴,۳۴	۱۷۰,۶۹	۱۷۴,۸۲	۱۶۶,۹	۱۹۲,۲۵	۱۹۸,۵۷	۲۰۸,۹۶	۱۶۴,۴	۱۲۹,۱	(ppm)	Nd
۱,۶۳	۱,۶۴	۱,۷۵	۱,۶۱	۱,۷	۱,۹	۱,۷۶	۱,۸	۱,۷۸	۱,۸۴	۱,۶۷	۱,۵۷	(%)	P
۱۷,۰۵	۱۵,۷۲	۱۶,۰۶	۱۶,۲۴	۱۵,۶۳	۱۴,۸۲	۱۵,۲۰	۱۵,۵۴	۱۵,۷۶	۱۶,۵۲	۱۶,۴۲	۱۴,۹۲	(ppm)	Pb
۶۳,۸۶	۶۴,۳۱	۶۶,۵۱	۶۵,۹۵	۶۸,۵۸	۷۱,۷۷	۷۱,۶۲	۷۲,۷۱	۷۲,۵۸	۷۵,۱۳	۷۰,۳	۶۳,۱۲	(ppm)	Pr
۵,۰۷	۴,۹۹	۴,۹۸	۴,۸۶	۵	۵,۲۶	۵,۵۱	۵,۵۳	۵,۶۶	۵,۷۶	۵,۳۵	۵,۰۸	(ppm)	Sc
۲۷,۰۷	۱۷,۱۳	۲۷,۹	۲۳,۲	۲۵,۳۶	۲۵,۴۴	۲۴,۰۵	۲۸,۲۵	۲۹,۳۳	۳۰,۶	۲۳,۷۶	۱۹,۴۴	(ppm)	Sm
۱۱۳,۴۵	۱۰۹,۴۳	۱۱۱,۹۵	۱۱۵,۹۴	۱۱۴,۳۲	۱۱۸,۸۵	۱۱۸,۷۴	۱۱۸,۳۲	۱۲۶,۰۸	۱۲۲,۵۴	۱۱۳,۸۸	۱۱۶,۲۴	(ppm)	Sr
۱۲,۰۹	۷,۷۱	۱۲,۳	۱۰,۶۸	۱۱,۶۷	۱۲,۵۲	۱۰,۸	۱۲,۴	۱۳,۱۵	۱۳,۶۵	۱۱,۹	۱۰,۲۵	(ppm)	Th
۱,۱۱	<۱	۱,۱۵	۱,۰۶	۱,۰۹	۱,۰۲	<۱	۱,۱۶	۱,۲۸	۱,۳	۱,۰۷	<۱	(ppm)	U
۱۰۵,۸۶	۱۰۳,۷۱	۱۰۹,۰۱	۱۰۱,۵۸	۱۰۴,۳۴	۱۱۸,۵۳	۱۱۳,۰۸	۱۱۵,۰۴	۱۱۵,۸۵	۱۱۸,۴	۱۰۸,۴۲	۹۷,۱۹	(ppm)	Y
۲,۴	۱,۶۲	۲,۷۷	۲,۱۳	۲,۲۴	۲,۳۲	۲,۲۳	۲,۸۱	۲,۸۸	۲,۸۸	۲,۳۲	۱,۹۹	(ppm)	Yb

۳ آمده است. با توجه به نتایج جدول ۳، عناصر سریم، لانتانیم و نئودیمیم دارای بیشترین عیار است و به ترتیب حدود ۵۳,۷۸، ۱۹,۹۹ و ۱۶,۴۴ درصد وزنی از کل عناصر نادر سبک را تشکیل می‌دهند. عناصر ایتیریم، گادولینیم و دیسپروسیم در بین عناصر نادر سنگین بیشترین عیار را دارد و به ترتیب حدود ۶۳,۷۱، ۱۲,۸۸ و ۱۱,۳۷ درصد وزنی از کل عناصر نادر سنگین را تشکیل می‌دهند. با توجه به نتایج جدول ۳ مجموع میانگین عیار عناصر نادر سبک و سنگین موجود به ترتیب حدود ۹۰۴,۱۲ و ۱۶۴,۴۵ پی‌پی‌ام است. مجموع عیار میانگین کل عناصر نادر در این نمونه حدود ۱۰۶۸,۵۷ پی‌پی‌ام است که از این مقدار ۸۴,۶۱ درصد وزنی آن را عناصر نادر سبک و ۱۵,۳۹ درصد وزنی آن را عناصر نادر سنگین تشکیل می‌دهد.

با توجه به نتایج آنالیزهای (ICP-Mass, XRF) انجام گرفته بر روی ده نمونه به صورت مجزا و نمونه ترکیبی می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف عیار عناصر نادر نمونه‌های گرفته شده از نقاط مختلف سد باطله با نمونه ترکیبی بسیار کم است. به همین دلیل به جای تفسیر بر روی نمونه‌های مجزا، آزمایش‌ها و تفسیر بر روی نمونه‌های ترکیبی که از مخلوط ۱۰ نمونه مجزا تهیه شده است، انجام گرفته است. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب میانگین عیار عناصر نادر سبک و سنگین بر حسب پی‌پی‌ام در نمونه ترکیبی را نشان می‌دهند. میانگین عیار محاسبه شده در این شکل‌ها بر اساس میانگین عیار عناصر نادر در نمونه ترکیبی و تکرار آن به دست آمده است. مجموع میانگین عیار ۶ عنصر نادر سبک و ۸ عنصر سنگین در جدول

جدول ۲: نتایج آنالیز XRF نمونه‌های مختلف با نمونه ترکیبی

L.O.I (%)	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	MnO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	MgO (%)	CaO (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	کد نمونه
(%)	(%)	(%)	۱,۵۶	۳,۵۴	۰,۲۸	۰,۲۱	۴۲,۱۸	۰,۵۶	۴,۹۳	۱۳,۱	۴,۹۲	۱۹,۵۶	A
۸,۳۸	۰,۱۷	۰,۴۵	۱,۴۸	۳,۷۸	۰,۳	۰,۱۷	۴۱,۸۱	۰,۵۵	۵,۴۱	۱۲,۷	۵,۱۵	۱۹,۵۳	B
۸,۳۸	۰,۱۷	۰,۴۱	۱,۶۲	۳,۹۵	۰,۳	۰,۲	۳۹,۲۵	۰,۵۶	۵,۷۶	۱۳,۴۶	۵,۳۱	۲۰,۰۲	C
۸,۸	۰,۱۹	۰,۳۹	۱,۶	۳,۹۷	۰,۲۶	۰,۲۱	۳۹,۱۶	۰,۵۲	۵,۸۱	۱۳,۲۱	۵,۴۵	۲۰,۷	D
۸,۳۱	۰,۱۷	۰,۴۴	۱,۵۸	۴,۲۳	۰,۳	۰,۲۳	۳۶,۶۹	۰,۵۴	۶	۱۴	۵,۷۱	۲۱,۶	E
۸,۳۴	۰,۱۴	۰,۴۳	۱,۷۴	۳,۹۸	۰,۳	۰,۲۲	۳۹,۶۴	۰,۵۱	۵,۶	۱۳,۳۶	۵,۴۹	۱۹,۷۶	F
۸,۵۴	۰,۱۶	۰,۴۷	۱,۵۷	۴,۰۵	۰,۲۶	۰,۲۲	۴۲,۵۴	۰,۵۲	۵,۳	۱۲,۴۱	۵,۱۹	۱۹,۷۷	G
۷,۴۴	۰,۱۴	۰,۳۹	۱,۴۵	۳,۷۱	۰,۲۷	۰,۲۴	۴۲,۴۲	۰,۵۴	۵,۲۵	۱۲,۷۱	۵,۰۱	۱۹,۶	H
۸	۰,۱۶	۰,۴	۱,۳۹	۳,۵۸	۰,۲۷	۰,۱۸	۴۵	۰,۵	۵,۳۵	۱۱,۸	۴,۹۱	۱۸,۴۶	I
۷,۹۲	۰,۱۶	۰,۳۶	۱,۶۴	۳,۷۴	۰,۳۷	۰,۲۱	۴۰,۹	۰,۵۵	۵,۶۷	۱۲,۳۵	۵,۴۳	۲۰,۲	J
۸,۱۹	۰,۱۵	۰,۴	۱,۵۷	۳,۸۳	۰,۲۸	۰,۱۸	۴۰,۶	۰,۵	۵,۵۲	۱۲,۹۱	۵,۳	۲۰,۳۳	mix
۸,۲۱	۰,۱۷	۰,۴۲	۱,۶۷	۳,۷۸	۰,۲۷	۰,۲	۴۱,۵۲	۰,۵۲	۵,۳۵	۱۲,۳۹	۵,۲۹	۲۰,۲	Mix (repeat)

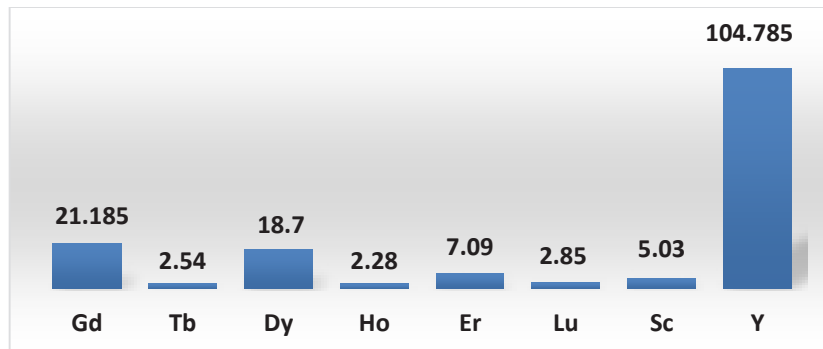


شکل ۳: میانگین عیار عناصر نادر سبک بر حسب پی‌پی‌ام در نمونه ترکیبی

## ۲-۵- تجزیه سرنندی نمونه معرف ترکیبی

عملیات تجزیه سرنندی بر روی نمونه معرف ترکیبی انجام گرفت و از سرندهای ۱۰۶، ۹۰، ۷۵، ۶۳، ۵۳، ۴۵ و ۳۸ میکرون برای تجزیه سرنندی استفاده شد. برای بررسی نحوه توزیع عناصر نادر در بخش‌های مختلف تجزیه سرنندی از آنالیز ICP استفاده شد. نتایج آنالیز تجزیه سرنندی در جدول ۴، میزان آهن نمونه ترکیبی در بخش‌های مختلف تجزیه سرنندی در جدول ۵ و نتایج آنالیز ICP نمونه ترکیبی در بخش‌های مختلف تجزیه سرنندی در جدول ۶ آمده است. شکل ۵ نمودار

توزیع دانه‌بندی نمونه ترکیبی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵،  $d_{80}$  نمونه ترکیبی برابر ۴۶٫۳۵ میکرون است. شکل ۶ نمودار تغییرات عیار آهن در بخش‌های مختلف تجزیه سرنندی را نشان می‌دهد. عیار آهن با افزایش ابعاد از ۳۰ تا ۱۱۰ میکرون از ۳۰ به ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. افزایش عیار آهن در بخش‌های ریزدانه نسبت به درشت‌دانه بیشتر به دلیل مقاومت کمتر اکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) نسبت به سایش در مرحله آسیاب‌کنی است و این افزایش عیار در ابعاد کمتر از ۶۰ میکرون مشاهده می‌شود. تغییرات عیار



شکل ۴: میانگین عیار عناصر نادر سنگین بر حسب پی‌پی‌ام در نمونه ترکیبی

جدول ۳: توزیع عیار و درصد وزنی عناصر نادر در نمونه معرف

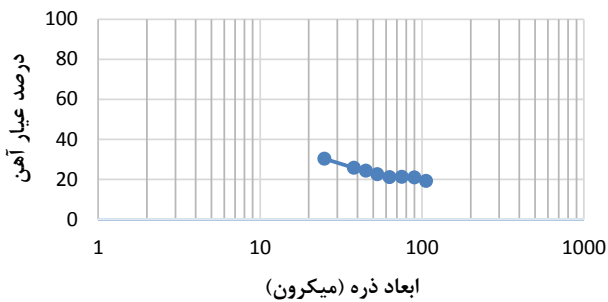
عنصر نادر	عیار (پی پی ام)	درصد وزنی نسبی	درصد وزنی کلی
La	۱۸۰٫۷۸	۱۹٫۹۹۵	۱۶٫۹۱۸
Ce	۴۸۶٫۲۸	۵۳٫۷۸۵	۴۵٫۵۰۸
Pr	۶۴٫۰۸	۷٫۰۸۸	۵٫۹۹۷
Nd	۱۴۸٫۶۷	۱۶٫۴۴۴	۱۳٫۹۱۳
Sm	۲۲٫۱	۲٫۴۴۴	۲٫۰۶۸
Eu	۲٫۲۱	۰٫۲۴۴	۰٫۲۰۷
-	۹۰٫۴۱۲	۱۰۰	۸۴٫۶۱۰
مجموع			
Gd	۲۱٫۱۸	۱۲٫۸۸	۱٫۹۸۲
Tb	۲٫۵۴	۱٫۵۴	۰٫۲۳۸
Dy	۱۸٫۷	۱۱٫۳۷	۱٫۷۵۰
Ho	۲٫۲۸	۱٫۳۹	۰٫۲۱۳
Er	۷٫۰۹	۴٫۳۱	۰٫۶۶۴
Lu	۲٫۸۵	۱٫۷۳	۰٫۲۶۷
Sc	۵٫۰۳	۳٫۰۶	۰٫۴۷۱
Y	۱۰۴٫۷۸	۶۳٫۷۲	۹۸٫۰۶
-	۱۶۴٫۴۵	۱۰۰	۱۵٫۳۹۰
مجموع			
-	۱۰۶۸٫۵۷	-	۱۰۰
مجموع کل عیار عناصر نادر			

جدول ۴: نتایج آنالیز تجزیه سرندي نمونه ترکیبی

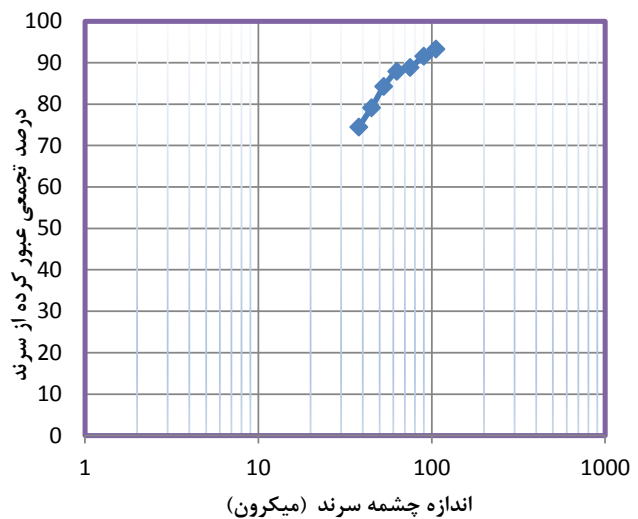
درصد تجمعی		وزن		اندازه چشمه سرندي (میکرون)
عبور کرده از سرندي	مانده روی سرندي	درصد	گرم	
۹۳٫۲۶	۶٫۷۴	۶٫۷۴	۲۴٫۸	۱۰۶
۹۱٫۶۰	۸٫۴۰	۱٫۶۶	۶٫۱	۹۰
۸۸٫۸۳	۱۱٫۱۷	۲٫۷۷	۱۰٫۲	۷۵
۸۷٫۹۶	۱۲٫۰۴	۰٫۸۷	۳٫۲	۶۳
۸۴٫۲۷	۱۵٫۷۳	۳٫۷۰	۱۳٫۶	۵۳
۷۹٫۱۳	۲۰٫۸۷	۵٫۱۴	۱۸٫۹	۴۵
۷۴٫۴۸	۲۵٫۵۲	۴٫۶۵	۱۷٫۱	۳۸
۰	۱۰۰	۷۴٫۴۸	۲۷۴٫۱	-۳۸
-	-	۱۰۰	۳۶۸	مجموع

جدول ۵: میزان آهن در بخش‌های مختلف نمونه ترکیبی

توزیع آهن (%)	مقدار فلز (گرم)	عیار Fe (%)	وزن		اندازه چشمه سرندي (میکرون)
			درصد	گرم	
۴٫۵۵	۱٫۳۰	۱۹٫۲۴	۶٫۷۴	۲۴٫۸	۱۰۶
۱٫۲۲	۰٫۳۵	۲۰٫۹۷	۱٫۶۶	۶٫۱	۹۰
۲٫۰۷	۰٫۵۹	۲۱٫۲۹	۲٫۷۷	۱۰٫۲	۷۵
۰٫۶۵	۰٫۱۸	۲۱٫۱۷	۰٫۸۷	۳٫۲	۶۳
۲٫۹۲	۰٫۸۳	۲۲٫۵۲	۳٫۷۰	۱۳٫۶	۵۳
۴٫۳۸	۱٫۲۵	۲۴٫۳۴	۵٫۱۴	۱۸٫۹	۴۵
۴٫۲۰	۱٫۲۰	۲۵٫۷۴	۴٫۶۵	۱۷٫۱	۳۸
۷۹٫۱۹	۲۲٫۵۸	۳۰٫۳۱	۷۴٫۴۸	۲۷۴٫۱	-۳۸
۱۰۰	۲۸٫۵۱	۲۸٫۵۱	۱۰۰	۳۶۸	مجموع



شکل ۶: درصد عیار آهن در بخش‌های مختلف تجزیه سرندي



شکل ۵: نمودار توزیع دانه‌بندی نمونه ترکیبی

جدول ۶: آنالیز ICP-Mass بخش‌های مختلف تجزیه سردی

نمونه کلی	اندازه چشمه سرد (میکرون)								عنصر	
	-۳۸	۳۸	۴۵	۵۳	۶۳	۷۵	۹۰	۱۰۶		
۱,۹۴	۱,۸۲	۱,۶۱	۱,۵۸	۱,۸۱	۲,۰۳	۲,۱۲	۲,۳۶	۲,۸۱	(%)	Al
۱۲۱,۷	۱۱۷,۹۴	۱۳۰,۳۸	۱۱۳,۲۲	۱۱۷,۲۳	۱۳۱,۲۸	۱۹۱,۲۵	۱۲۰,۵۵	۱۴۵,۲۹	(ppm)	Ba
۴۴۷,۱۲	۴۱۶,۱۵	۵۹۲,۱۸	۵۲۹,۶۳	۵۱۱,۶۳	۵۵۷,۶۶	۴۰۹,۸۳	۴۲۹,۵۴	۳۴۹,۹۷	(ppm)	Ce
۳۱,۲۴	۲۷,۳۳	۳۹,۳۸	۵۷,۲۹	۳۱,۱۶	۳۲,۹۱	۲۸,۴۱	۲۸,۴۷	۲۶,۸۲	(ppm)	Dy
۱۵,۱۵	۱۳,۳۷	۱۹,۲۸	۲۸,۸	۱۶,۳۴	۱۶,۵۶	۱۴,۳۸	۱۴,۴۳	۱۴,۰۲	(ppm)	Er
۵,۵	۴,۹۵	۶,۲	۹,۳	۴,۹۶	۵,۶۲	۴,۵۹	۴,۷۳	۴,۲۳	(ppm)	Eu
۸,۱۲	۸,۱۵	۷,۶۵	۷,۲۱	۶,۹۹	۷,۵۵	۷,۱۲	۶,۹۸	۶,۶۹	(%)	Fe
۱۱,۸۸	۱۱,۱۱	۹,۵۸	۱۳,۹۷	۸,۲۶	۱۰,۲۵	۱۲,۸۷	۹,۹۱	۱۲,۴۵	(ppm)	Ga
۴۰,۷۸	۳۶,۲۵	۴۹,۲۸	۷۳,۲۵	۳۸,۵۵	۴۲,۶۸	۳۵,۵۴	۳۵,۵۵	۳۲,۲۷	(ppm)	Gd
۵,۸۴	۵,۰۵	۷,۴۲	۱۰,۸	۶	۶,۲۲	۵,۴۷	۵,۴۳	۵,۱۶	(ppm)	Ho
۱۳۳,۵۲	۱۲۳,۷۶	۱۷۵,۸۱	۱۵۹,۶۹	۱۵۳,۳۳	۱۶۵,۴۷	۱۲۶,۷۵	۱۲۸,۴۸	۱۰۶,۹۵	(ppm)	La
۱,۳۴	۱,۱۵	۱,۶	۲,۴۶	۱,۶	۱,۳۹	۱,۲۳	۱,۲۷	۱,۵۲	(ppm)	Lu
۱۴۱,۸	۱۲۶,۶۲	۱۶۶,۷۵	۲۴۹,۹۱	۱۳۱,۸۱	۱۵۴,۰۹	۱۲۲,۵۲	۱۲۲,۹	۱۰۶,۹۱	(ppm)	Nd
۲,۰۵	۱,۷۶	۳,۱۷	۲,۹۸	۲,۸	۲,۷۹	۲,۸۳	۲,۲	۱,۸۹	(%)	P
۱۰,۲۶	۹,۲۲	۱۱,۱۳	۱۲,۰۵	۲۳,۸۲	۱۶,۷۹	۲۲,۵۶	۱۵,۵۳	۱۸,۵۶	(ppm)	Pb
۹۵,۰۵	۹۱,۲۶	۱۱۶,۸۹	۱۰۶,۹۱	۱۰۴,۳۸	۱۱۱,۱۸	۹۳,۳۳	۸۹,۸۸	۷۸,۲۹	(ppm)	Pr
۲۳,۷۲	۲۰,۳۷	۱۷,۲۲	۲۵,۱	۱۷,۴۷	۲۱,۶۳	۲۲,۴۲	۲۴,۰۳	۳۴,۰۳	(ppm)	Rb
۰,۲۵	۰,۱۴	۰,۳۵	۰,۳۲	۰,۲۹	۰,۳۲	۰,۳۵	۰,۲۹	۰,۵۱	(%)	S
۳,۸۴	۳,۹۲	۲,۸	۴,۵۳	۲,۵۵	۲,۸۵	۲,۹۷	۳,۵۹	۴,۴۹	(ppm)	Sc
۶۵,۳۶	۵۸,۸۷	۷۶,۸	۱۱۵,۸۷	۶۰,۷۴	۷۰,۵	۵۶,۷	۵۵,۷۸	۴۹,۳۴	(ppm)	Sm
۷۱,۸۱	۶۸,۶۱	۹۱,۴۸	۸۰,۹۹	۷۹,۱۵	۹۶,۲۳	۸۶,۶۳	۸۷,۸	۸۸,۲۸	(ppm)	Sr
۱۴,۲۳	۱۴,۵	۱۱,۵۶	۱۸,۰۸	۹,۵۲	۱۰,۴۴	۸,۰۴	۱۰,۲۶	۹,۸۷	(ppm)	Th
۱,۷۸	۱,۸۵	۱,۸	۲,۱۸	۳,۰۵	۱,۴۶	۱,۴۷	۱,۶۳	۳,۳۱	(ppm)	U
۲۰,۸۵	۱۸	۲۵,۹	۳۹,۸۸	۲۰,۰۱	۱۹,۹۹	۱۸,۸۷	۱۹,۶۵	۱۷,۸۹	(ppm)	Y
۴,۹۷	۴,۲۸	۶,۲۵	۹,۳۶	۵,۷۸	۵,۰۷	۴,۵۶	۴,۷۸	۵,۰۳	(ppm)	Yb

باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن چادرملو است. از معایب این روش می‌توان به محدودیت در تشخیص کانی‌های با کمتر از ۳ درصد وزنی اشاره کرد [۱۷]. نتایج آنالیز XRD بر روی نمونه معرف نشان می‌دهد که سد باطله به ترتیب از کانی‌های اصلی مانند هماتیت، کوارتز، فلوروآپاتیت، کلسیت، گوتیت و دولومیت تشکیل شده است.

#### ۷-۲- مطالعه SEM

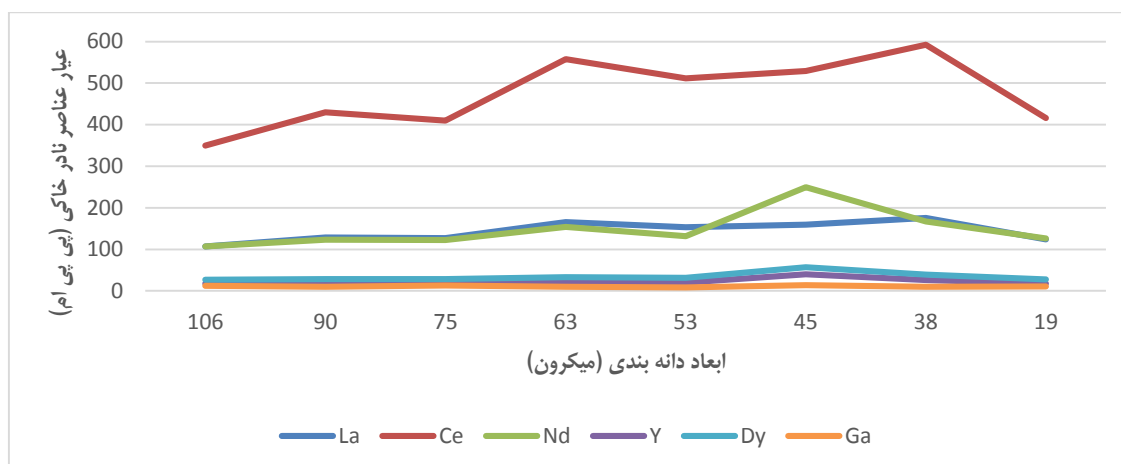
مطالعات میکروسکوپ الکترونی بر روی شش مقطع سیقلی از نمونه با فراکسیون‌های ۱۰۶+، ۷۵+۱۰۶-، ۵۳+۷۵-، ۴۵+۵۳-، ۳۸+۴۵- میکرون انجام شد و نتایج این بخش از مطالعات در شکل ۸ خلاصه می‌شود.

آهن در ابعاد بالای ۶۳ میکرون بسیار ناچیز و تقریباً ثابت است، به طوری که عیار میانگین آهن با توجه به نمودار شکل ۶ در حدود ۲۰/۵ درصد است.

نتایج آنالیز عناصر نادر از بخش‌های مختلف تجزیه سردی به صورت نمودار در شکل ۷ آمده است که نتایج آن نشان می‌دهد تقریباً عناصر نادر در تمام بخش‌ها پراکنده شده‌اند و نتایج آنالیز تجزیه سردی آن طوری نیست که از طریق تجزیه سردی بتوان بخشی از ابعاد را به دلیل نداشتن عناصر نادر حذف و یا با تمرکز عناصر نادر در بخش خاصی پریار کرد.

#### ۶-۲- آنالیز XRD

هدف از این مطالعه، شناسایی کانی‌های تشکیل‌دهنده سد



شکل ۷: عیار عناصر نادر در بخش‌های مختلف تجزیه سردی

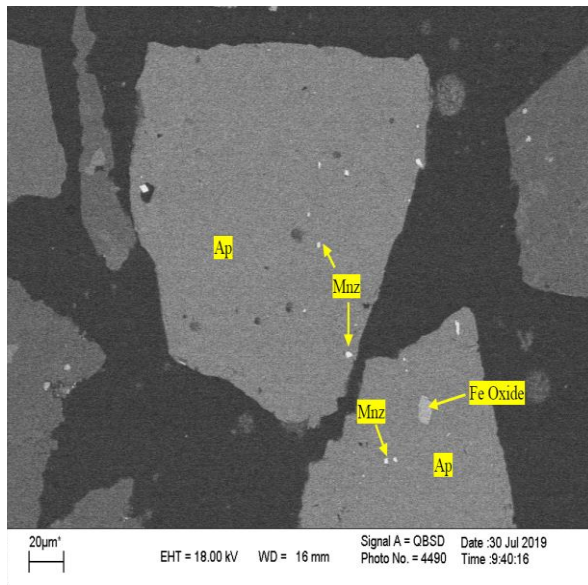
مجددا آزمایش جدایش مغناطیسی ۱۷۰۰۰ گوس (کلینر) انجام گرفت تا مواد مغناطیس کاملاً از مواد غیرمغناطیس جدا شود و عیار عناصر نادر در بخش غیرمغناطیس افزایش یابد. محصول مغناطیس به دست آمده در مرحله کلینر با محصول مغناطیسی مرحله رافر با هم مخلوط شده و مجدداً آزمایش جدایش مغناطیسی با شدت ۱۲۰۰۰ گوس انجام گرفت تا مواد فرومغناطیس از دیامغناطیس جدا شوند. جدول ۷ موازنه جرم مدار جدایش مغناطیسی تر شدت بالا را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۷ بخش مغناطیسی به عنوان باطله حدود ۱۸٫۷۵ درصد وزنی از عناصر نادر را با خود به همراه دارد و این بخش از نظر وزنی ۳۵٫۴۸ درصد وزنی از کل بار ورودی با عیار ۸۰۲ پی‌پی‌ام را تشکیل می‌دهد. دلایل بالا بودن عیار عناصر نادر در بخش مغناطیس به دلیل عدم درجه آزادی کافی و نیز درگیری کانی‌های حاوی عناصر نادر مانند مونازیت، آپاتیت و زئوتیم با کانی‌های اکسیدی آهن است. محصول مغناطیسی به دست آمده از جدایش مغناطیسی با شدت ۱۲۰۰۰ گوس مورد مطالعات SEM قرار گرفت تا دلایل عدم کارایی روش جدایش مغناطیسی شناسایی شود که نتایج مطالعات SEM در شکل ۱۰ نیز تاییدکننده درگیری این کانی‌ها با اکسیدهای آهن است. درگیری‌های کانی‌های حاوی عناصر نادر با اکسیدهای آهن باعث شده است تا این روش به دلیل بالا بودن عیار عناصر نادر در بخش مغناطیسی به عنوان یک روش پیش‌فرآوری مناسب مورد استفاده قرار نگیرد و برای بازیابی عناصر نادر باید عملیات لیچینگ با اسید کلریدریک یا نیتریک بر روی نمونه اولیه موجود در سد باطله انجام گیرد.

نتایج مطالعات نشان داد که کانی‌های مونازیت و آپاتیت موجود در نمونه حاوی عناصر نادر هستند. کانی مونازیت در حد چند میکرون بیشتر به صورت پراکنده در کانی آپاتیت است. درگیری مونازیت با اکسیدهای آهن نیز در قسمت‌های زیادی از نمونه‌ها مشاهده شده است. همچنین در برخی مناطق، مونازیت به صورت درگیر با کانی‌های کربناته مانند کلسیت و دولومیت نیز مشاهده می‌شود. زئوتیم (کانی ایتزیم‌دار) نیز به میزان کمی در نمونه دیده شده است که با مونازیت و آپاتیت درگیر است. در یک قسمت از نمونه درگیری مونازیت و زئوتیم با اپیدوت شناسایی شد. در قسمت‌های کمی از نمونه، مونازیت با کانی روتیل درگیر است و در بخش ۳۸- میکرون در بعضی از قسمت‌های نمونه، کانی آزاد مونازیت مشاهده می‌شود. اکسیدهای آهن در بعضی قسمت‌ها با کانی‌های سیلیکاته و کربناته مانند کوارتز و آلبیت و دولومیت درگیر هستند. کانی‌هایی دیگر مانند تیتانومگنتیت، باریت، اسفالریت، سولفیدهای مس و فلدسپات و اورپیمنت به مقدار جزئی در نمونه‌ها نیز مشاهده شده است.

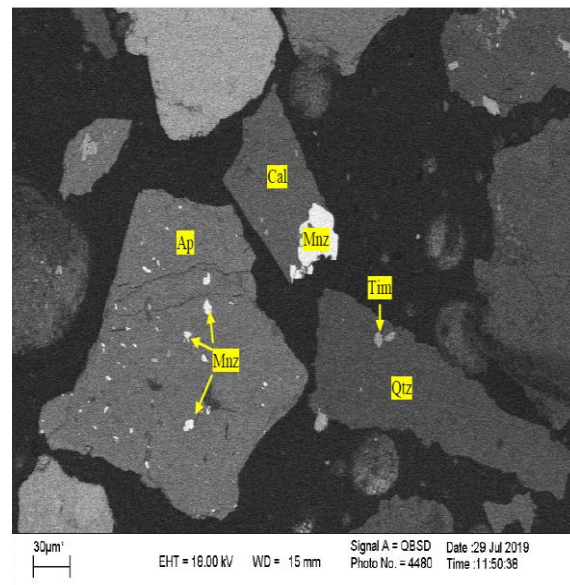
### ۳- بررسی پرعیارسازی عناصر نادر به روش جدایش مغناطیسی تر (شدت بالا)

عملیات جدایش مغناطیسی تر شدت بالا (۱۷۰۰۰ گوس) بر روی خوراک (مرحله رافر) طبق فلوشیت شکل ۹ انجام گرفت و در اثر این جدایش در گام نخست محصولات مغناطیسی (باطله) و غیرمغناطیسی (کنسانتره) به دست آمدند، سپس بر روی محصول غیرمغناطیسی به دست آمده از مرحله رافر

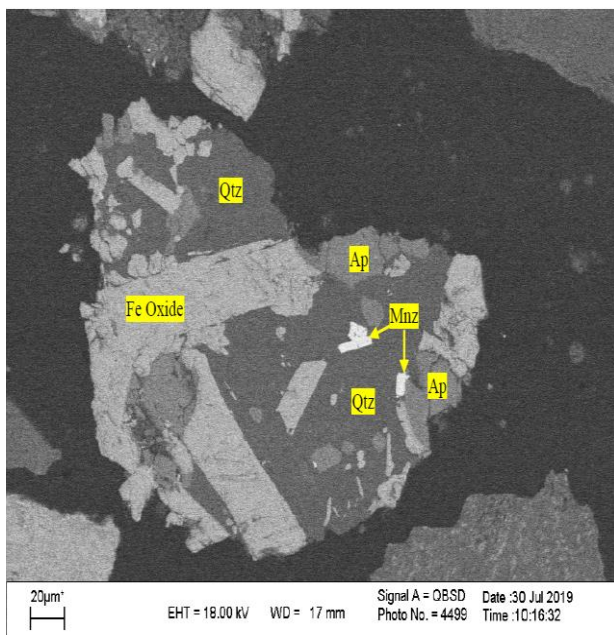




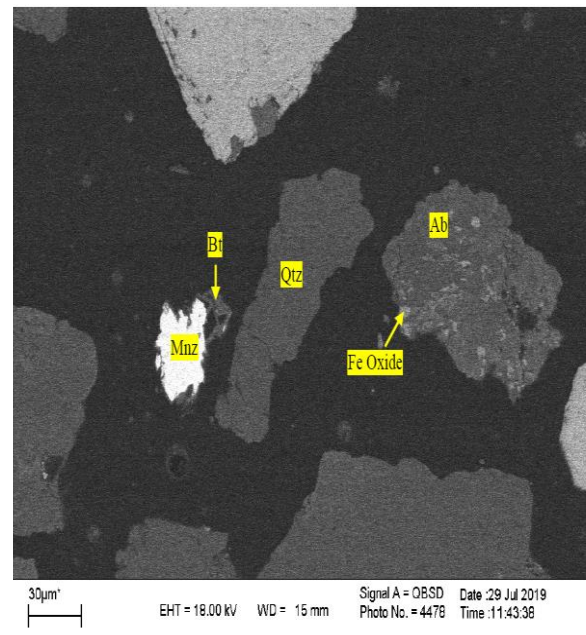
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

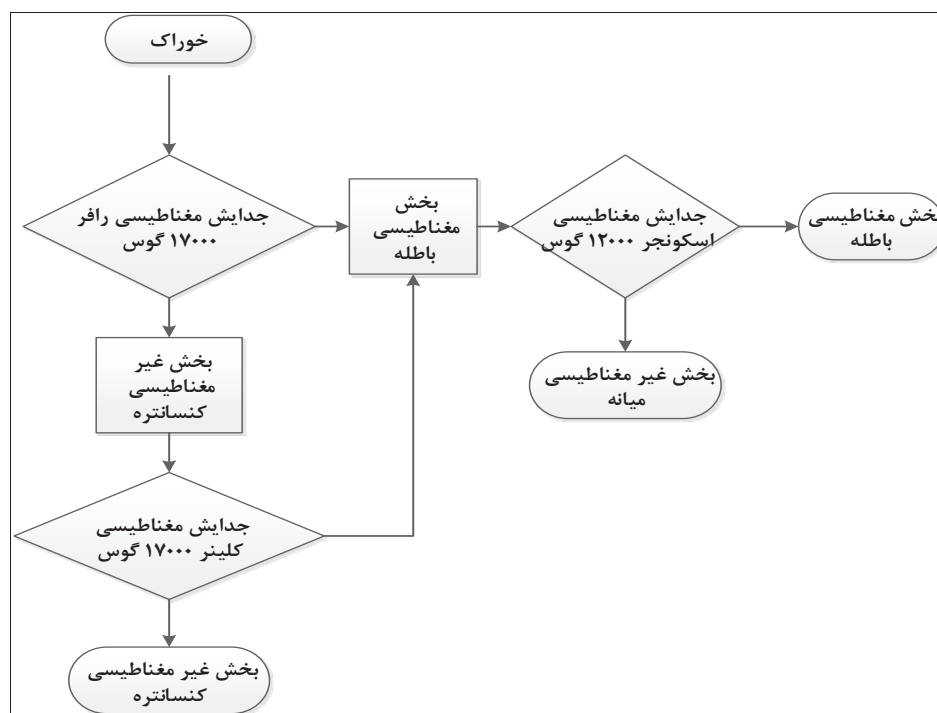
شکل ۸: الف) درگیری موناژیت و اکسید آهن با آپاتیت، ب) درگیری (موناژیت و آپاتیت)، (موناژیت و کلسیت) و (تیتانومگنتیت و کوارتز)، ج) درگیری موناژیت با آپاتیت، کوارتز و اکسید آهن، د) درگیری موناژیت با بیوتیت، درگیری آکسید آهن با آلbite، کوارتز

شده است:

نتایج آنالیز XRD نشان می‌دهد که نمونه‌های گرفته شده از سد باطله معدن چادرملو از کانی‌های اصلی مانند هماتیت، کوارتز، فلوروآپاتیت، کلسیت، گوتیت و دولومیت تشکیل شده است. نتایج XRF نیز نشان داده است که حدود ۸۴٫۷۵ درصد

#### ۴- نتیجه‌گیری

نمونه اخذ شده از سد باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن چادرملو حاوی عناصر نادر و برای پرعیارسازی و انتخاب روش مناسب برای بازیابی عنصر نادر به شناسایی نمونه مورد مطالعه نیاز است که نتایج این مطالعات در ادامه به صورت زیر خلاصه



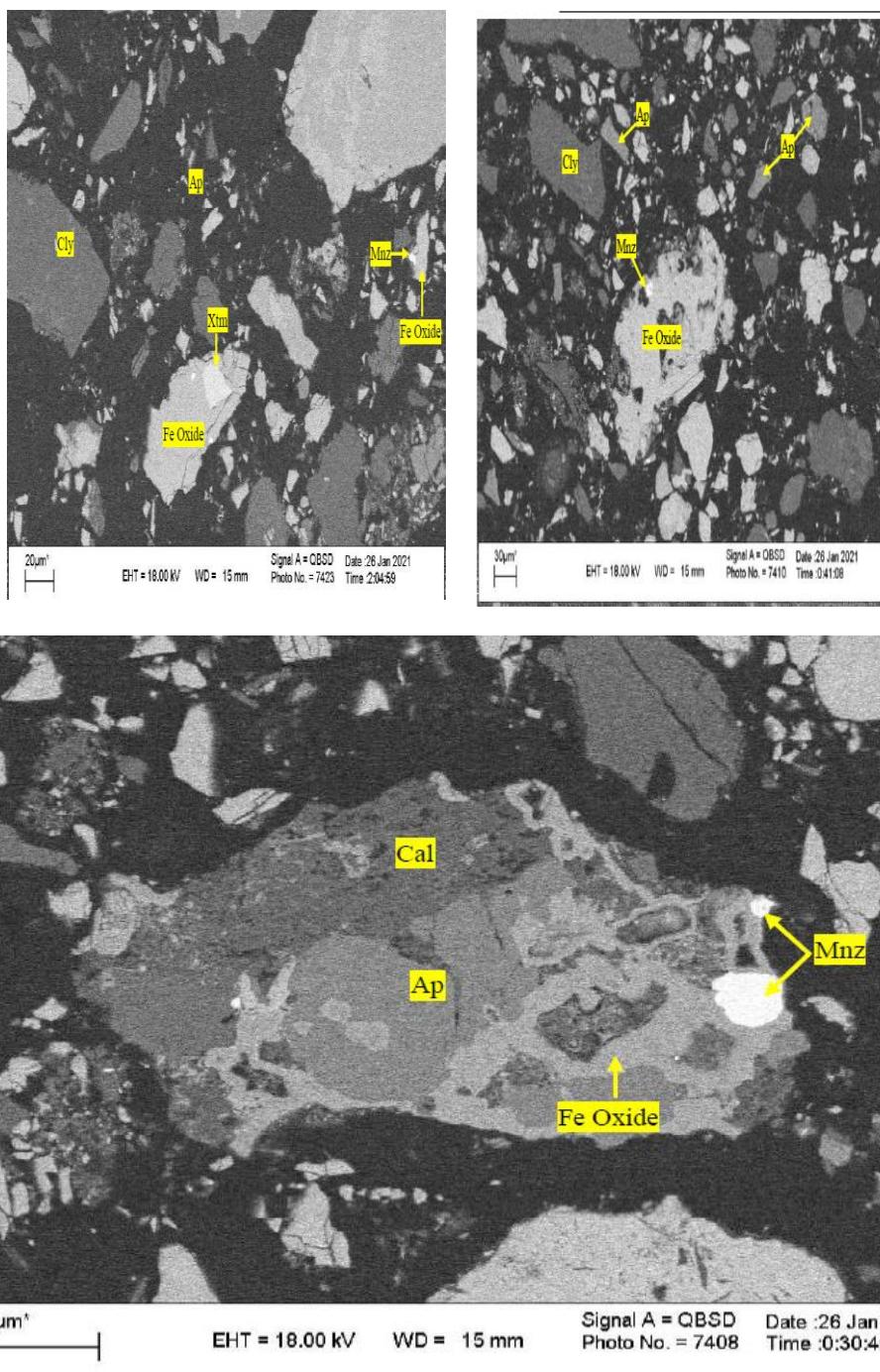
شکل ۹: فلوشیت مدار بررسی جدایش عناصر نادر به روش مغناطیسی تر شدت بالا

جدول ۷: موازنه جرم مدار جدایش مغناطیسی تر شدت بالا

نسبت غنی شدگی	بازیابی نسبی (%)	وزن عناصر نادر (میلی گرم)	عیار (پی پی ام)	درصد وزنی	وزن (گرم)	محصول
۱	۱۰۰	۳۳۰٫۱۸	۱۵۱۷٫۳۷	۱۰۰	۲۱۷٫۶۰	خوراک
۱٫۵۱	۶۵٫۲۶	۲۱۵٫۴۹	۲۲۹۰	۴۳٫۲۴	۹۴٫۱۰	بخش غیر مغناطیسی (کنسانتره)
۰٫۷۵	۱۵٫۹۸	۵۲٫۷۸	۱۱۴۰	۲۱٫۳۸	۴۶٫۳۰	بخش مغناطیسی (میانه)
۰٫۵۳	۱۸٫۷۵	۶۱٫۹۱	۸۰۲	۳۵٫۴۸	۷۷٫۲۰	بخش مغناطیسی (باطله)

از نمونه‌ها قابل مشاهده است. همچنین در برخی مناطق، موناژیت به صورت درگیر با کانی‌های کربناته مانند کلسیت و دولومیت نیز مشاهده می‌شود. در قسمت‌های کمی از نمونه، موناژیت با کانی روتیل درگیر است و در بخش ۳۸- میکرون در بعضی از قسمت‌های نمونه، کانی آزاد موناژیت مشاهده می‌شود. اکسیدهای آهن در بعضی قسمت‌ها با کانی‌های سیلیکاته و کربناته مانند کوارتز و آلپیت و دولومیت درگیر هستند. نتایج آنالیز ICP نشان داد که از عناصر سبک عناصر سربیم، لانتانیم و نئودیمیم دارای بیشترین عیار بوده و به ترتیب حدود ۵۳٫۷۸، ۱۹٫۹۹ و ۱۶٫۴۴ درصد وزنی از کل عناصر نادر سبک را تشکیل می‌دهند. از عناصر سنگین عناصر ایتیریم، گادولینیم و دیسپروسیم دارای بیشترین عیار بوده و به ترتیب

وزنی از کل نمونه را به ترتیب اکسیدهای آهن (کانی‌های هماتیت و گوتیت) با ۴۱٫۵۲ درصد وزنی، اکسیدهای کلسیم و منیزیم (کانی‌های کلسیت و دولومیت) با ۱۷٫۷۴ درصد وزنی و کوارتز با ۲۰٫۲ درصد وزنی و اکسیدهای آلومینیم با ۵٫۲۹ درصد وزنی تشکیل داده است. میانگین عیار آهن در نمونه حدود ۲۸٫۵۱ درصد است و عیار آهن با کاهش دانه‌بندی از ۱۱۰ میکرون تا زیر ۴۵ میکرون به ترتیب از ۱۹٫۲۴ تا ۳۰٫۳۱ درصد افزایش می‌یابد. نتایج مطالعات SEM نشان داده است که کانی‌های موناژیت، زنونیم و آپاتیت موجود در این نمونه حاوی عناصر نادر هستند. کانی موناژیت در حد چند میکرون بیشتر به صورت پراکنده در کانی آپاتیت مشاهده می‌شود، اما درگیری موناژیت با اکسیدهای آهن نیز در قسمت‌های زیادی



شکل ۱۰: درگیری موناژیت، آپاتیت و زنونیم با اکسیدهای آهن در محصول جدایش مغناطیسی

درصد وزنی آن را عناصر نادر سبک و ۱۵/۳۹ درصد وزنی آن را عناصر نادر سنگین تشکیل می‌دهد. نتایج تجزیه سردی نیز نشان داده است که  $d_{80}$  نمونه مورد مطالعه بدون خردایش تنها با آماده‌سازی اولیه برابر ۴۶/۳۵ میکرون است. با توجه به درصد بالای آهن در نمونه مورد آزمایش روش جدایش مغناطیسی

حدود ۶۳/۷۱، ۱۲/۸۸ و ۱۱/۳۷ درصد وزنی از کل عناصر نادر سنگین را تشکیل می‌دهند. مجموع عیار میانگین عناصر نادر سبک و سنگین موجود به ترتیب حدود ۹۰۴/۱۲ و ۱۶۴/۴۵ پی‌پی‌ام است و مجموع عیار میانگین کل عناصر نادر در این نمونه حدود ۱۰۶۸/۵۷ پی‌پی‌ام است که از این مقدار ۸۴/۶۱



Journal of Alloys and Compounds, 995-998.

- [9] Gupta, C., and Krishnamurthy, N. (2005). "Extractive Metallurgy of Rare Earths". CRC Press Inc., 1-504.
- [10] Kumari, A., Panda, R., Kumar, M. J., Kumar, R., and Young, L. J. (2015). "Process development to recover rare earth metals from monazite mineral". A review Minerals Engineering, 79: 102-115.
- [11] Ritcey, G. M., and Ashbrook, A. W. (1979). "Solvent Extraction: Principles and Applications to Process Metallurgy". Part-II, Elsevier, Amsterdam, 386-420.
- [12] Abdulkarim, Y., Abdullah, O., and Ismail, G. (2003). "Effect of thiourea on sulphuric acid leaching of bastnaesite". Hydrometallurgy, 68: 195-202.
- [13] Das, S., Behera, S. S., Murmu, B. M., Mohapatra, R. K., Mandal, D., Samantray, R., Parhi, P. K., and Senanayake, G. (2018). "Extraction of scandium (III) from acidic solutions using organo-phosphoric acid reagents: a comparative study". Separation and Purification Technology, 202: 248-258.
- [14] Lopez, J., Reig, M., Gibert, O., and Cortina, J. L. (2019). "Integration of nanofiltration membranes in recovery options of rare earth elements from acidic mine waters". Journal of Cleaner Production, 210: 1249-1260.
- [15] Li, F., Wang, Y., Su, X., and Sun, X., (2019). "Towards zero-consumption of acid and alkali recycling rare earths from scraps: a precipitation-stripping-saponification extraction strategy using CYANEX572". Journal of Cleaner Production, 228: 692-702.
- [16] Jyothi, R. K., Thenepalli, T., Ahn, J. W., Parhi, P. K., Chung, K. W., and Lee, J. Y. (2020). "Review of rare earth elements recovery from secondary resources for clean energy technologies: Grand opportunities to create wealth from waste". Journal of Cleaner Production, 267: 1-26.

[۱۷] سمیعی بیرق، ع.، مشکینی، م.؛ ۱۳۹۴؛ "عناصر نادر خاکی". انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، تهران، ص ۱۶۸-۱.

شدت بالا برای حذف آهن و پرعبارسازی عناصر نادر انجام گرفت که به دلیل درگیری کانی‌های عناصر نادر با اکسیدهای آهن محصول مغناطیسی جدا شده حاوی ۸۰۲ پی‌پی‌ام عناصر نادر بوده است که نشان می‌دهد روش جدایش مغناطیسی در زمینه پرعبارسازی عملکرد خوبی ندارد و روش لیچینگ اسیدی مستقیم با اسیدهای نیتریک و کلریدریک برای بازیابی عناصر نادر پیشنهاد می‌شود.

## ۵- مراجع

- [1] Haxel, G. B., Hedrick, J. B., and Orris, J. J. (2002). "Rare Earth Elements Critical Resources for High Technology". USGS Facts Sheet, 1.
- [2] Jorjani, E., Bagherieh, A. H., and Rezai, B. (2007). "Determination of rare earth elements in products of Chadormalu Iron ore beneficiation plant (Iran) from beneficiation point of view". Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, Jahad Daneshgahi, 26(4): 11-18.
- [3] Jia, Q., and Tong, Sh. (2009). "Solvent extraction of rare earth elements with mixtures of sec-octylphenoxy acetic acid and bis(2,4,4-trimethylpentyl) dithiophosphinic acid". Separation and Purification Technology, 64: 345-350.
- [4] Kanazawa, Y., and Kamitani, M. (2006). "Rare earth minerals and resources in the world". Journal Alloys and Compounds, 408-412.
- [5] Gupta, C. K., and Krishnamurthy, N. (2005). "Extractive Metallurgy of Rare Earths". CRC press, Boca Raton London New York Washington DC, 1-159.
- [6] Xie, F., Zhang, T. A., Dreisinger, D., and Doyle, F. (2014). "A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous Solutions". Minerals Engineering, 56: 10-28.
- [7] Jorjani, E., Bagherieh, A. H., and Chehreh, Ch. S. (2011). "Rare earth elements leaching from Chadormalu apatite concentrate: Laboratory studies and regression predictions". Korean Journal Chemical Engineering, 28(2): 557-562.
- [8] Hongfei, L., and Fuqiang, G. (2006). "A new hydrometallurgical process for extracting rare earths from apatite using solvent extraction with P350".

<sup>1</sup> Bastansite

<sup>2</sup> Leaching