



Imam Khomeini International University  
Vol. 8, No. 4, Winter 2023



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

## Research Paper

# Iron Recovery from the Tailings of the Balestan Iron Ore Plant

Bahrami A.<sup>1\*</sup>, Imani F.<sup>2</sup>, Kazemi F.<sup>3</sup>, Mirmohammadi M.<sup>4</sup>, Rafiei M.<sup>5</sup>

1- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3- Ph.D Student, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

4- Assistant Professor, School of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

5- B.Sc, Pars Satkhtar Group, Tabriz, Iran

Received: 23 Feb. 2023

Accepted: 11 Jun. 2023

**Abstract:** The reprocessing tailings of iron ore processing plants is important from economic (as a secondary source of iron) and environmental points of view. The aim of the present study is to determine the appropriate method for recovery iron from the tailings of Balestan iron ore processing plant (located in the northwest of Iran). For this purpose, after taking samples from the tail piles of this plant, a representative sample was selected, and chemical, mineralogical, size distribution, and bond's work index analyses were performed on it. The total iron grade in the tailings was measured to be about 10%, of which 8.5% was identified as magnetite mineral (with a degree of liberation less than 40%). The  $d_{80}$  value of the sample was 7 mm, and the bond index was measured as 11.84 (kWh/ton). To determine the appropriate method for iron recovery, pre-processing with magnetic drum, grinding, and Davis tube tests were performed. With the magnetic pre-processing of tailings with a particle size of 0-10 mm, under a field of 2000 G and in a dry method, about 80% of the load entering the drum with a total iron grade of 5% was transferred to the tailings. 20% of the input load with an iron grade of approximately 24% was recovered to the concentrate. In order to remove the gangue minerals and enrich the pre-processed concentrate, stepwise grinding and separation had the best results. Comminution was done in two stages to produce products with smaller dimensions of 250 and 45 microns, respectively. Magnetic separation was also done in three stages with 3000 G, and two stages of separation with 1000 G, which finally resulted in a concentrate with a total iron grade of more than 66% and iron recovery of 44.88%.

**Keywords:** Iron tailings, Pre-treatment, Stepwise concentration, Grinding, Energy consumption.

### How to cite this article

Bahrami, A., Imani, F., Kazemi, F., Mirmohammadi, M., and Rafiei, M. (2023). "Iron Recovery from the Tailings of the Balestan Iron Ore Plant". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(4): 119-135.

DOI: [10.30479/JMRE.2023.18475.1629](https://doi.org/10.30479/JMRE.2023.18475.1629)

\*Corresponding Author Email: [A.bahrami@urmia.ac.ir](mailto:A.bahrami@urmia.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

In recent years, with the increase in global demand and the rapid development of the iron and steel industries, the amount of tail produced from the mining and processing of this metal has increased. These accumulated tails not only cause serious environmental damage, but they also are a potential risk about the consumption and waste of mineral resources [1,2]. The reprocessing of the tails of iron processing plants will bring significant benefits along with solving the environmental challenges. In addition to the possibility of recovering iron, tailings piles of iron ore processing plants, depending on the type of primary ore, have the potential to extract other minerals and metals such as copper, cobalt, gallium, rare earth elements, gold, etc. [3]. On the other hand, the tailings of iron processing plants have been successfully used in the production of construction materials, including concrete and ceramics, with unique characteristics. Therefore, the reprocessing of tails of iron processing plants is important from the economic and environmental points of view.

The use of conventional processing methods will not have a favorable result for the processing of iron tail piles; because the tailing piles of iron ore processing plants are the remnants of the processing processes, which, according to the primary mineralization type, contain a variety of valuable minerals and gangue with more complex mineralization than the plant's initial feed. In general, with optimal grinding of granulated iron ore tailings (in order to achieve the appropriate degree of liberation), magnetic separation methods can be used to recover iron from the tailings. However, due to the low degree of liberation of valuable minerals in iron ore tailings (thus the necessity of comminuting them to very small dimensions), the magnetic separation method will face many problems; including the misreported of tailings particles to iron concentrate. On the other hand, the presence of other minerals with low magnetic properties causes the reduction of the magnetic concentration grade and, as a result, the reduction of its separation efficiency. The aim of this research is to identify the mineralogical characteristics and chemical composition of the tailings of the iron ore processing plant and to provide a suitable solution for iron recovery from them.

## METHODS

In order to achieve the maximum recovery of iron from the tailings of Balestan iron ore processing plant, pre-processing tests have been carried out on the tailings of this plant. In this regard, magnetic separation tests with a magnetic field intensity of 2000 G have been performed for different size fraction of particles 0-10, 0-6.35, 0-4.75, and 0-2 mm.

To determine the optimal conditions for recovering iron from the tailings of the processing plant by the magnetic separation method, grinding and Davis tube tests have been performed on the tailings (at field strengths of 1000, 2000, 3000, and 4000 G). In Figure 1, the general outline of the tests is shown.

## FINDINGS AND ARGUMENT

The results of the pre-processing tests using the dry magnetic separation drum at a field strength of 2000 G for the storage of the studied tailings are shown in Table 1. The change in the size of the feed did not have a significant effect on the iron content. The changes in the weight of the magnetic product also did not have a noticeable and clear trend with the change in the dimensions of the feed. In general, by performing the magnetic pre-processing stage, about 20% of the weight of the input load with a total iron grade of approximately 24% was recovered to the magnetic product. The amount of iron recovery in the pre-processing stage was more than 50%. By performing magnetic pre-processing, the SiO<sub>2</sub> content has been reduced to less than 30%, while its amount in the feed was more than 43%. Reducing the amount of this compound is important from the point of view of reducing the comminution energy in the next comminution stages, as well as reducing the amount of fine production and its adverse effect on magnetic separation. Therefore, it can be said that the dry magnetic pre-processing is recommended for tailing piles without any comminution or classification (0-10 mm) in the field strength of 2000 to 3000 G.

The iron grade in the pre-processed product is approximately 24%. Considering the grade of iron and also the need to grinding it to very small dimensions, step by step removing gangue minerals to produce a high-grade product is the most optimal solution. By removing mineral fines including silica in larger dimensions, and then grinding the remaining product, a higher grade of Fe can be achieved in the final product. For this purpose, step-by-step crushing and separation tests have been performed for the pre-processed product. In the first stage, the pre-processed product was grinded to a size of

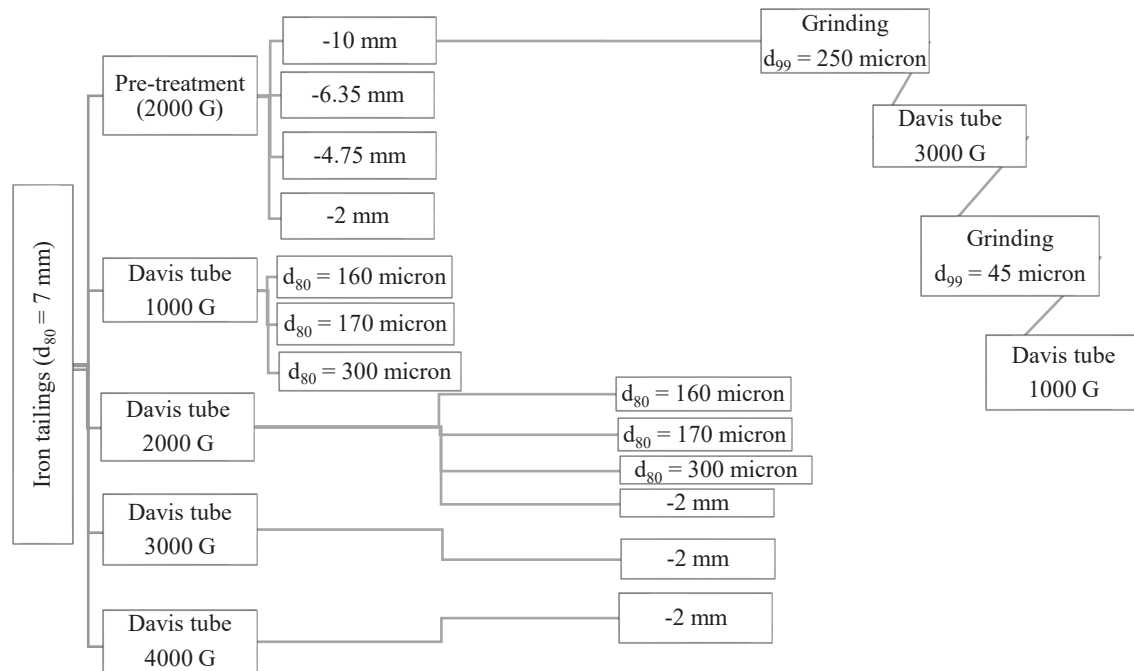


Figure 1. Schematic of grinding and magnetic separation tests of iron ore processing plant tailings

Table 1. The results of magnetic pre-processing tests (2000 G - dry)

Particle size (mm)	Products	Weight (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe (T) (%)	Recovery (%)
	Feed	100.00	43.35	9.77	
0-10	Concentrate	20.23	28.07	24.77	51.29
	Tail	79.77	44.89	5.40	
0-6.35	Concentrate	19.04	29.98	24.19	47.14
	Tail	80.96	45.44	5.43	
0-4.75	Concentrate	22.14	29.63	23.90	54.14
	Tail	77.86	46.30	5.13	
0-2	Concentrate	20.75	30.07	24.21	51.41
	Tail	79.25	46.34	5.24	

fewer than 250 microns (by a rod mill with a 10 to 1 ratio of grinding media to the feed into the mill). Then, the Davis tube test with 3000 G intensity was performed on it. During this test, 45.85% of the input load (weight recovery) with a total iron grade of more than 42% was recovered to the concentrate. The amount of silica in the concentrate also reached less than 20%.

The 3000 G concentrate was grinded again in a rod mill, and a product with dimensions less than 45 microns was produced (grinding time is approximately 25 minutes). A magnetic separation test was performed on the grinded product (with the same operating conditions as before) with a field strength of 1000 G. By performing the grade enrichment in the first cleaning step, a concentrate with a grade of more than 65% Fe was obtained with a recovery of 76% for iron.

## CONCLUSIONS

Based on the results of this research, with the magnetic pre-processing of iron processing plant tailings (with an iron grade of 10%) without grinding, under the field strength of 2000 G and by the dry method, about 80% of the input load to the drum of 2000 G, with iron grade about 5% (which are mainly non-magnetic minerals) is transferred to tail. Due to the lack of comminution at this stage, energy consumption

will be saved. The pre-processed product is 20% by weight of the load entering the drum, which its iron grade is about 24% and is mainly due to the magnetite mineral. Due to the interlocking of magnetite with gangue minerals, the right degree of liberation for magnetite (90%) is obtained in dimensions less than 45 microns. On the other hand, considering the grade of silica more than 30% in the pre-processed product, in order to prevent the production of fine particles and grinding all the particles to the desired dimensions, comminution and stepwise separation are suggested as the best solution. If all the pre-processed product is comminuted in one step, a significant number of fine particles will be produced. In this case, in addition to the high consumption of comminution energy, fine particles will reduce the efficiency of magnetic separation by creating a cover on magnetite particles and also agglomeration. However, with step-by-step comminution and magnetic separation, a concentrate with an iron grade of more than 66% will be produced.

## REFERENCES

- [1] Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., and Keir, G. (2015). "A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies". *Journal of Cleaner Production*, 108: 1050-1062.
- [2] Carmo, F. F., Kamino, L. H. Y., Junior, R. T., de Campos, I. C., do Carmo, F. F., Silvino, G., and Pinto, C. E. F. (2017). "Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context". *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15(3): 145-151.
- [3] Abaka-Wood, G. B., Zanin, M., Addai-Mensah, J., and Skinner, W. (2019). "Recovery of rare earth elements minerals from iron oxide-silicate rich tailings-Part 1: Magnetic separation". *Minerals Engineering*, 136: 50-61.



## بازیافت آهن از باطله‌های کارخانه سنگ آهن بالستان

عاطاله بهرامی<sup>۱\*</sup>، فاطمه ایمانی<sup>۲</sup>، فاطمه کاظمی<sup>۳</sup>، میر صالح میرمحمدی<sup>۴</sup>، مرتضی رفیعی<sup>۵</sup>

- ۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه
- ۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه
- ۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان
- ۴- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران
- ۵- کارشناسی، گروه مهندسی معدن، معاون معدنی گروه صنعتی پارس ساختار (آهن بالستان)

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴

### چکیده

با افزایش تقاضای جهانی و همچنین توسعه سریع صنایع آهن و فولاد، مقدار باطله‌های تولید شده ناشی از معدنکاری و فرآوری این فلز، افزایش یافته است. بازفرآوری باطله‌های کارخانه‌های فرآوری سنگ آهن، از دیدگاه اقتصادی (به عنوان منبع ثانویه آهن) و محیط زیستی حایز اهمیت است. هدف از تحقیق حاضر تعیین روشی بهینه برای بازیابی آهن از باطله‌های کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی بالستان است. بدین منظور پس از نمونه‌برداری از دپوهای مختلف باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن بالستان (واقع در شمالغرب ایران) یک نمونه معرف انتخاب و بر روی آن آنالیزهای شیمیایی، کانی‌شناسی، توزیع دانه‌بندی و تعیین اندیس کار باند انجام گرفت. عیار آهن کل در باطله حدود ۱۰ درصد اندازه‌گیری شد که ۸٫۵ درصد از آن در قالب کانی مگنتیت (با درجه آزادی کمتر از ۴۰ درصد) شناسایی شد. مقدار  $d_{80}$  نمونه ۷ میلی‌متر و اندیس باند (Kwh/ton) ۱۱٫۸۴ اندازه‌گیری شد. برای تعیین روش مناسب بازیابی آهن، آزمایش‌های پیش‌فرآوری مغناطیسی، خردایش و دیویس تیوب انجام گرفت. با پیش‌فرآوری مغناطیسی باطله با اندازه ذرات ۱۰-۰ میلی‌متر، تحت میدان ۲۰۰۰ گاوس و به روش خشک، حدود ۸۰ درصد از بار ورودی به درام با عیار آهن کل ۵ درصد به باطله منتقل می‌شود. ۲۰ درصد از بار ورودی با عیار آهن تقریباً ۲۴ درصد به کنسانتره بازیابی می‌شود. برای حذف کانی‌های باطله و پرعیارسازی کنسانتره پیش‌فرآوری شده، خردایش و جدایش مرحله‌ای بهترین نتیجه را داشته است. خردایش در دو مرحله برای تولید محصولاتی به ترتیب با ابعاد کمتر ۲۵۰ و ۴۵ میکرون انجام گرفت. جدایش مغناطیسی نیز در سه مرحله با شدت میدان‌های ۳۰۰۰ و دو مرحله جدایش با میدان ۱۰۰۰ گاوس انجام شد که در نهایت کنسانتره با عیار آهن کل بیش از ۶۶ درصد و بازیابی آهن ۴۴٫۸۸ درصد حاصل گردید.

### کلمات کلیدی

باطله‌های آهن، پیش‌فرآوری، پرعیارسازی مرحله‌ای، خردایش، مصرف انرژی.

### استناد به این مقاله

بهرامی، ع، ایمانی، ف، کاظمی، ف، میرمحمدی، م. ص، رفیعی، م؛ ۱۴۰۲؛ "بازیافت آهن از باطله‌های کارخانه سنگ آهن بالستان". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۴، ص ۱۳۵-۱۱۹.

DOI: 10.30479/JMRE.2023.18475.1629



## ۱- مقدمه

حسب نوع کانه اولیه، پتانسیل استحصال سایر کانی‌ها و فلزات مانند مس، کبالت، گالیم، عناصر نادر خاکی، طلا و نظایر آنها را نیز دارند [۷]. از طرف دیگر، از باطله‌های کارخانه‌های فرآوری آهن به صورت موفقیت‌آمیزی در تولید مصالح ساختمانی از جمله بتن و سرامیک، با ویژگی‌های منحصر بفرد استفاده شده است. مطالعات حاکی از افزایش مقاومت فشاری با افزایش مقدار پودر باطله‌های آهن (حاوی سیلیس)، در ترکیب سیمان است. بر اساس نتیجه مطالعات SEM (جهت شناسایی میکروساختارها)، استفاده از پودر باطله‌های آهن موجب پر شدن فضاهای خالی در ساختار بتن می‌شود. از طرفی وجود ذرات بسیار ریزدانه موجود در باطله‌های آهن، موجب سمناسیون قوی بین ذرات آهن موجود در باطله، با سایر ترکیبات سیمان می‌شود [۸، ۹]. همچنین بر اساس مطالعه انجام شده توسط لئو و همکاران از باطله‌های کانه آهن به دلیل آلومینا-سیلیکات محتوی، می‌توان در تولید سیمان پرتلند استفاده کرد.

در طی تحقیقی روچا و همکاران به بررسی بازفرآوری باطله‌های آهن حاصل از سرریز مرحله نرمة‌زدایی به وسیله هیدروسیکلون، در کارخانه فرآوری سنگ آهنی در کشور برزیل پرداختند. نمونه مورد مطالعه حاوی ۸۶ درصد جرمی، از ذرات با اندازه کمتر از ۷ میکرون بوده و همچنین مقدار Fe آن برابر با ۳۸ و مقادیر  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  به ترتیب برابر ۳۷ و ۴٫۳ درصد بوده است. بر اساس نتایج، کنسانتره‌ای با عیار ۶۷ درصد Fe، بازیابی وزنی ۴۲ درصدی و بازیابی متالورژیکی ۸۱ درصدی حاصل شد [۱۰]. پدروزا، مطالعات و آزمایش‌های فرآوری باطله‌های آهن را بر روی نمونه‌ای با  $d_{50} = 5.1$  میکرون که حاوی ۴۹ درصد Fe، ۱۰ درصد  $SiO_2$  و ۹٫۳ درصد  $Al_2O_3$  بود، انجام داد. در نهایت کنسانتره‌ای با عیار ۶۲ درصد Fe و بازیابی ۳۵ درصدی آهن گزارش شد [۱۱]. پرز و همکاران به بازفرآوری باطله‌های ریزدانه جداکننده مغناطیسی از باطله‌های یک کارخانه فرآوری، با  $d_{80} = 15$  میکرون،  $d_{50} = 25$  میکرون و مقادیر Fe،  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  به ترتیب برابر ۳۶، ۲٫۸ و ۴۳ درصد پرداختند. بهترین نتایج حاصل به صورت بازیابی ۸۵ درصدی برای کنسانتره حاوی ۶۶ درصد Fe بوده است [۱۲]. ماتیلو و همکاران، مطالعه‌ای در رابطه با فرآوری باطله‌های ریزدانه آهن با  $d_{50} = 10$  میکرون که حاوی ۴۵ درصد Fe، ۲۹ درصد  $SiO_2$  و ۳٫۲ درصد  $Al_2O_3$  بوده، انجام دادند. در این حالت عیار Fe در کنسانتره ۶۳ درصد، بازیابی وزنی آن ۶۸ درصد

بشر در تمام طول عمر خود به معادن و ذخایر معدنی نیاز دارد. بهره‌وری از معادن برای رفع نیازهای بشر، موجب پدیدار شدن باطله‌های معدنی می‌شود [۱]. باطله‌های معدنی حین مراحل استخراج، فرآوری و پالایش مواد معدنی تولید خواهند شد که باطله هر یک از این مراحل ویژگی‌های منحصر بفرد دارد [۲]. استخراج شامل جدایش کانه از سنگ‌های میزبان است که به طور معمول از طریق عملیات‌های انفجار و آتشباری انجام می‌گیرد. بیشترین مقدار باطله تولیدی مربوط به مرحله استخراج بوده که شامل خاک‌های سطحی، روباره، سنگ باطله و همچنین پسماندهای پس از استخراج مواد معدنی از کانه است. حجم باطله‌های تولید شده در این مرحله به اندازه معدن، تضادهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی بین کانه و سنگ میزبان آن و کیفیت فنی عملیات معدنکاری بستگی دارد [۲]. در طی عملیات فرآوری، کانه تحت فرآیندهای مختلف خردایش و جدایش قرار گرفته که انجام این فرآیندها به تولید باطله منجر خواهد شد. باطله‌های مرحله فرآوری اگر چه حجم کمتری نسبت به باطله‌های مرحله استخراج دارند، اما به دلیل وجود بخش‌های کوچک از فلزات و سایر عناصر باارزش قابل بازیابی، اهمیت چشمگیری دارند. ارزش‌گذاری باطله‌های فرآوری مواد معدنی یک مساله جدی و قابل تامل در صنعت معدنی بوده؛ زیرا هم معضلات مربوط به عرضه را کاهش داده و هم پایداری منابع تجدیدناپذیر را به حداکثر می‌رساند [۳]. از طرف دیگر، با فرآوری مجدد باطله‌های کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، پاره‌ای از معضلات محیط زیستی ناشی از انباشت باطله‌ها شامل تولید زهاب‌های قلیایی و اسیدی، تولید گرد و غبار حاوی انواع مواد مضر مانند رادیونوکلوئیدها، سیلیس ریز، فلزات سنگین و نیمه سنگین، اشغال زمین و کاهش کاربری آن، نیز مرتفع خواهد شد [۴].

در سال‌های اخیر با افزایش تقاضای جهانی و همچنین توسعه سریع صنایع آهن و فولاد، مقدار باطله‌های تولید شده ناشی از معدنکاری و فرآوری این فلز، افزایش یافته است. این باطله‌های انباشت شده، نه تنها موجب صدمات محیط زیستی جدی شده، بلکه یک خطر بالقوه در رابطه با مصرف و اتلاف منابع معدنی‌اند [۵، ۶]. بازفرآوری باطله‌های کارخانه‌های فرآوری آهن همگام با مرتفع شدن چالش‌های محیط زیستی، مزایای چشمگیری نیز به همراه خواهد داشت. دپوهای باطله کارخانه‌های فرآوری سنگ آهن علاوه بر امکان بازیابی آهن، بر

نخواهد داشت، زیرا دپوهای باطله کارخانه‌های فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی باقیمانده فرآیندهای فرآوری بوده که با توجه به تیپ کانه‌زایی اولیه حاوی انواع کانی‌های باارزش و باطله با مینرالیزاسیون پیچیده‌تری نسبت به خوراک اولیه کارخانه هستند. به طور کلی، با خردایش بهینه باطله‌های آهن سنگ آهن دانه‌بندی (برای دستیابی به درجه آزادی مناسب)، می‌توان از روش‌های جدایش مغناطیسی برای بازیابی آهن از باطله‌ها استفاده کرد، اما با توجه تفاوت درجه آزادی کانی‌های باارزش موجود در باطله‌های سنگ آهن و لزوم خردایش تا ابعاد بسیار ریز، روش جدایش مغناطیسی برای کانی‌های آهن، با مشکلات عدیده‌ای از جمله راه‌یابی ذرات باطله به کنسانتره آهن مواجه خواهد شد. از طرفی وجود سایر کانی‌های دارای خاصیت مغناطیسی ضعیف موجب کاهش عیار کنسانتره مغناطیسی و در نتیجه پایین آمدن بازدهی جدایش می‌شود. تحقیق حاضر بنا بر آن دارد که با شناسایی ویژگی‌های کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی، باطله‌های کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی، به ارایه راهکاری مناسب برای بازیابی آهن از آنها بپردازد.

## ۲- مواد و روش

### ۲-۱- معرفی نمونه

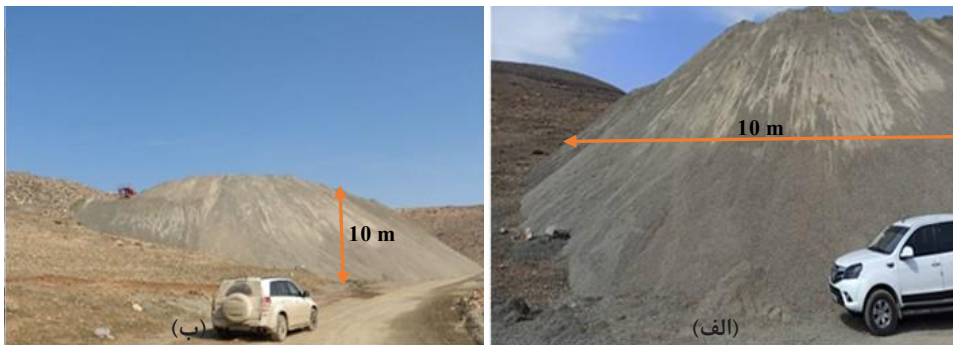
باطله مورد مطالعه متعلق به کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی بالستان واقع در شمالغرب ایران- استان آذربایجان غربی است. تناژ تقریبی باطله این کارخانه فرآوری ۵۰۰ هزار تن با عیار آهن تقریباً ۱۰ درصد است (شکل ۱). برای نمونه‌برداری از دپوهای باطله کارخانه، برای شناسایی خواص، انجام آزمایش‌های فرآوری و تعیین روش بهینه برای بازیابی آهن، از یک دستگاه بیل مکانیکی استفاده شد. برای برداشت نمونه، دپوهای باطله به تقریباً ۲۰ بخش تقسیم و به وسیله بیل مکانیکی از آنها نمونه‌برداری به عمل آمد (شکل ۲- الف). در هر مرحله، پس از اختلاط‌های متوالی نمونه به وسیله بیل مکانیکی، مقدار یک باکت بیل از هر قسمت برداشت گردید (شکل ۲- ب)، سپس تمامی نمونه‌های برداشت شده، در یک قسمت انباشت و به طور کامل با یکدیگر مخلوط شدند. در نهایت به روش نمونه‌برداری مخروطی، نمونه معرفی با وزن تقریبی ۵۰۰ کیلوگرم انتخاب و برداشت گردید (شکل ۲- ج).

### الف) آنالیزهای تعیین ترکیب شیمیایی و

کانی‌شناسی: بر روی نمونه معرف باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی، آنالیزهای XRF، XRD، شیمی تر و

و بازیابی آهن ۹۴ درصد گزارش شد [۱۳]. لی و همکاران، به بررسی بازیابی آهن از باطله‌های قدیمی کارخانه‌های فرآوری آهن، با استفاده از تکنولوژی ابداعی جدایش محصول کلسیناسیون- مغناطیسی (SRMS) پرداختند. در این مطالعه تاثیر کلسیناسیون و خواص محصول به دست آمده از آن با استفاده از آنالیزهای مختلف بررسی شد. استفاده از این راهکار، برای خوراک با اندازه ذرات کمتر از ۳۸ میکرون و عیار ۱۷۳ درصدی برای Fe، به تولید کنسانتره‌ای با عیار ۶۷٫۰۹ درصد Fe و بازیابی ۸۵٫۹۳ درصد منجر شده است. نتایج آنالیزها نیز نشان می‌دهد که روش SRMS به بهبود تخلخل محصولات و تسهیل در خردایش و جدایش آنها منجر می‌شود. لازم به ذکر است که این راهکار به عنوان یک روش دوستدار محیط زیست برای بازفرآوری باطله‌های آهن شناخته شده است؛ زیرا علاوه بر حذف باطله‌ها از محیط و بازفرآوری آنها، روش ابداعی مورد استفاده فاقد تاثیرات منفی بر محیط زیست است [۹].

باطله‌های کارخانجات فرآوری سنگ آهن به دو دسته باطله‌های کارخانه‌های فرآوری تولید کنسانتره آهن ( $d_{80} = 90 \text{ micron}$ ) و باطله‌های کارخانه‌های فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی (محصول در دو کلاسه ابعادی ۱۰-۰ میلی‌متر (Fine) و ۳۰-۱۰ میلی‌متر (Lump))، تقسیم می‌شوند. باطله‌های کارخانجات فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی با توجه به نوع فرآیند جدایش، توزیع ابعادی درشت‌تری (به طور معمول ۱۰-۰ میلی‌متر) دارند. یک مساله قابل توجه در رابطه با فرآوری باطله‌های کارخانه‌های سنگ آهن دانه‌بندی، وجود باطله‌هایی مانند سیلیس و آلومینا در ابعاد ریز است [۱۴]. از طرفی بالا بودن میزان درگیری کانی‌های آهن‌دار با سایر کانی‌های باارزش و باطله، در نتیجه کاهش درجه آزادی، فرآوری این ذخایر را از نقطه نظر دستیابی به عیار و بازیابی مطلوب با چالش مواجه کرده است. از این‌رو، برای پیش‌بینی رفتار باطله‌های آهن در طی فرآیندهای فرآوری، اطلاعات کانی‌شناسی مختلفی مورد نیاز است [۱۵، ۱۶]. مساله اساسی بعدی در رابطه با فرآوری باطله کارخانجات فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی، تعیین روش‌های مناسب فرآوری و چیدمان آنها با توجه به تفاوت‌های خواص کانی‌شناسی کانی‌های باارزش موجود در آن است. عملیات‌های واحد از جمله خردایش، طبقه‌بندی، پرعیارسازی ثقیل، جدایش مغناطیسی و فلوتاسیون تکنیک‌های متداول برای فرآوری ذخایر آهن هستند. استفاده از روش‌های متداول فرآوری، نتیجه مطلوبی را برای فرآوری ذخایر باطله آهن



شکل ۱: تصاویری از الف) طول و ب) ارتفاع دپوهای باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی بالستان



شکل ۲: مراحل نمونه‌برداری از دپوهای باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی بالستان

جدول ۱: آنالیز XRF باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی بالستان

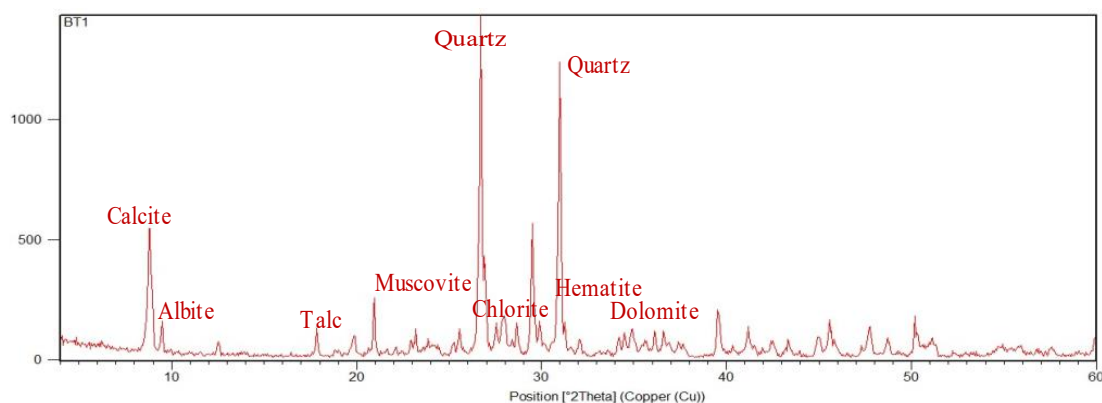
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe(T)	K <sub>2</sub> O
۴۳٫۳۵	۹٫۸۲	۹٫۳۹	۹٫۷۷	۳٫۸۵
MgO	S	TiO <sub>2</sub>	LOI	
۴٫۴۸	۰٫۷۷	۰٫۹۲	۱۰٫۸۰	

(Pr, Nd, Sm) ذخیره باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن مورد مطالعه (۳۵ ppm) است؛ مجموع عیار عناصر نادر سنگین (HREE شامل Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) این ذخیره نیز ۱۵٫۲ (ppm) اندازه‌گیری شده است. با توجه به مقادیر محاسبه شده، نسبت عناصر نادر سبک به سنگین ۲٫۳۰ است. مجموع مقادیر محاسبه شده برای REE، (ppm) ۵۰٫۲ است. با در نظر گرفتن روش‌های فرآوری و استحصال عناصر نادر خاکی و همچنین عیار پایین این عناصر در ذخیره باطله، استحصال REE از دپوی باطله از دیدگاه اقتصادی فعلاً مقرون به صرفه نخواهد بود. رخداد عناصر نادر خاکی نشان می‌دهند که سیالات مسوول کانه‌زایی آهن فوگاسیته بالای اکسیژن دارند و در محدوده دمایی کمتر از ۲۵۰ درجه

ICP-MS انجام گرفته است. بر اساس جدول ۱ که نشان‌دهنده نتایج آنالیز XRF باطله سنگ آهن است، SiO<sub>2</sub> عمده‌ترین ترکیب شناسایی شده در باطله است. مقدار آهن کل در باطله تقریباً ۱۰ درصد است. بر اساس نتایج آنالیز شیمی تر، مقدار FeO در این نمونه ۳٫۶۸ درصد گزارش شده است. بر این اساس می‌توان گفت که ۸٫۵۸ درصد آهن موجود در باطله مربوط به کانی مگنتیت و ۱٫۴۲ درصد آن مربوط به کانی‌های غیرمگنتیت است. نتایج آنالیز XRD نیز نشان‌دهنده آن است (شکل ۳) که کوارتز، دولومیت، مسکویت، کلسیت، آلبیت و تالک فازهای اصلی موجود در باطله کارخانه فرآوری آهن بالستان هستند. پتاسیم فلدسپار، کلریت و مگنتیت (و هماتیت در مقادیر بسیار اندک) نیز فازهای فرعی موجود در نمونه بوده‌اند. با توجه به تاثیرپذیری بالای مگنتیت از میدان مغناطیسی و عدم وجود خاصیت مغناطیسی (یا خاصیت مغناطیسی ضعیف) در سایر کانی‌های موجود در ذخیره باطله کارخانه فرآوری بالستان، روش‌های جدایش مغناطیسی کارآیی مناسبی در پرعیارسازی این ذخیره خواهند داشت.

با انجام آنالیز ICP-MS مشاهده گردید (جدول ۲) که مقدار مجموع عیار عناصر نادر سبک (LREE شامل La, Ce,





شکل ۳: آنالیز XRD باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی بالستان

جدول ۲: نتایج آنالیز ICP-MS باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی بالستان

Cu	Cr	Co	Ce	Cd	Ca	As	Al	Ag	عنصر
ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	واحد
۱۴۶	۵۴	۲۰	۳۴	۰٫۴	>۲	۲۶٫۳	>۲	<۰٫۰۵	مقدار
Sb	S	Pb	P	Ni	Mo	Mn	Mg	Li	عنصر
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	واحد
۱٫۱	۴۰٫۶۳	۳۱	۱۹۰٫۶	۱۹	۷٫۸	۱۱۷۷	>۲	۱	مقدار
	Th	Sc	La	Fe	Zn	Yb	Y	V	عنصر
	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	واحد
	۵٫۹	۳٫۲	۱	>۲	۲۰٫۷	۱٫۲	۱۴	۲۶	مقدار

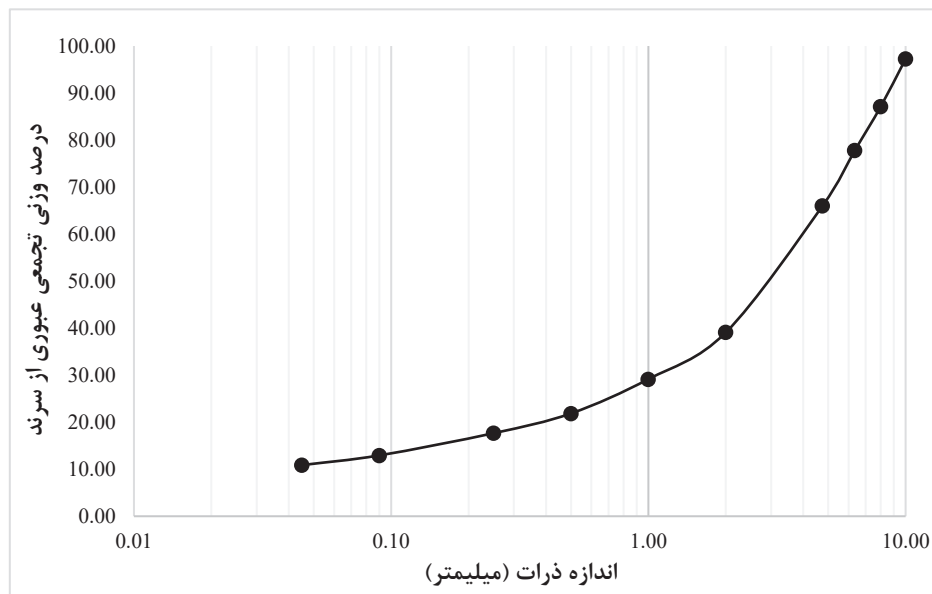
۱۰ درصد بوده و همچنین عیار ۸٫۵۰ درصدی مگنتیت، خردایش تمامی باطله برای دستیابی به درجه آزادی مناسب (بیش از ۹۰ درصد) صرفه اقتصادی نخواهد داشت، بنابراین با یک پیش‌فرآوری ساده و ارزان از جمله جدایش مغناطیسی می‌توان بخش قابل توجهی از باطله را، به عنوان باطله نهایی حذف کرد. به عبارت دیگر با استفاده از جدایش مغناطیسی و در نظر گرفتن حداکثر بازیابی برای کانی‌های آهن (مگنتیت)، با حذف بخشی از کانی‌های باطله می‌توان به یک تغلیظ اولیه برای باطله دست یافت و حجم بار ورودی به فرآیندهای خردایش و جدایش پایین دست را به میزان چشمگیری کاهش داد. در این راستا آزمایش‌های جدایش مغناطیسی با شدت میدان مغناطیسی ۲۰۰۰ گاوس، برای حالات مختلف اندازه ذرات بار ۱۰-، ۰-۶٫۳۵، ۰-۴٫۷۵ و ۰-۲ میلی‌متر انجام گرفته است. هر آزمایش بر روی نمونه‌ای با وزن تقریبی ۵۰ کیلوگرم انجام گرفته است. محدوده‌های ابعادی مختلف برای بررسی دستیابی به بهینه‌ترین حالت جدایش مغناطیسی، در بزرگترین

سانتی‌گراد موجبات نهشت آهن را در منطقه فراهم کرده‌اند [۱۷].

(ب) آنالیز تعیین توزیع دانه‌بندی: در شکل ۴، نمودار توزیع دانه‌بندی باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی نشان داده شده است. بر اساس نتایج این آنالیز، بیشترین درصد وزنی ذرات (حدود ۳۰ درصد) اندازه‌ای در محدوده ۴٫۷۵ تا ۲ میلی‌متر دارند. پس از آن ذرات با اندازه ۸+ میلی‌متر، بیشترین فراوانی وزنی را دارند (۱۳ درصد وزنی). مقادیر  $d_{25}$  و  $d_{80}$  ذرات باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی نیز به ترتیب ۶۰۰ میکرون و ۷ میلی‌متر است.

## ۲-۲- آزمایش‌های خردایش و جدایش مغناطیسی

برای دستیابی به بازیابی حداکثری آهن از باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن بالستان، بر روی باطله این کارخانه آزمایش‌های پیش‌فرآوری صورت گرفته است. به دلیل عیار بسیار پایین آهن در ذخیره باطله کارخانه فرآوری که تقریباً



شکل ۴: نمودار توزیع دانه‌بندی باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی بالستان

درصد و کانی‌های کوارتز، دولومیت، مسکویت، کلسیت، آلبیت، پتاسیم فلدسپار و کلریت است. در ذخیره باطله مورد مطالعه، مقدار  $\text{SiO}_2$  بیش از ۴۳ درصد بوده؛ که عمدتاً در قالب کانی کوارتز تشکیل شده است. کوارتز به دلیل سختی بالا، به افزایش انرژی خردایش منجر خواهد شد، بنابراین با حذف کوارتز و سایر کانی‌های باطله در مرحله پیش‌فرآوری، انرژی خردایش تا میزان چشمگیری کاهش خواهد یافت؛ زیرا این بخش از باطله حجم قابل توجهی دارد. از طرف دیگر با حذف بخش عمده‌ای از کانی‌های باطله در مرحله پیش‌فرآوری، حجم بار ورودی به مدار خردایش و سایر مراحل پری‌ارسازی کاهش خواهد یافت. مقدار اندیس کار باند باطله کارخانه فرآوری آهن  $11,84 \text{ (Kwh/ton)}$  اندازه‌گیری شده است. بر اساس مقدار  $W_i$  تعیین شده، به محاسبه انرژی لازم برای خردایش هر تن از ذخیره باطله تا ابعاد مختلف، بر اساس رابطه ۱ پرداخته شده است. در شکل ۶ نتایج مربوط به این محاسبات آمده است. با توجه به شکل با کاهش اندازه ذرات، مقدار انرژی لازم برای خردایش هر تن از باطله، با یک معادله چندجمله‌ای درجه دوم  $(y = 0.13x^2 - 2.65x + 11.67)$  افزایش یافته است. انرژی لازم برای خردایش باطله تا ابعاد  $6,35$  میلی‌متر  $(d_{80} = 3500 \text{ micron})$   $0,59$  کیلووات ساعت است؛ در حالی که با کاهش ابعاد تا حدود  $150$  میکرون (برای دستیابی به درجه آزادی حدود  $70$  درصدی برای کانی‌های آهن‌دار)، انرژی

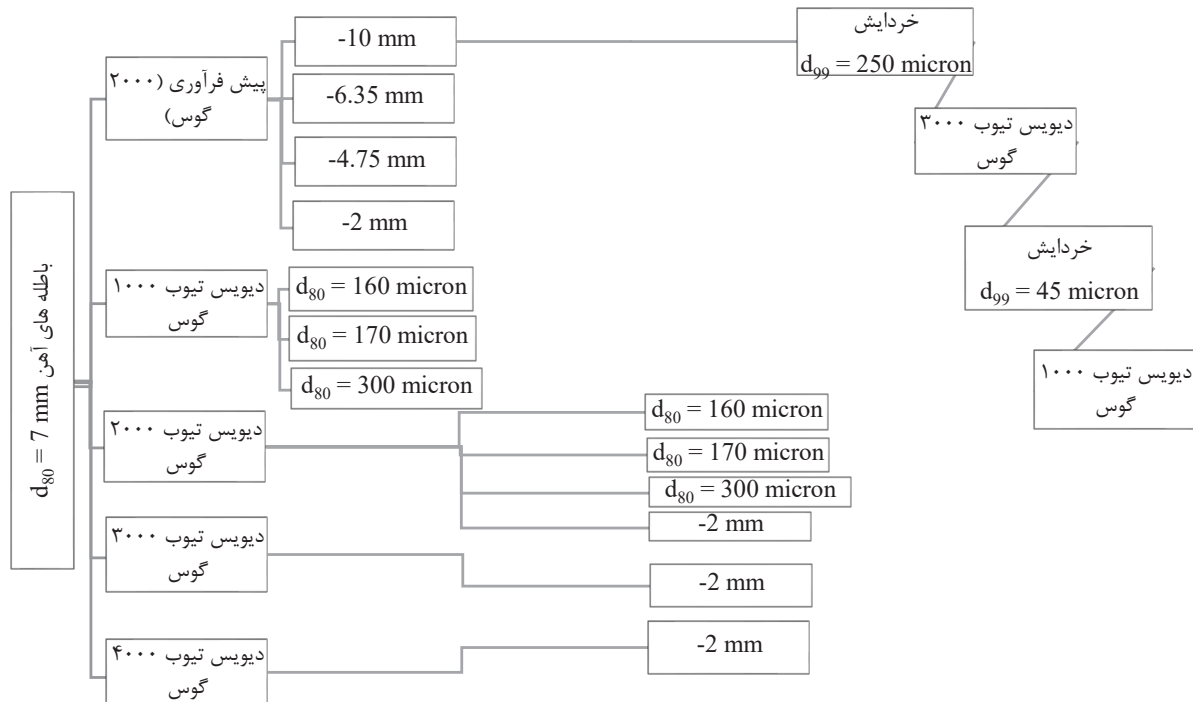
ابعاد ممکن (خردایش کمتر) انتخاب شده‌اند.

برای تعیین شرایط بهینه بازیابی آهن از باطله کارخانه فرآوری به وسیله روش جدایش مغناطیسی، بر روی باطله آزمایش‌های خردایش و دیویس تیوب (در شدت میدان‌های  $1,000$ ،  $2,000$ ،  $3,000$  و  $4,000$  گاوس) انجام گرفته است. در تمامی حالات هدف تعیین اندازه بهینه ذرات برای جدایش مغناطیسی بوده است؛ یعنی حالتی که به بالاترین عیار و بازیابی برای آهن منجر شود. جدایش در ابعاد بالاتر از دیدگاه مصرف انرژی و خردایش کمتر مطلوب است، از این‌رو محدوده‌های ابعادی بزرگتر نیز تحت آزمایش قرار گرفته‌اند ( $2$  میلی‌متر). محدوده‌های ابعادی ریزتر نیز بر اساس درجه آزادی کانی مگنتیت انتخاب شده‌اند ( $45$  میکرون). در شکل ۵، شمای کلی آزمایش‌های انجام گرفته، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در هر آزمایش دیویس تیوب نمونه‌ای به وزن  $20$  گرم، تحت شدت میدان مورد نظر و در شرایط دبی آب  $0,4 \text{ l/min}$ ، به مدت  $2$  دقیقه تحت جدایش قرار گرفته است.

### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱- پیش‌فرآوری مغناطیسی باطله‌های آهن

بر اساس آنالیزهای تعیین ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی (XRF & XRD)، باطله کارخانه فرآوری مورد مطالعه مخلوطی از کانی‌های اکسیدی آهن (به ویژه مگنتیت) با عیار تقریباً  $10$



شکل ۵: شمای آزمایش‌های خردایش و جدایش مغناطیسی باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی

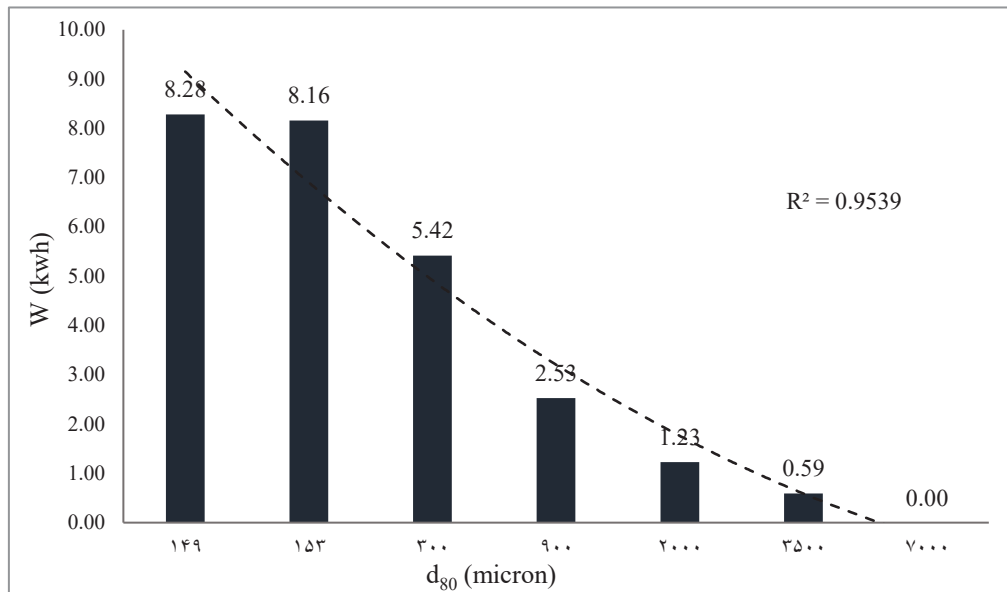
آهن در مرحله پیش‌فرآوری نیز بیش از ۵۰ درصد خواهد بود. با انجام پیش‌فرآوری مغناطیسی، عیار  $\text{SiO}_2$  به کمتر از ۳۰ درصد کاهش یافته است، در حالی که مقدار آن در خوراک بیش از ۴۳ درصد بوده است. کاهش مقدار این ترکیب از دیدگاه کاهش انرژی خردایش در مراحل خردایش بعدی و همچنین کاهش میزان تولید نرمة و تاثیر نامطلوب آن بر جدایش مغناطیسی، حایز اهمیت است، بنابراین می‌توان گفت که انجام پیش‌فرآوری مغناطیسی به روش خشک، برای ذخیره باطله بدون انجام هیچ مرحله خردایش یا طبقه‌بندی (۱۰-۰ میلی‌متر) در شدت میدان ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ گاوس پیشنهاد می‌شود.

بر روی محصول مرحله پیش‌فرآوری مجدداً آزمایش تعیین اندیس باند انجام گرفته است. مقدار اندیس باند محصول پیش‌فرآوری شده (Kwh/ton) ۱۲٫۷۲ اندازه‌گیری شده است. با مقایسه این مقدار، با اندیس باند نمونه اولیه (باطله کارخانه فرآوری)، مشاهده می‌شود که میزان اندیس باند برای محصول پیش‌فرآوری شده افزایش یافته است. بر اساس آنالیز XRD، کانی‌های کلسیت و دولومیت جزو فازهای اصلی تشکیل‌دهنده این ذخیره هستند. این کانی‌ها در مقایسه با کانی‌های اکسیدی آهن (در اینجا به ویژه مگنتیت)، اندیس باند پایین‌تری دارند.

خردایش هر تن از باطله به بیش از ۷ برابر افزایش یافته است. با افزایش میزان خردایش، اندازه ذرات تولید شده با سرعت کمتری نسبت به مراحل اولیه خردایش (ذرات درشت‌تر)، کاهش می‌یابد. هنگامی که ذرات درشت‌تر هستند، شکست در مرزهای بین دانه‌ها رخ داده؛ اما با کاهش اندازه ذرات و کم شدن تعداد دانه‌ها در یک ذره، خردایش سخت‌تر شده و انرژی بیشتری برای کاهش ابعاد ذره لازم است.

$$W = 10W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (1)$$

در جدول ۳ نتایج آزمایش‌های پیش‌فرآوری به روش جدایش مغناطیسی خشک، در شدت میدان ۲۰۰۰ گاوس برای ذخیره باطله مورد مطالعه آمده است. پیش‌فرآوری به روش مغناطیسی، برای خوراک در ابعاد مختلف انجام گرفته است. با توجه به جدول ۳، تغییر در ابعاد خوراک، تاثیر چشمگیری بر عیار آهن نداشته است. تغییرات وزن محصول مغناطیسی، نیز با تغییر در ابعاد خوراک روند محسوس و مشخصی نداشته است. به طور کلی با انجام مرحله پیش‌فرآوری مغناطیسی، حدود ۲۰ درصد وزنی از بار ورودی با عیار آهن کل تقریباً ۲۴ درصد، به محصول مغناطیسی بازیابی می‌شود. مقدار بازیابی



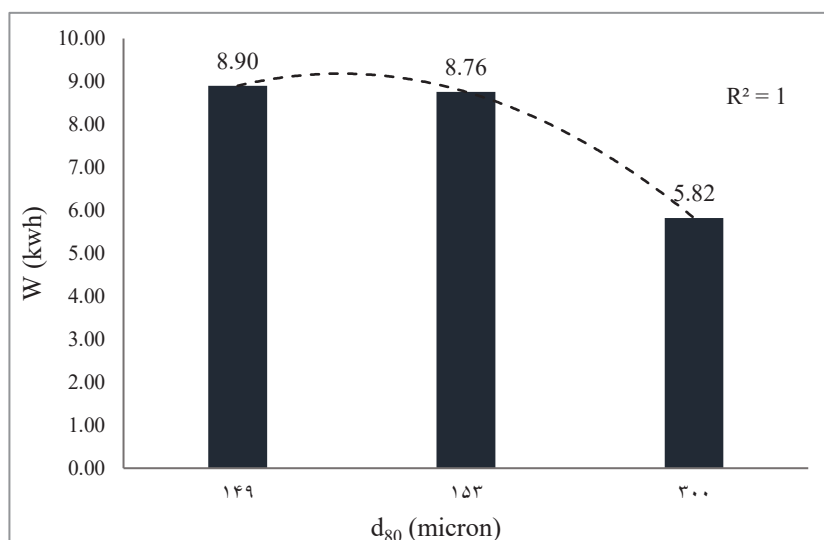
شکل ۶: مقدار انرژی لازم برای خردایش هر تن از باطله کارخانه فرآوری آهن در ابعاد مختلف

جدول ۳: نتایج آزمایش‌های پیش‌فرآوری مغناطیسی (۲۰۰۰ گاوس - خشک) باطله کارخانه فرآوری

بازیابی (%)	اندازه ذرات خوراک (mm)			محصولات	وزن (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe (T) (%)
	۰ - ۱۰	۰ - ۶۳۵	۰ - ۴۷۵				
۵۱٫۲۹	خوراک	۱۰۰٫۰۰	۴۳٫۳۵	۹٫۷۷	کنسانتره	۲۸٫۰۷	۲۴٫۷۷
	باطله	۷۹٫۷۷	۴۴٫۸۹	۵٫۴۰			
۴۷٫۱۴	خوراک	۱۹٫۰۴	۲۹٫۹۸	۲۴٫۱۹	کنسانتره	۲۹٫۶۳	۲۴٫۲۱
	باطله	۸۰٫۹۶	۴۵٫۴۴	۵٫۴۳			
۵۴٫۱۴	خوراک	۲۲٫۱۴	۲۹٫۶۳	۲۳٫۹۰	کنسانتره	۳۰٫۰۷	۲۴٫۲۱
	باطله	۷۷٫۸۶	۴۶٫۳۰	۵٫۱۳			
۵۱٫۴۱	خوراک	۲۰٫۷۵	۳۰٫۰۷	۲۴٫۲۱	کنسانتره	۳۰٫۰۷	۲۴٫۲۱
	باطله	۷۹٫۲۵	۴۶٫۳۴	۵٫۲۴			

از آنجایی که برای تولید کنسانتره آهن با عیار بالا، لازم است که کانی مگنتیت به درجه آزادی مطلوب برسد؛ باید محصول پیش‌فرآوری شده تحت خردایش در آسیا قرار گیرد. در شکل ۷، مقادیر انرژی لازم برای خردایش هر تن از محصول پیش‌فرآوری شده به وسیله آسیا، در ابعاد مختلف آمده است. با مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که مقدار انرژی لازم برای خردایش تا ابعاد کمتر از ۱۵۰ میکرون برای محصول پیش‌فرآوری شده با خوراک اولیه (باطله)، ۰٫۶۲ کیلووات ساعت (حدود ۷ درصد) افزایش یافته است. مقدار انرژی لازم برای خردایش هر تن از محصول پیش‌فرآوری شده تا رسیدن

با انجام پیش‌فرآوری مغناطیسی با شدت ۲۰۰۰ گاوس، کانی‌های کلسیت و دولومیت به بخش غیرمغناطیسی رفته و تمرکز کانی‌های آهنی در محصول مغناطیسی افزایش می‌یابد، بنابراین افزایش اندک اندیس باند محصول مغناطیسی ۲۰۰۰ گاوس نسبت به خوراک اولیه (باطله)، را می‌توان ناشی از افزایش مقدار کانی‌های اکسیدی آهن در کنسانتره و کاهش میزان کانی‌های باطله در آن دانست. همچنین بر اساس مطالعات کانی‌شناسی، درگیری کانی کوارتز با مگنتیت و راه‌یابی آن به محصول پیش‌فرآوری شده را می‌توان دلیلی برای افزایش اندیس باند محصول پیش‌فرآوری شده تلقی کرد.



شکل ۷: مقدار انرژی لازم برای خردایش هر تن از محصول پیش‌فرآوری شده در ابعاد مختلف

شده است (شکل ۸-ب). کربنات‌ها (شامل کلسیت و دولومیت) با درصد حجمی ۴۵-۴۰ درصد، به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار درشت بلور و عمدتاً به صورت درگیر با کانی‌های اپیک (فلزی) یافت می‌شوند (شکل ۸-ج). کانی کوارتز به شکل آمورف (یا در قسمت‌هایی نیمه شکل‌دار) بیش از ۱۰-۵ درصد حجمی کل قطعات را تشکیل می‌دهد که در حالت درگیر با کانی‌های اپیک است (شکل ۸-د). از کانی‌های فرعی می‌توان به فلدسپات‌ها (پلاژیوکلاز) با ماکل پلی سنتتیک با ۳ درصد حجمی، میکاها (موسکویت و بیوتیت) با ۷-۵ درصد حجمی اشاره کرد. آمفیبول با سطح آغشتگی به اکسید آهن با مقدار کمتر از یک دهم درصد حجمی دیده می‌شود.

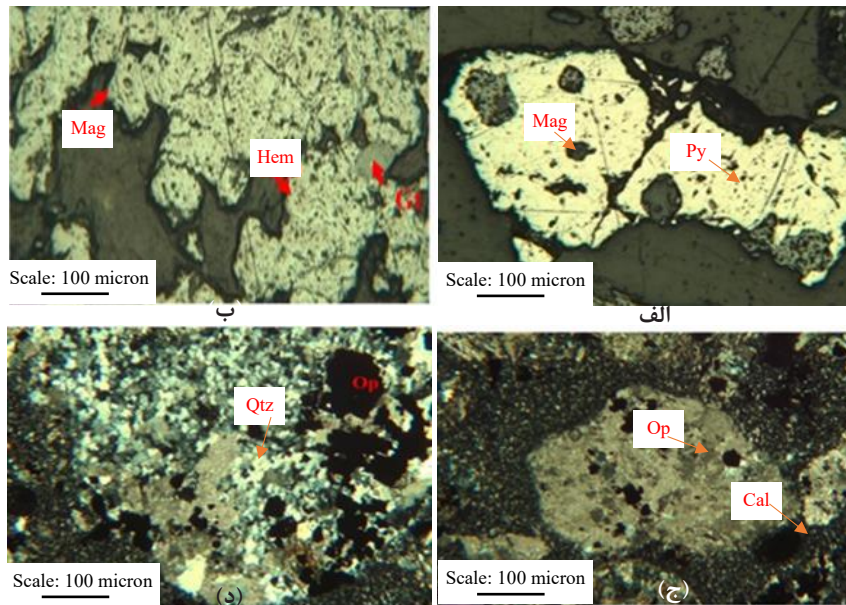
تغییرات درجه آزادی کانی‌های اکسیدی آهن شامل مگنتیت به همراه هماتیت (حاصل از مارتیتی شدن مگنتیت)، در جدول ۴ بیان شده است. با توجه به جدول ۴ می‌توان گفت که کانی مگنتیت درگیری و قفل‌شدگی بسیار پیچیده‌ای با کانی‌های باطله دارد؛ به گونه‌ای که با کاهش اندازه ذرات تا ۴۵ میکرون، درجه آزادی به ۹۰ درصد رسیده است. برای دستیابی به درجه آزادی مطلوب (بیش از ۸۵ درصد) لازم است که کنسانتره تا ابعاد کمتر از ۴۵ میکرون تحت خردایش قرار گیرد. درگیری‌های بسیار پیچیده مگنتیت با سایر کانی‌ها، توجیهی برای عدم دستیابی به عیارهای بالا (بیش از ۶۵ درصد) در بازفرآوری باطله‌های کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی است.

به درجه آزادی بیش از ۷۰ درصد، تقریباً ۹ کیلووات ساعت خواهد بود. با توجه به اینکه با انجام مرحله پیش‌فرآوری، مقدار بار ورودی به آسیا برای خردایش به حدود ۲۰ درصد حالت اولیه (باطله کارخانه فرآوری) کاهش می‌یابد؛ کاهش قابل ملاحظه‌ای در مصرف انرژی رخ خواهد داد.

### ۳-۲- تعیین روش مناسب بازفرآوری باطله‌های آهن

بر اساس نتایج حاصل از پیش‌فرآوری مغناطیسی باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن، جدایش مغناطیسی در اندازه ذرات ۱۰-۰ میلی‌متر (باطله اولیه بدون خردایش)، تحت شدت میدان ۲۰۰۰ گاوس و به روش خشک پیشنهاد می‌شود. در این حالت، محصولی با عیار و بازیابی آهن کل به ترتیب ۲۴ و ۵۰ درصد حاصل می‌شود. در ادامه و در راستای تعیین شرایط بهینه پرعیارسازی محصول پیش‌فرآوری شده، پس از شناسایی خواص بافتی کنسانتره از طریق مطالعات میکروسکوپی نوری، بر روی آن آزمایش‌های مختلف خردایش و دیویس تیوب انجام گرفته است.

بر اساس مطالعات میکروسکوپی مقاطع صیقلی، در محصول پیش‌فرآوری شده (حاصل از باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی)، کانی مگنتیت تشکیل‌دهنده ۳۵-۳۰ درصد حجمی قطعات است. مگنتیت به صورت‌های درگیر با پیریت (انکلوزیون‌هایی از مگنتیت در داخل پیریت) و کانی‌های باطله یافت می‌شود (شکل ۸-الف). همچنین در برخی موارد کانی مگنتیت در اثر پدیده مارتیتی شدن به هماتیت تبدیل



شکل ۸: تصاویر میکروسکوپی مقاطع صیقلی (PPL) و نازک (XPL) محصول پیش‌فرآوری شده: الف) کانی مگنتیت (Mag) همراه با پیریت (Py) و باطله‌ها (Gangue)، ب) مارتیتی شدن مگنتیت به هماتیت (Hem)، ج) کانی‌های اپک (Op) و کلسیت (Cal)، د) کوارتز (Qtz)

جدول ۴: تغییرات درجه آزادی کانی‌های آهن‌دار در فراکسیون‌های مختلف دانه‌بندی محصول پیش‌فرآوری شده

فراکسیون دانه‌بندی (mm)	+۱۰۰۰	+۵۰۰-۱۰۰۰	+۲۵۰-۵۰۰
درجه آزادی (%)	۲۵	۳۵	۵۸
فراکسیون دانه‌بندی (mm)	+۲۵۰-۹۰	+۴۵-۹۰	-۴۵
درجه آزادی (%)	۷۵	۸۵	۹۰

جدول ۵: نتایج پرعیارسازی کنسانتره پیش‌فرآوری مغناطیسی (خردایش شده تا ابعاد ۲۵۰ میکرون - میدان ۳۰۰۰ گاوس)

محصولات	وزن (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe (T) (%)	بازیابی (%)
خوراک	۱۰۰/۰۰	۳۰/۱۵	۲۳/۷۷	
کنسانتره	۴۵/۸۵	۲۰/۴۵	۴۲/۱۳	۸۱/۲۶
باطله	۵۴/۱۵	۳۸/۰۰	۷/۱۶	

توجه به درگیری مگنتیت با کانی‌های باطله و همچنین وجود سایر باطله‌ها در کنسانتره مغناطیسی ۳۰۰۰ گاوس (ذرات نرمه سیلیس و ذرات درگیر)، می‌توان با انجام یک مرحله خردایش (برای آزاد کردن ذرات درگیر) و سپس یک جداکننده شدت پایین (به عنوان مثال ۱۰۰۰ گاوس برای حذف ذرات باطله

عیار آهن در محصول پیش‌فرآوری شده تقریباً ۲۴ درصد است. با توجه به عیار آهن و همچنین لزوم خردایش تا ابعاد بسیار ریز، حذف مرحله‌ای کانی‌های باطله برای تولید محصول پرعیار، بهینه‌ترین راهکار است. با حذف کانی‌های نرمه‌زا از جمله سیلیس در ابعاد درشت‌تر و سپس خردایش محصول باقیمانده می‌توان به عیار بالاتری از Fe در محصول نهایی دست یافت. بدین منظور و مطابق با شکل ۵، تست‌های خردایش و جدایش مرحله‌ای برای محصول پیش‌فرآوری شده انجام گرفته است. در مرحله اول محصول پیش‌فرآوری شده تا ابعاد کمتر از ۲۵۰ میکرون (به وسیله آسیای میله‌ای با نسبت بار خردکننده به خردشونده ۱۰ به ۱) تحت خردایش قرار گرفت، سپس بر روی آن آزمایش دیویس تیوب با شدت ۳۰۰۰ گاوس انجام گرفته است. در جدول ۵ نتایج مربوط به این آزمایش آمده است. در طی این آزمایش، ۴۵/۸۵ درصد از بار ورودی (بازیابی وزنی) با عیار آهن کل بیش از ۴۲ درصد به کنسانتره بازیابی شده است. مقدار سیلیس در کنسانتره نیز به کمتر از ۲۰ درصد رسیده است.

بر اساس مطالعه مقاطع میکروسکوپی، درصد حجمی مگنتیت در کنسانتره ۳۰۰۰ گاوس، به ۷۵-۷۰ درصد افزایش یافته است. اکثر ذرات مگنتیت به صورت درگیر با کربنات‌ها و سیلیکات‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۹). مقدار کانی‌های باطله در کنسانتره ۳۰۰۰ گاوس، بیش از ۱۵ درصد حجمی است. با

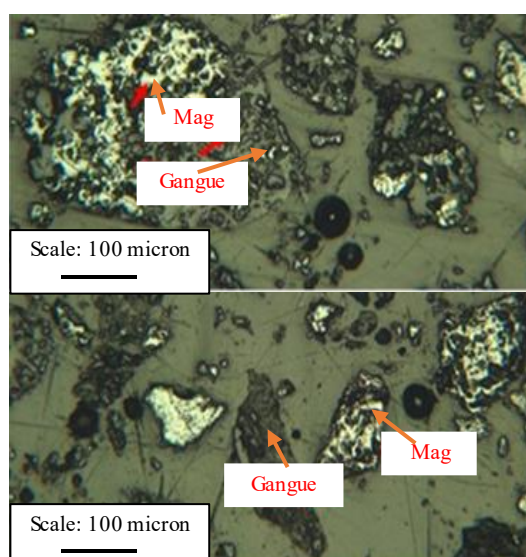
ریز دانه) کانی‌های باطله را حذف کرد. در باطله ۳۰۰۰ گاوس، کانی مگنتیت به شکل آزاد وجود نداشته (یا به مقدار ناچیز است)؛ و میزان کانی‌های مگنتیت درگیر با سیلیکات‌ها حدود ۳-۵ درصد حجمی است. عیار آهن باطله (۷/۱۶ درصد) را می‌توان مربوط به این ذرات درگیر مگنتیت با مقدار بسیار کم و سایر کانی‌های باطله حاوی آهن دانست.

بیش از ۸۰ درصد حجمی سطح را اشغال کرده‌اند. کانی‌های غیرفلزی با درجه آزادی بالا (بیش از ۹۵ درصد) مشاهده می‌شوند. در این میان پیریت، به صورت آزاد و درگیر با کانی مگنتیت حدود ۱-۳ درصد حجمی نمونه را اشغال کرده است. در برخی از قسمت‌ها پدیده مارتنیتی شدن (تبدیل مگنتیت به هماتیت) دیده می‌شود. عیار ۲۰ درصدی آهن در باطله ناشی از ذرات درگیر مگنتیت، هماتیت ناشی از مارتنیتیزاسیون مگنتیت و کانی‌هایی مانند پیریت ( $FeS_2$ ) و کالکوپیریت ( $CuFeS_2$ ) است.

جدول ۶: نتایج پرعیارسازی کنسانتره مغناطیسی ۳۰۰۰ گاوس (خردایش شده تا ابعاد ۴۵- میکرون - میدان ۱۰۰۰ گاوس)

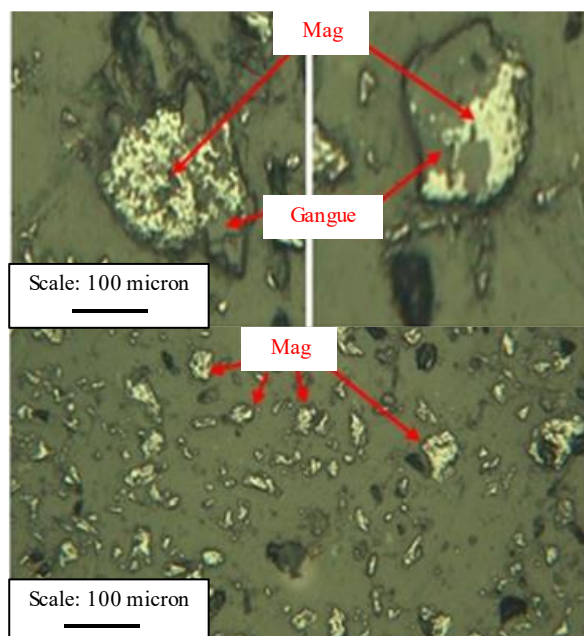
محصولات	وزن (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe (T) (%)	بازیابی (%)
خوراک	۴۵/۸۵	۲۰/۴۵	۴۲/۱۳	۷۶/۰۰
کنسانتره	۲۳/۰۰	۴/۹۷	۶۵/۶۰	
باطله	۲۲/۸۵	۳۴/۴۴	۲۰/۴۳	

شکل ۹: تصاویر میکروسکوپی مقاطع صیقلی کنسانتره مغناطیسی ۳۰۰۰ گاوس (PPL) - مگنتیت (Mag) و باطله (Gangue)



شکل ۹: تصاویر میکروسکوپی مقاطع صیقلی کنسانتره مغناطیسی ۳۰۰۰ گاوس (PPL) - مگنتیت (Mag)

کنسانتره ۳۰۰۰ گاوس، مجدداً در آسیای میله‌ای تحت خردایش قرار گرفته و محصولی با ابعاد کمتر از ۴۵ میکرون تولید شده است (زمان خردایش تقریباً ۲۵ دقیقه). بر روی محصول خرد شده آزمایش جدایش مغناطیسی (با شرایط عملیاتی مشابه با حالت قبل) با شدت میدان ۱۰۰۰ گاوس انجام گرفته است. در جدول ۶ نتایج مربوط به این مرحله از جدایش مغناطیسی بیان شده است. با انجام پرعیارسازی در مرحله شستشوی اول، کنسانتره‌ای با عیار بیش از ۶۵ درصد Fe، با بازیابی ۷۶ درصدی برای آهن حاصل شده است. مطالعه مقاطع میکروسکوپی کنسانتره حاکی از آن است که مگنتیت به صورت آزاد (با فرم ساب هدرال) ۷۵-۷۰ درصد حجمی نمونه را تشکیل می‌دهد. در برخی از قسمت‌ها مگنتیت به صورت درگیری با کانی باطله دیده می‌شود (حدود ۵ درصد حجمی). در واقع مگنتیت‌ها به صورت درشت بلور و ریز بلور دیده می‌شوند. کانی‌های غیرفلزی (عمدتاً سیلیکات‌ها) با میزان



شکل ۱۰: تصاویر میکروسکوپی مقاطع صیقلی کنسانتره مغناطیسی ۳۰۰۰ گاوس (PPL) - مگنتیت (Mag) و باطله (Gangue)

ذرات تا ابعاد مورد نظر، خردایش و جدایش مرحله‌ای بعنوان بهترین راهکار پیشنهاد شده است. در صورت خردایش تمامی محصول پیش‌فرآوری شده در یک مرحله، حجم قابل توجهی از ذرات نرمه تولید خواهد شد. در این حالت علاوه بر مصرف بالای انرژی خردایش، ذرات نرمه به کاهش کارایی جدایش مغناطیسی از طریق ایجاد پوشش بر روی ذرات مگنتیت و همچنین آگلومره شدن، منجر خواهند شد، اما با خردایش و جدایش مغناطیسی مرحله‌ای در نهایت کنسانتره‌ای با عیار آهن بیش از ۶۶ درصد تولید شده است.

#### ۵- سپاس‌گزاری

بدینوسیله نویسندگان مقاله از حمایت‌ها و پشتیبانی "شرکت معدنی و صنعتی فرنارام وابسته به گروه صنعتی پارس ساختار" در انجام این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را دارا هستند.

#### ۶- مراجع

- [1] Yildiz, T. D. (2020). "Waste management costs (WMC) of mining companies in Turkey: can waste recovery help meeting these costs?". Resources Policy, 68: 101706.
- [2] Nwaila, G. T., Ghorbani, Y., Zhang, S. E., Frimmel, H. E., Tolmay, L. C., Rose, D. H., Nwaila, P. C., and Bourdeau, J. E. (2021). "Valorization of mine waste-Part I: Characteristics of, and sampling methodology for, consolidated mineralized tailings by using Witwatersrand gold mines (South Africa) as an example". Journal of Environmental Management, 295: 113013.
- [3] Franks, D. M., Boger, D. V., Côte, C. M., and Mulligan, D. R. (2011). "Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes". Resources Policy, 36(2): 114-122.
- [4] Tutu, H., McCarthy, T. S., and Cukrowska, E. (2008). "The chemical characteristics of acid mine drainage with particular reference to sources, distribution and remediation: the Witwatersrand Basin, South Africa as a case study". Applied Geochemistry, 23(12): 3666-3684.
- [5] Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., and Keir, G. (2015). "A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies". Journal of Cleaner Production, 108: 1050-1062.
- [6] Carmo, F. F., Kamino, L. H. Y., Junior, R. T., de Campos, I. C., do Carmo, F. F., Silvino, G., de Castro, K. J. S. X., Mauro, M. L., Rodrigues, N. U. A., Miranda, M. P. S., and Pinto, C. E. F. (2017). "Fundão tailings

با توجه به عیار بالای آهن (بیش از ۲۰ درصد) در باطله مرحله پرعیارسازی، بر روی باطله مجدداً آزمایش با شدت ۲۰۰۰ گاوس انجام گرفته است. همچنین در راستای افزایش هرچه بیشتر عیار کنسانتره، آزمایش ۱۰۰۰ گاوس برای کنسانتره آزمایش قبل (مرحله پرعیارسازی ثانویه) انجام شده است. نتایج مربوط به این آزمایش‌ها در جدول ۷ بیان شده است. با انجام مرحله پرعیارسازی ثانویه عیار آهن افزایش حدود ۱ درصدی داشته و به بیش از ۶۶ درصد رسیده است. انجام جدایش مغناطیسی بر روی باطله نیز نتیجه مطلوبی داشته و بیش از ۶ درصد از باطله مرحله پرعیارسازی را با عیار آهن تقریباً ۶۳٫۵۰ درصد بازیابی کرده است.

جدول ۷: نتایج آزمایش‌های پرعیارسازی ثانویه و جدایش مغناطیسی مجدد باطله

مرحله	محصولات	وزن (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe (T) (%)
پرعیارسازی ثانویه	خوراک	۲۳٫۰۰	۴٫۹۷	۶۵٫۶۰
	کنسانتره	۳٫۱۰	۴٫۴۰	۶۶٫۳۵
	باطله	۱۹٫۹۰	۶٫۷۹	۶۳٫۰۱
پرعیارسازی مجدد باطله	خوراک	۲۲٫۸۵	۳۴٫۴۴	۲۰٫۴۳
	کنسانتره	۶٫۱۷	۶٫۱۹	۶۳٫۴۱
	باطله	۱۶٫۶۸	۴۰٫۰۵	۱۱٫۹۷

#### ۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، با پیش‌فرآوری مغناطیسی باطله کارخانه فرآوری آهن (با عیار آهن ۱۰ درصد) بدون خردایش، تحت شدت میدان ۲۰۰۰ گاوس و به روش خشک، حدود ۸۰ درصد از بار ورودی به درام ۲۰۰۰ گاوس، با عیار آهن حدود ۵ درصد (که عمدتاً کانی‌های غیرمگنتیتی بوده) به باطله منتقل می‌شود. با توجه به عدم نیاز به خردایش در این مرحله، در مصرف انرژی صرفه‌جویی خواهد شد. محصول پیش‌فرآوری شده ۲۰ درصد وزنی از بار ورودی به درام بوده که عیار آهن آن حدود ۲۴ درصد و عمدتاً ناشی از کانی مگنتیت است. با توجه به قفل‌شدگی‌های مگنتیت با کانی‌های باطله، درجه آزادی مناسب برای مگنتیت (۹۰ درصد) در ابعاد کمتر از ۴۵ میکرون حاصل خواهد شد. از طرفی، با توجه به عیار بیش از ۳۰ درصدی سیلیس در محصول پیش‌فرآوری شده، برای جلوگیری از تولید ذرات نرمه و خردایش تمامی



- [12] Praes, P. E., de Albuquerque, R. O., and Luz, A. F. O. (2013). "Recovery of iron ore tailings by column flotation". *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 1: 212-216.
- [13] Matiolo, E., Couto, H., Lima, N., Silva, K., Freitas, A. S., Almeida, R. N. (2019). "Concentration studies of iron ore sludge by column flotation". In: XXVIII National Meeting of Mineral Treatment and Extractive Metallurgy, Belo Horizonte.
- [14] Galvao, J. L. B., Andrade, H. D., Brigolini, G. J., Peixoto, R. A. F., and Mendes, J. C. (2018). "Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints". *Journal of Cleaner Production*, 200: 412-422.
- [15] Parian, M., Lamberg, P., and Rosenkranz, J. (2018). "Process simulations in mineralogy-based geomaterials of iron ores". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 25-30. DOI: <https://doi.org/10.1080/25726641.2018.1507072>.
- [16] Hilden, M. M., and Powell, M. S. (2017). "A geometrical texture model for multi-mineral liberation prediction". *Minerals Engineering*, 111: 25-35.
- [17] ایمانی، ف؛ ۱۴۰۱؛ "طراحی مدار باز فرآوری باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه بندی بالستان بر اساس مطالعات کانی شناسی فرآیندی". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه.
- [7] Abaka-Wood, G. B., Zanin, M., Addai-Mensah, J., and Skinner, W. (2019). "Recovery of rare earth elements minerals from iron oxide-silicate rich tailings-Part 1: Magnetic separation". *Minerals Engineering*, 136: 50-61.
- [8] Kinnunen, P., Ismailov, A., Solismaa, S., Sreenivasan, H., Räisänen, M. L., Levänen, E., and Illikainen, M. (2018). "Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics-a review". *Journal of Cleaner Production*, 174: 634-649.
- [9] Li, N., Lv, S., Wang, W., Guo, J., Jiang, P., and Liu, Y. (2020). "Experimental investigations on the mechanical behavior of iron tailings powder with compound admixture of cement and Nano-clay". *Construction and Building Materials*, 254: 119259.
- [10] Rocha, L., Caçado, R. Z. L., and Peres, A. E. C. (2010). "Iron ore slimes flotation". *Minerals Engineering*, 23(11-13): 842-845.
- [11] Santos, E. P. D., (2010). "Alternatives for the treatment of ultrafine iron ore from Mina do Pico/MG by column flotation". Thesis for Master Degree.