



Imam Khomeini International University
Vol. 10, No. 2, Summer 2025



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

Research Paper

The Effect of the Textural Characteristics of Iron Ore Processing Tailings on the Processes of Iron Recovery From Them

Kazemi F.¹, Abdollahzadeh A.A.^{2*}

1- Ph.D Student, Department of Mining Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 22 Jun. 2024

Accepted: 19 Sep. 2024

Abstract: The present study aims to identify and quantify the textural characteristics of granulated iron ore tailing depots to investigate these characteristics' effect on the tailings reprocessing behavior. After sampling from the tailings depots and classifying them into six size fractions, chemical analyses, and optical and electron microscopic studies were conducted on each fraction. By processing the images and coding in MATLAB software, a quantitative parameter related to the interlocking of the target mineral with gangues—termed the association index (AI)—was determined. Mineralogical studies indicate the presence of magnetite and hematite, along with their complex interlocking with other metallic minerals and gangue. Based on the AI calculated for each fraction, the highest interlock occurs between magnetite and hematite, attributed to the martitization of magnetite to hematite. In the size fraction above 250 microns, the highest AI is observed for magnetite with the following minerals: calcite, diopside, garnet, and quartz. In this fraction, the ratio of AI to the grades of pyrite and chalcopryrite exceeds 1, indicating that magnetite is preferable to these minerals. The magnetic separation results confirmed that pyrite and chalcopryrite were recovered into the magnetic concentrate in sizes over 250 microns. This can significantly aid in copper mineral recovery as a pre-treatment step.

Keywords: Iron tailings, Textural characteristics, Association index, Grinding, Magnetic separation.

How to cite this article

Kazemi, F., and Abdollahzadeh, A. A. (2025). "The Effect of the textural characteristics of iron ore processing tailings on the processes of iron recovery from them". Journal of Mineral Resources Engineering, 10(2): 117-135.

DOI: 10.30479/jmre.2024.20504.1701

*Corresponding Author Email: abd Zad@aut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2025 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 mineralogical approach, as the most comprehensive method for developing a geometallurgical program, utilizes mineralogy and combines its data to inform program development [1,2]. It means that in the construction of a geometallurgical program, the entire model should be based on mineralogical information [2,3]. Mostly, ore texture is quantified in terms of descriptors such as covariance function, proximity function, and linear intercept length distribution. However, these descriptors are mostly developed for binary systems, and there is no extension for three-dimensional ore texture volume [3,4]. Automated mineralogical methods based on electron microscopy are the most common approaches for obtaining textural information from ores in 3D. In these methods, images are processed to extract textural and mineralogical information. Image processing techniques are used to classify the objects in the image (such as grains, particles, or phases) and recover a wide range of features. In this research, the concept of association index (AI) has been used to quantify the textural information obtained from optical and electron microscopic studies of iron tailings and their application in different processing stages, including grinding and magnetic separation.

METHODS

The present study was conducted on the tailing piles of lump iron ore processing plants located in the west of Iran – Kurdistan province. The tailings are obtained from the low-intensity dry magnetic separation of magnetite iron ore, which is accumulated in piles around the processing plant. A representative sample with an approximate weight of 500 kg was selected from tailing depots. The dimensions of tailing particles are in the range of 0-15 mm, and 80% of the particles have dimensions less than 6 mm. Chemical analysis (by the method of X-ray fluorescence), mineralogical analysis (by the method of X-ray diffraction), optical image analysis (OIA), and scanning electron microscopy (SEM) were used to determine the texture characteristics. Image processing sequences, including phase discrimination, object separation, and feature extractions, were done by writing code in MATLAB.

FINDINGS AND ARGUMENT

Based on XRD analysis, the overall phases in samples of the plant tailings include magnetite, andradite garnet, diopside, clinocllore, and hedenbergite. Diopside is the most abundant phase, with a value of 20.50%. The two minerals calcite and andradite garnet are also almost equal in quantity, and they are the most abundant minerals after diopside. Sulfide minerals mainly contain pyrite and lesser amounts of chalcopyrite and pyrrhotite. Table 1 shows the results of XRF analysis for each size fraction. By reducing the size of the particles, the amount of Fe(T) increased and reached about 22.50% in the size fraction of +0.106-0.250 mm. The weight percentage of particles in this size range is 15.50%. By reducing the size of the particles to +0.045 -0.106 mm, the total iron grade decreased and increased again for the particles of -0.045 mm.

Table 1. Weight values and XRF analysis results for iron processing plant tailings in each size fraction

Size fraction (mm)	Weight (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe(T) (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	S (%)	Cu (%)
+1	4.20	37.53	8.38	20.22	15.66	0.74	4.17	0.46	0.11
-1 +0.500	30.90	36.65	8.97	18.59	16.34	0.75	4.19	0.58	0.14
-0.500 +0.250	17.40	33.90	7.84	19.33	18.66	0.59	3.76	0.82	0.19
-0.250 +0.106	15.50	32.13	7.02	17.10	22.48	0.46	4.73	0.51	0.21
-0.106 +0.045	8.90	33.61	8.66	19.69	15.47	0.59	2.60	0.51	0.22
-0.045	23.10	31.26	6.98	18.90	25.03	0.65	5.89	0.31	0.25

Based on OIA and SEM, non-metallic minerals constitute a significant portion of the tailing piles, while metallic minerals represent only a minor fraction. The non-metallic minerals are diverse and include silicates and non-silicates. These minerals include pyroxene (diopside series), calcite, garnet, epidote,

tremolite-actinolite series amphibole, quartz, sphene, chlorite, and small amounts of biotite, feldspar, and apatite. The metal minerals are mostly of the oxide type, and sulfide minerals exist in smaller amounts. The volumetric percentage of two main oxide minerals, magnetite and hematite (as the main iron minerals in tailings samples), vary across different size fractions.

By processing the electron microscopic images, the relationship index was determined for iron oxides (magnetite and hematite) in the studied iron tailings. The association index is a quantified parameter of the texture obtained from the ore texture information resulting from mineralogical studies [3]. Image processing sequences, including phase discrimination, object separation, and feature extractions, were done by writing code in MATLAB. The code can analyze ore texture and particulate samples to give numeric or textural features and liberation. For BSE images, phase separation was initiated by assigning multiple threshold values according to a range of grey levels corresponding to each phase. A new value representing a phase was assigned to the pixel values in the image that corresponded to each threshold interval. The epoxy area was assigned a value of zero for easier processing of objects during image processing (Figure 1). In the next step, the surface of each phase (the number of pixels occupied by the phase) in a particle is determined. To convert this value into weight percentage, mineral density has been used as a weight factor in the composition calculation. Also, the value of the boundary of minerals with each other has been measured.

Table 2 shows the AI values of magnetite and hematite minerals with other minerals in different size fractions. Based on the results of microscopic studies as well as the segmentation of minerals by MATLAB software, the highest level of interlocking in all size fractions is between two iron oxide minerals, namely magnetite and hematite, which is caused by martitization of magnetite to hematite. By reducing the size of the particles, the AI of magnetite with all the minerals in the sample has decreased. It is obvious that by reducing the size of the particles, the degree of liberation increases and the degree of interlocking of minerals decreases. The highest AI is related to magnetite with calcite and diopside minerals in dimensions of +250 microns. In the mentioned size fraction, magnetite has the highest association values with garnet and quartz. The lowest level of the AI is related to magnetite with feldspar.

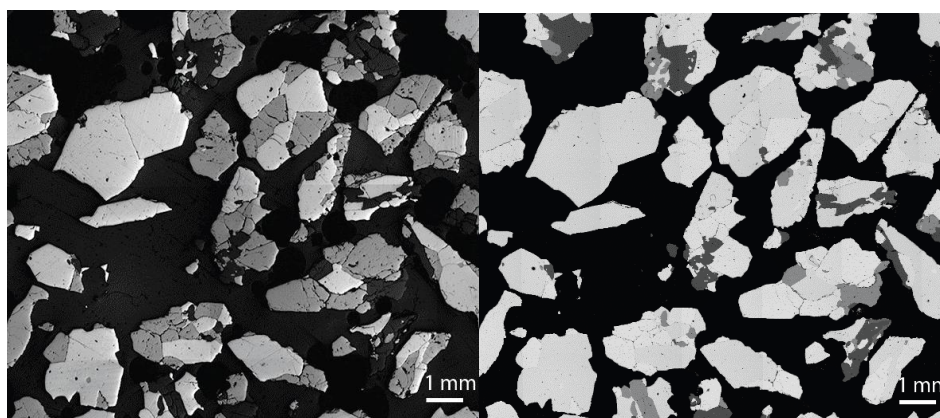


Figure 1. BSE image processing with grey color spectrum in MATLAB software (granulation fraction +1 mm)

Table 2. The association index of iron oxide minerals with other minerals in the tailings in different size fractions

Size fraction (mm)	Pyrite	Chalcopyrite	Calcite/ Diopside	Chlorite	Biotite	Feldspar	Garnet/ Quartz
+1	0.90	0.40	25.00	3.00	3.00	0.00	20.00
-1 +0.500	0.80	0.40	22.00	3.00	1.00	0.00	18.00
-0.500 +0.250	0.80	0.30	20.00	2.00	0.30	0.00	17.00
-0.250 +0.106	0.30	0.20	15.00	1.00	0.20	1.00	10.00
-0.106 +0.045	0.30	0.20	10.00	0.50	0.10	0.10	12.00
-0.045	0.05	0.10	5.00	0.50	0.10	0.05	4.00

Table 3 presents, the ratio of AI of iron oxide minerals (magnetite and hematite) to the grade of accompanying minerals in different fractions of iron tailings. It can be seen that with the reduction of particle size, the ratio of AI to grade has decreased. Based on the presented concept, this parameter has a direct relationship with the AI of two minerals and an inverse relationship with the grade of accompanying minerals. By determining the number 1 as an index for this ratio, it is clear that values greater than 1 indicate the preference for the target mineral (here, iron oxide minerals) over the companion mineral, and values less than 1 generally indicate the preference for the companion mineral. The meaning of preference is the predominance of the desired mineral property (here, magnetic property) in the particles involved; if the separation process is carried out, these particles will be transferred to the relevant section. According to Table 3, iron oxide minerals in the range of +250 microns are preferable to pyrite minerals and in the range of +45 microns to chalcopyrite minerals. In other words, the amount of iron oxide minerals in these fractions is greater than the associated mineral. By reducing the size of the particles and, as a result, reducing the ratio of AI to grade, preference has changed to the accompanying phase of iron oxide minerals. That is, during the processing processes, the behavior and properties of the accompanying minerals will prevail. Concerning other available phases (non-metallic minerals and gangue), gangue minerals are preferred in all size fractions, and iron oxide minerals are associated phases.

To validate the prediction obtained from the quantification of texture information of iron tailings and its effect on processing behavior, a magnetic separation test was conducted on a sample of iron tailings with a d_{80} of 2 mm, using a drum separator at a magnetic intensity of 2000 Gauss. 33.5% by weight of the feed to the drum was recovered in the concentrate with a grade of 31% Fe(T). The concentrate and tailings of the magnetic separation were classified into size fractions of +1, +0.5 -1, +0.25 -0.5, and -0.250 mm, followed by XRF analysis (Table 4). According to Table 4, the amount of gangue compounds recovered in the concentrate for the +0.250 mm fraction is higher than for the -0.250 mm fraction. This is due to the interlocking of gangue minerals with magnetite in the coarser particles, as mentioned in the previous section. In particles smaller than 0.250 mm, the trend reverses: with increasing degrees of liberation, the majority of the gangue minerals are transferred to the tailings.

Table 3. Ratio of AI of iron oxide minerals to the grade of the accompanying mineral in different size fractions

Size fraction (mm)	Pyrite	Chalcopyrite	Calcite/ Diopside	Chlorite	Biotite	Feldspar	Garnet/ Quartz
+1	1.55	4.00	0.70	0.33	0.40	0.00	0.79
-1 +0.500	1.70	3.63	0.59	0.34	0.13	0.00	0.73
-0.500 +0.250	1.27	2.73	0.52	0.25	0.05	0.00	0.74
-0.250 +0.106	0.64	2.00	0.42	0.14	0.03	0.99	0.42
-0.106 +0.045	0.56	1.67	0.27	0.06	0.03	0.08	0.46
-0.045	0.16	0.83	0.15	0.03	0.00	0.03	0.15

Table 4. XRF analysis of each size fraction of concentrate and tailing of magnetic separation test

Size fraction (mm)		SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe(T) (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	S (%)	Cu (%)
$d_{80} = -2$	Feed	33.61	6.68	16.96	17.83	0.59	3.79	1.20	0.28
+1	Con.	27.85	4.29	14.37	31.47	0.23	4.77	0.70	0.11
	Tail	41.42	9.38	22.90	10.14	0.95	4.51	0.25	0.06
-1 +0.500	Con.	24.97	4.46	11.86	35.26	0.25	4.67	0.53	0.12
	Tail	40.16	9.00	22.44	11.53	0.76	3.74	0.47	0.04
-0.500 +0.250	Con.	26.47	5.53	12.50	31.47	0.39	4.68	0.49	0.11
	Tail	38.43	8.48	23.15	12.47	0.55	4.54	1.04	0.13
-0.250	Con.	23.21	4.59	10.21	37.98	0.29	3.99	0.42	0.16
	Tail	39.13	9.21	23.82	12.58	0.65	3.64	1.03	0.20

CONCLUSIONS

Recovery of iron from its processing tailings faces many challenges due to the low grade of iron and complex mineralization. In the current research, an effort was made to determine the mineralogical properties and identify the texture of iron tailings to develop an algorithm for reprocessing these secondary iron deposits and addressing their challenges. Conducting mineralogical studies, including XRD and optical microscopy, has obtained fundamental information regarding the presence of magnetite in iron tailings and its interlocking with gangue minerals. Based on the electron microscopic studies, a new parameter called the association index was calculated. This index refers to determining the degree of interlocking of the target mineral - here magnetite - with other valuable minerals and gangue. According to the investigations, the highest amount for AI is related to the hematite, calcite, diopside, garnet, and quartz minerals in dimensions of 250+ microns. By decreasing the dimensions of the particles, the AI of magnetite with all the minerals identified in the sample decreases. The ratio of AI to grade of interlocked mineral with magnetite can be used as a useful parameter to investigate the magnetic separation behavior of magnetite. If magnetic separation is performed in dimensions of +250 microns, pyrite and chalcopyrite will be transferred to the magnetic concentrate for the processing of the studied tailings. By reducing the size of the particles to -106 microns, despite the high grade of calcite, diopside, and quartz minerals, with the magnetic separation of iron tailings, a smaller part of these minerals will enter the concentrate.

REFERENCES

- [1] Bonnici, N., Hunt, J. A., Walters, S. G., Berry, R., and Collett, D. (2008). *"Relating textural attributes to mineral processing: Developing a more effective approach for the Cadia East Cu-Au porphyry deposit"*. In: Proceedings of the Ninth International Congress for Applied Mineralogy Conference (ICAM), 4-5.
- [2] Lamberg, P. (2011). *"Particles-the bridge between geology and metallurgy"*. In: Conference in Minerals Engineering 2011, Luleå, Sweden, 1-16.
- [3] Parian, M., Mwanga, A., Lamberg, P., and Rosenkranz, J. (2018). *"Ore texture breakage characterization and fragmentation into multiphase particles"*. Powder Technology, 327: 57-69.
- [4] Kazemi, F., and Abdollahzadeh, A. A. (2024). *"Valorisation of iron ore tailing piles: utilisation of element-to-mineral conversion and association index to building mineralogical modal"*. Canadian Metallurgical Quarterly, 1-14.



تأثیر ویژگی‌های بافت باطله‌های فرآوری سنگ آهن بر فرآیندهای بازیافت آهن از آن

فاطمه کاظمی^۱، علی اکبر عبدالله زاده^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

چکیده

شناخت ویژگی‌های بافتی باطله‌ها به دلیل عبور آنها از حداقل یک مرحله فرآوری و انباشت در طول زمان، برای بازفرآوری اهمیت بالایی دارد. هدف از مطالعه حاضر، شناسایی و کمی‌سازی خواص بافتی ذخیره‌های باطله سنگ آهن دانه‌بندی در راستای بررسی تأثیر آن بر رفتار این مواد در فرآوری مجدد است. پس از نمونه‌برداری از دیواره‌های باطله، با طبقه‌بندی در ۶ فراکسیون دانه‌بندی بر روی آنها آنالیز شیمیایی و مطالعات میکروسکوپی نوری و الکترونی انجام گرفت. با پردازش تصاویر و کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB، یک پارامتر کمی در ارتباط با میزان درگیری کانی هدف با گانگ‌ها با عنوان شاخص ارتباط (AI) تعیین شد. مطالعات کانی‌شناسی حاکی از وجود کانی‌های منیتیت و همتایت و درگیری پیچیده آنها با سایر کانی‌های فلزی و گانگ است. بر اساس AI محاسبه شده برای هر فراکسیون، بالاترین ارتباط میان دو کانی منیتیت و همتایت بوده که ناشی از مارتیتی شدن منیتیت به همتایت است. پس از آن در ابعاد ۲۵۰+ میکرون بالاترین AI برای منیتیت با کانی‌های به ترتیب کلسیت، دیوپسید، گارنت و کوارتز است. در این فراکسیون ابعادی نسبت AI به عیار کانی‌های پیریت و کالکوپیریت بیش از ۱ به دست آمد که به معنی ارجح بودن منیتیت نسبت به کانی‌های پیریت و کالکوپیریت است. نتایج جدایش مغناطیسی موید پیش‌بینی‌ها بود. در ابعاد ۲۵۰+ میکرون، علاوه بر کانی آهن، پیریت و کالکوپیریت به کنسانتره مغناطیسی بازیابی شدند. این نتیجه به جهت بازیابی کانی مس به عنوان یک مرحله پیش فرآوری در ابعاد درشت قابل توجه است.

کلمات کلیدی

باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن، ویژگی‌های بافتی، شاخص ارتباط، جدایش مغناطیسی.

استناد به این مقاله

کاظمی، ف.، عبدالله زاده، ع.؛ ۱۴۰۴؛ "تأثیر ویژگی‌های بافت باطله‌های فرآوری سنگ آهن بر فرآیندهای بازیافت آهن از آن". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دهم، شماره ۲، ص ۱۳۵-۱۱۷.

DOI: 10.30479/jmre.2024.20504.1701



۱- مقدمه

ویژگی‌های بافت یک کانه شامل سختی، درجه آزادی کانی‌ها، توزیع ابعاد ذرات، فراوانی کانی‌ها، نوع کانی‌ها، نحوه درگیری بین کانی‌ها و ساختارهای کانی‌شناسی از موارد حایز اهمیت در طراحی و بهینه‌سازی مدارهای فرآوری مواد معدنی هستند [۱-۳]. شناسایی ویژگی‌های یاد شده برای بار ورودی و محصولات خروجی هر فرآیند، به تعیین شرایط بهینه فرآیند مربوطه یا به عبارت دیگر کانی‌شناسی فرآیند^۱ منجر می‌شود [۴]. بررسی تاثیر پارامترهای بافتی کانسنگ‌ها بر عملکرد متالورژیکی مدارهای فرآوری مواد معدنی و یا مطالعات کانی‌شناسی فرآیند موضوعی است که محققان به آن پرداخته‌اند [۵-۱۲، ۳]. ژانگ و سوباسینگ در سال ۲۰۱۲ با اتکا به اطلاعات بافت کانه و ترکیب ذرات به بررسی رفتار فرآوری کانه‌های مختلف پرداخته‌اند. در این تحقیق اطلاعات بافتی از آنالیز تصاویر حاصل از تکنیک‌های SEM استخراج شده است [۱۳]. لوند و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی مدل شکست ذرات و پیش‌بینی مدار خردایش بر اساس خواص بافتی ذخیره آهن Malmberget پرداخته‌اند. همچنین آنها به بررسی فرآیند پرعیارسازی این ذخیره بر اساس خواص بافتی تمرکز داشته‌اند [۱۴]. هیلدن و پائول در سال ۲۰۱۷ به ارایه روشی جدید برای بازسازی عددی سه بعدی (3D) اطلاعات بافت کانه‌های پلی‌متال سولفیدی و تخمین ویژگی‌های درجه آزادی ذرات برای تعیین رفتار خردایشی آنها پرداختند [۱۵]. در سال ۲۰۱۸ پریان و همکاران با تعریف ماتریس شاخص ارتباط^۲ به ارایه راهکاری برای کمی کردن اطلاعات بافت کانه‌های آهن Kiruna و Malmberget پرداختند. آنها از اطلاعات کمی شده بافت برای پیش‌بینی رفتار خردایش کانه استفاده کردند [۱۶]. پرز-برونئو و همکاران در سال ۲۰۱۸ از اطلاعات بافت مغزه‌های حفاری به عنوان یک شاخص ژئومتالورژیکی برای کانه آهن Mont-Wright بهره جستند [۱۷]. سوسا و همکاران در سال ۲۰۲۰ بر اساس آنالیز درجه آزادی ذرات درشت دانه کم عیار لیپدوتیت به بررسی رفتار فرآوری آن پرداختند [۱۸]. نیگان و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک راهکار نیمه اتوماتیک برای طبقه‌بندی اطلاعات بافتی حاصل از مغزه‌های حفاری توسعه دادند. این طبقه‌بندی برای پیش‌بینی خردایش و سختی کانه استفاده شده است [۱۹]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ با بررسی خواص بافتی کانه مس پورفیری به صورت درجا به وسیله X-ray μ CT به تعیین

خواص خردایشی آن پرداختند. این راهکار یک روش نوین برای آنالیز بافت کانه به شمار می‌آید که نقشه 3D از خواص کانه ارایه می‌دهد [۲۰].

در سطوح بالاتر، داده‌های مربوط به بافت کانه و ترکیب کانی‌شناسی ذرات، بخش مهمی از مودال کانی‌شناسی در تدوین یک برنامه ژئومتالورژیکی هستند [۱۶]. راهکار کانی‌شناسی که جامع‌ترین روش تدوین یک برنامه ژئومتالورژیکی بوده، از کانی‌شناسی و ترکیب اطلاعات آن برای تدوین برنامه استفاده می‌کند [۲۲، ۲۱]. بدین معنا که در ساخت یک مدل ژئومتالورژیکی تمامی مدل بر پایه اطلاعات کانی‌شناسی پایه‌گذاری شود [۲۲، ۱۶]. در این راستا تاکنون از ابزارهای کمی‌سازی بافت در مودال کانی‌شناسی مانند تابع کوواریانس، تابع مجاورت و توزیع طول برش خطی، برای سیستم‌های 2D استفاده شده و توجه خاصی برای بافت کانه در فضای 3D نشده است [۲۳، ۱۶]. روش‌های کانی‌شناسی خودکار مبتنی بر میکروسکوپ الکترونی (SEM)، متداول‌ترین راهکار برای به دست آوردن اطلاعات بافتی از کانه در فضای 3D هستند. در این روش‌ها با استفاده از ابزارهای پردازش، تصاویر برای استخراج اطلاعات بافتی و کانی‌شناسی پردازش می‌شوند. تکنیک‌های پردازش تصویر برای طبقه‌بندی اشیاء موجود در تصویر (مانند دانه‌ها، ذرات یا فازها) و بازبانی طیف وسیعی از ویژگی‌ها استفاده می‌شوند. در مطالعه بافت یک کانه، پردازش تصاویر با هدف تشخیص فاز، محاسبه فاکتورهای شکل جسم، عیار کانی‌ها و ارتباط بین فازها استفاده می‌شود.

باطله کارخانه‌های فرآوری آهن ذخایر ثانویه‌ای از آهن هستند، که خواص کانی‌شناسی و بافت آنها با توجه به فرآیندهای فرآوری صورت گرفته در کارخانه فرآوری (خردایش، جدایش‌های فیزیکی و فیزیکوشیمیایی) دستخوش تغییراتی شده است. از طرف دیگر این ذخایر ثانویه با توجه به تبیپ کانه‌زایی اولیه حاوی انواع کانی‌های با ارزش و گانگ، با مینرالیزاسیون پیچیده‌تری نسبت به کانه اولیه آهن هستند [۲۴]. در باطله‌های فرآوری آهن، کانی‌های گانگ از جمله کانی‌های حاوی سیلیس و آلومینا، در ابعاد ریز (حتی کمتر از ۲۵ میکرون) به صورت درگیر و پراکنده در متن کانی‌های با ارزش وجود دارند. از طرفی عنصر آهن در این نوع ذخایر، علاوه بر منیتیت در قالب کانی‌های دیگر مانند هماتیت، آرسنوپیریت، مارکارسیت و گارنت یافت می‌شود. تنوع کانی‌های موجود، پیچیده بودن درگیری کانی‌های آهن‌دار با سایر کانی‌های بارزش (مانند مس، عناصر نادر خاکی، طلا و نظایر آن) و گانگ

۲- مواد و روش

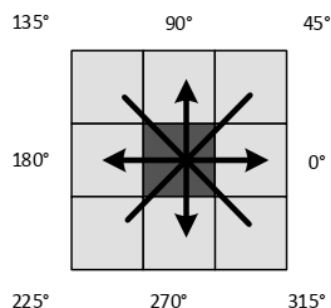
مطالعه حاضر بر روی نمونه‌ای از باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی صاحب واقع در شهرستان سقز- استان کردستان، انجام شده است. ذخیره باطله مورد مطالعه حاصل از جدایش مغناطیسی شدت پایین کانه آهن منیتیتی، به روش خشک است. در گام اول به نمونه‌برداری از ذخیره باطله مورد مطالعه اقدام شده است. برای نمونه‌برداری از دپوهای باطله کارخانه از یک دستگاه بیل مکانیکی استفاده شده است. دپوهای باطله به ۲۰ بخش تقسیم و به وسیله بیل مکانیکی از آنها نمونه‌برداری به عمل آمده است. در هر مرحله، پس از اختلاط‌های متوالی نمونه به وسیله بیل مکانیکی، مقدار یک باکت بیل از هر قسمت برداشت شده است، سپس تمامی نمونه‌ها در یک قسمت انباشت و به طور کامل با یکدیگر مخلوط شده‌اند. در نهایت به روش نمونه‌برداری مخروطی^۵، نمونه معرفی با وزن تقریبی ۵۰۰ کیلوگرم انتخاب و برداشت شده است. ابعاد ذرات باطله در محدوده ۰-۱۵ میلی‌متر بوده و ۸۰ درصد از ذرات ابعاد کمتر از ۶ میلی‌متر دارند.

بر روی نمونه باطله آنالیز تعیین ترکیب کانی‌شناسی به روش XRD انجام گرفته است. در راستای تعیین ویژگی‌های بافتی باطله، یک نمونه با استفاده از سنگ‌شکن غلتکی تا ابعاد کمتر از ۳/۳۵ میلی‌متر خرد شد، سپس در فراکسیون‌های ابعادی ۱+، ۱-، ۰/۵۰۰+، ۰/۵۰۰-، ۰/۲۵۰+، ۰/۲۵۰-، ۰/۱۰۶+، ۰/۱۰۶-، ۰/۴۵+ و ۰/۴۵- میلی‌متر طبقه‌بندی شد. بر روی هر فراکسیون دانه‌بندی آنالیزهای تعیین ترکیب شیمیایی (به روش XRF)، مطالعات کانی‌شناسی نوری و الکترونی انجام گرفت. برای آماده‌سازی مقاطع صیقلی و نازک جهت مطالعات میکروسکوپی، نمونه مورد نظر (در هر فراکسیون دانه‌بندی) ابتدا به روش سرد قالب‌گیری شده است، سپس برای از بین بردن ناهمواری‌ها، عمل سایش بر روی سطح هر مقطع به وسیله پودر ساب (کاربید سیلیسیم) انجام گرفت. در نهایت برای نمایان شدن سطوح فلزی، سطح مقاطع به وسیله اکسید آلومینیم صیقل داده شد. تصویربرداری از بافت کانه با موزاییک گرفتن تصاویر میدانی به وسیله میکروسکوپ نوری (Leitz polarizing) مدل SM-LUX-POL متعلق به دانشکده مهندسی معدن- دانشگاه تهران، انجام شد. برای تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز میکروسکوپ FEI مدل QUANTA استفاده شد. در تصاویر BSE^۶ میکروسکوپ الکترونی (تصویر حاصل از الکترون‌های برگشتی)، فازهای حاوی عناصر سنگین،

و کاهش درجه آزادی، فرآوری این ذخایر ثانویه را از نقطه نظر دستیابی به عیار و بازیابی مطلوب با چالش‌هایی مواجه خواهد کرد. از این‌رو برای پیش‌بینی رفتار ذخایر باطله‌های آهن در طی فرآیندهای فرآوری، مطالعات کانی‌شناسی برای شناسایی دقیق ویژگی‌های بافت آنها مورد نیاز است.

تاکنون تلاش‌هایی در زمینه استفاده از راهکار کانی‌شناسی در سطح 3D، برای ساخت مدل‌های ژئومتالورژیکی برای کانه‌های اولیه آهن انجام گرفته است [۲۸-۲۵]؛ اما در رابطه با ذخایر ثانویه آهن (باطله‌های فرآوری آهن) تحقیق مدونی گزارش نشده است. در این تحقیق از مفهوم شاخص ارتباط^۲ (AI) برای کمی کردن داده‌های بافت‌شناسی حاصل از مطالعات میکروسکوپی نوری و الکترونی باطله‌های آهن و کاربرد آنها در مراحل مختلف فرآوری شامل خردایش و جدایش مغناطیسی استفاده شده است. با کمی‌سازی داده‌های بافت و ارتباط آن با عیار کانی‌ها در ابعاد مختلف ذرات، می‌توان به دید گسترده‌ای در رابطه با رفتارهای فرآوری یک ذخیره در مراحل امکان‌سنجی و اولیه یک پروژه دست یافت.

یک روش ساده برای تخمین میزان ارتباط کانی‌های مختلف با یکدیگر و تعیین AI، استفاده از ماتریس توزیع همزمانی^۴ است. در این روش تصاویر به عنوان ماتریسی از مقادیر پیکسل در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۱). یک ذره با n فاز (n پیکسل) دارای ماتریس همزمانی $n \times n$ خواهد بود. هر سلول از ماتریس $((i,j))$ ، مطابق است با تعداد دفعاتی که سلول i با سلول j سطح مشترک دارد. با نرمال‌سازی ماتریس همزمانی، شاخص ارتباط بر اساس فراوانی ارتباط سطحی برای فازهای مختلف در نمونه حاصل می‌شود. این ماتریس، ماتریس شاخص ارتباط (AIM) نامیده می‌شود. در این ماتریس مقادیر غیرمورب شاخص‌های ارتباط هستند.



شکل ۱: تصویر شماتیک ماتریس همزمانی و پیکسل‌های نمایش داده شده در جهات مختلف

الگوهای به دست آمده برای آنالیز XRD نمونه مورد مطالعه، مربوط به فازهای کریستالی اصلی و فرعی تشکیل دهنده نمونه است؛ که حداقل ۳-۵ درصد جرمی نمونه را تشکیل می دهند، بنابراین این آنالیز قادر به شناسایی فازهایی کمتر از تقریباً ۳ درصد و نیز فازهای آمورف نخواهد بود.

بر اساس آنالیز تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRF عیار آهن کل در این نمونه ۱۳٫۱۵ درصد و FeO برابر با ۴٫۵۱ درصد گزارش شده است. بر این اساس، ۱۰٫۵۰ درصد از آهن در قالب کانی منیتیت و ۲٫۶۵ درصد آن به صورت غیرمنیتیتی است [۲۳]. در جدول ۲ نتایج آنالیز XRF برای هر فراکسیون دانه بندی بیان شده است. با توجه به جدول، با کاهش ابعاد ذرات، مقدار آهن کل افزایش یافته و در فراکسیون ابعادی ۰٫۲۵-۰٫۱۰۶ میلی متر به حدود ۲۲٫۵۰ درصد رسیده است. درصد وزنی ذرات این محدوده ابعادی ۱۵٫۵۰ درصد است. با کاهش اندازه ذرات به ۰٫۱۰۶-۰٫۰۴۵ میلی متر عیار آهن کل کاهش و برای ذرات ۰٫۰۴۵-۰ میلی متر مجدداً افزایش یافته است.

بر اساس مطالعات کانی شناسی نوری (OIA) انواع کانی های موجود در باطله مورد مطالعه شامل کانی های اکسیدی منیتیت و هماتیت، سولفیدهای پیریت، کالکوپیریت، کوولیت، کالکوسیت و پیروتیت، هیدروکسیدهای آهن گویت و لیمونیت و کانی های باطله کلینوپیروکسن، کلسیت، گارنت، اپیدوت، ترمولیت، کوارتز، کلریت، بیوتیت، فلدسپات، آپاتیت، اسفن و اکتینولیت هستند (شکل ۲). بر این اساس دپوی باطله مورد مطالعه، حاوی انواع کانی های با رده های اکسیدی،

روشن تر و فازهای سبک تر، تیره تر دیده می شوند.

در تصاویر میکروسکوپی نوری برای تعیین درجه آزادی و همچنین وضعیت آزادی و درگیری کانی های بارزش (شامل کانی های اکسیدی آهن و همچنین کانی های سولفیدی مس)، برای هر فراکسیون دانه بندی سه مقطع صیقلی استاندارد تهیه شد. از مقاطع صیقلی با بزرگنمایی $\times 200$ برای هر فراکسیون دانه بندی حداقل ۶۰ عکس میکروسکوپی دیجیتال تهیه شد. هر تصویر دیجیتالی حداقل ۸۰ ذره را پوشش می دهد، از این رو می توان گفت که برای هر مقطع حدود ۵۰۰-۴۸۰۰ ذره بررسی شد. توالی های پردازش تصویر شامل تفکیک فاز، جداسازی ذرات و استخراج ویژگی ها با نوشتن کد در نرم افزار MATLAB انجام شد. این روش به طور کامل در بخش مربوطه شرح داده شده است.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- شناسایی ویژگی های بافتی و کانی شناسی باطله های آهن

در جدول ۱، نتایج آنالیز XRD نیمه کمی باطله آمده است. دیوپسید $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$ با مقدار بیش از ۲۰ درصد فراوان ترین فاز موجود در باطله آهن مورد بررسی است. دو کانی کلسیت و گارنت پس از دیوپسید، فراوان ترین کانی ها هستند (با مقادیر هر یک بیش از ۱۳ درصد). آنالیز XRD حاکی از وجود کانی های رسی با مقدار متوسط ۶٫۸ درصد در باطله است. مقدار منیتیت به عنوان کانی بارزش در باطله به میزان تقریبی ۳ درصد گزارش شده است. لازم به ذکر است که

جدول ۱: نتایج آنالیز XRD نیمه کمی باطله سنگ آهن دانه بندی

نام فاز / کانی	فرمول شیمیایی	سیستم تبلور	درصد نیمه کمی
دیوپسید	$\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$	مونوکلینیک	۲۰٫۵
کلسیت	CaCO_3	هگزاگونال	۱۳٫۶
گارنت	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{13}$	کوبیک	۱۳٫۲
پلاژیوکلاز	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	تری کلینیک	۱۰٫۵
اپیدوت	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Fe}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{O},\text{OH})_2$	مونوکلینیک	۸٫۱
آلکالی فلدسپار	KAlSi_3O_8	تری کلینیک	۸٫۷
کانی های رسی	$\text{Ca}_{0.2}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	هگزاگونال	۶٫۸
کلریت	$(\text{Mg},\text{Fe})_5(\text{Al},\text{Si})_5\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	مونوکلینیک	۶٫۶
کوارتز	SiO_2	هگزاگونال	۴٫۵
مسکویت ایلیت	$(\text{K},\text{Ca},\text{Na})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	مونوکلینیک	۳٫۲
منیتیت	FeFe_2O_4	کوبیک	۳٫۰

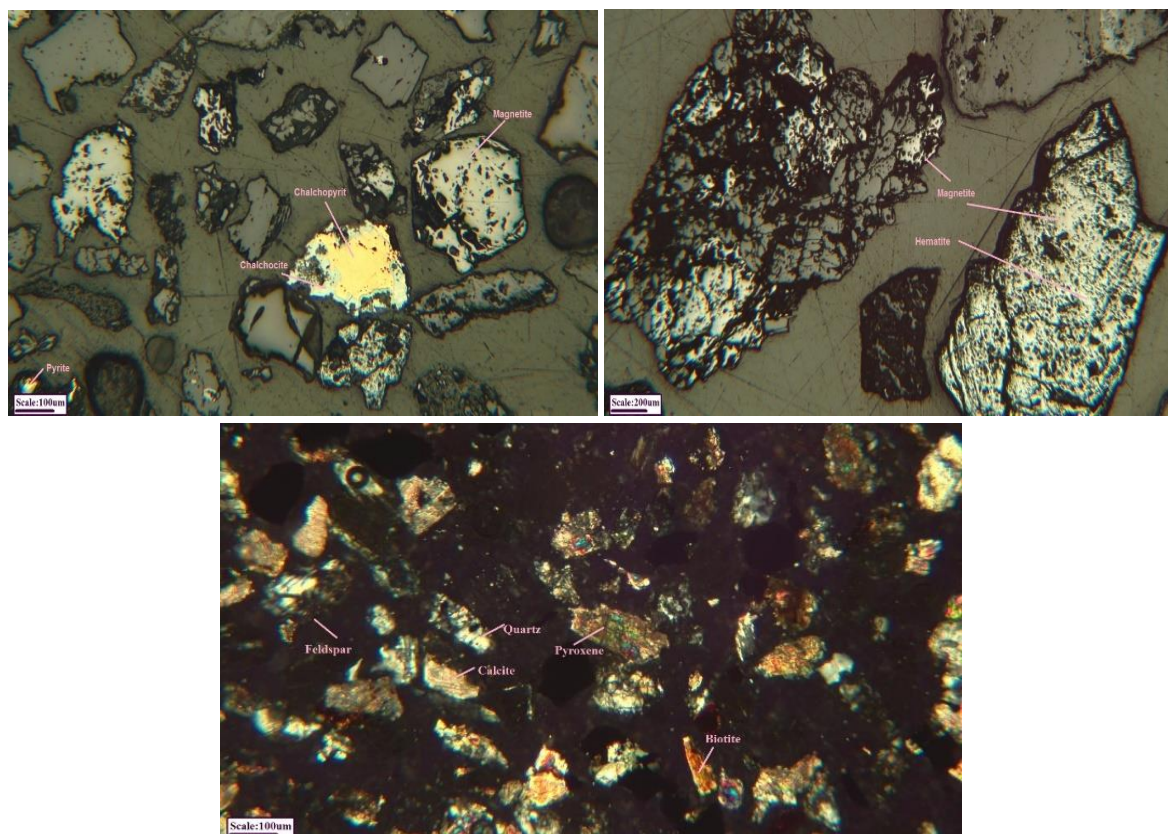
سولفیدی، هیدروکسیدی، کربناته و سیلیکاته است.

در نمودارهای میله‌ای شکل ۳ تغییرات فراوانی حجمی منیتیت و هماتیت نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با کاهش ابعاد ذرات تا ۴۵ میکرون، درصد حجمی این دو کانی روند افزایشی داشته است، پس از آن با کاهش ابعاد ذرات مقدار حجمی کانی‌های مذکور کاهش یافته است. درجه آزادی کانی‌های حاوی آهن، دیگر پارامتر مورد

بررسی بوده است. برای محاسبه درجه آزادی (درصد ذرات آزاد یک کانی به کل ذرات آن کانی) از تصاویر میکروسکوپی نوری استفاده شده است. تصاویر دیجیتالی تهیه شده، به وسیله نرم‌افزار ImageJ مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴). بدین ترتیب که با استفاده از ماژول grid این نرم‌افزار، شبکه‌ای با ابعاد مناسب بر روی تصاویر منطبق گردید و سپس با استفاده از ماژول count شمارش نقطه‌ای ذرات آزاد و درگیر انجام گرفت

جدول ۲: مقادیر وزنی و نتایج آنالیز XRF باطله کارخانه فرآوری آهن در هر فراکسیون دانه‌بندی

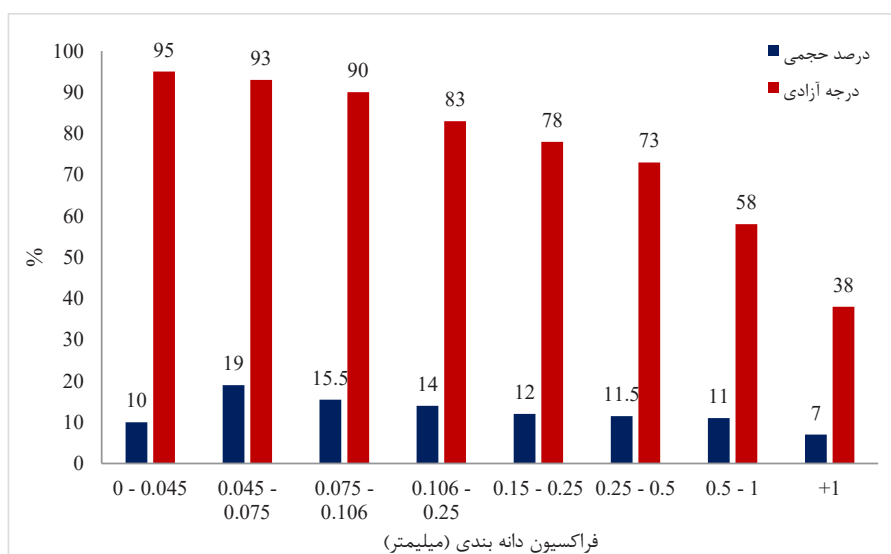
فراکسیون دانه‌بندی (mm)	درصد وزنی	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe(T) (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	S (%)	Cu (%)
+۱	۴,۲۰	۳۷,۵۳	۸,۳۸	۲۰,۲۲	۱۵,۶۶	۰,۷۴	۴,۱۷	۰,۴۶	۰,۱۱
+۰,۵۰۰ - ۱	۳۰,۹۰	۳۶,۶۵	۸,۹۷	۱۸,۵۹	۱۶,۳۴	۰,۷۵	۴,۱۹	۰,۵۸	۰,۱۴
+۰,۲۵۰ - ۰,۵۰۰	۱۷,۴۰	۳۳,۹۰	۷,۸۴	۱۹,۳۳	۱۸,۶۶	۰,۵۹	۳,۷۶	۰,۸۲	۰,۱۹
+۰,۱۰۶ - ۰,۲۵۰	۱۵,۵۰	۳۲,۱۳	۷,۰۲	۱۷,۱۰	۲۲,۴۸	۰,۴۶	۴,۷۳	۰,۵۱	۰,۲۱
+۰,۰۴۵ - ۰,۱۰۶	۸,۹۰	۳۳,۶۱	۸,۶۶	۱۹,۶۹	۱۵,۴۷	۰,۵۹	۲,۶۰	۰,۵۱	۰,۲۲
-۰,۰۴۵	۲۳,۱۰	۳۱,۲۶	۶,۹۸	۱۸,۹۰	۲۵,۰۳	۰,۶۵	۵,۸۹	۰,۳۱	۰,۲۵



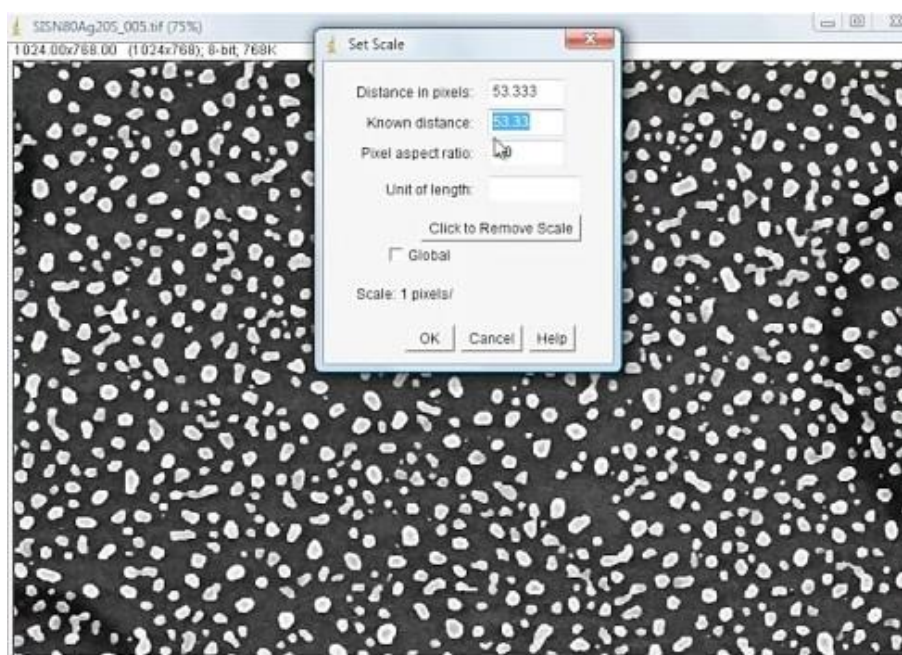
شکل ۲: تصاویر میکروسکوپی نوری حاوی انواع کانی‌های شناسایی شده در باطله آهن مورد مطالعه (تصاویر PPL و XPL)

با در نظر گرفتن مقدار ۹۰ درصد برای آزادی کانی‌ها، اکسیدهای آهن در ذرات با ابعاد کمتر از ۱۰۶ میکرون به آزادی رسیده‌اند. تغییرات درجه آزادی از ابعاد ذرات ۱ تا حدود ۱۰۶ میکرون در محدوده ۸۳-۹۵ درصد بوده و با شیب بسیار کمی کاهش می‌یابد، اما با افزایش ابعاد ذرات (از ۱۰۶ میکرون به بالا) درجه آزادی با افزایش ابعاد ذرات با شیب بیشتری کاهش یافته است.

و محاسبات مربوطه و تعیین میانگین درجه آزادی در تصاویر مختلف در نرم‌افزار اکسل به انجام رسید. علاوه بر این برای تعدادی از تصاویر دیجیتالی که کیفیت فرآیند segmentation در نرم‌افزار MATLAB رضایت‌بخش بود، از MATLAB نیز استفاده شد. در شکل ۳، نمودارهای میله‌ای درجه آزادی کانی‌های اکسیدی آهن نشان داده شده است. با توجه به شکل،



شکل ۳: درصد حجمی و درجه آزادی کانی‌های منیتیت و هماتیت در فراکسیون‌های مختلف دانه‌بندی باطله آهن



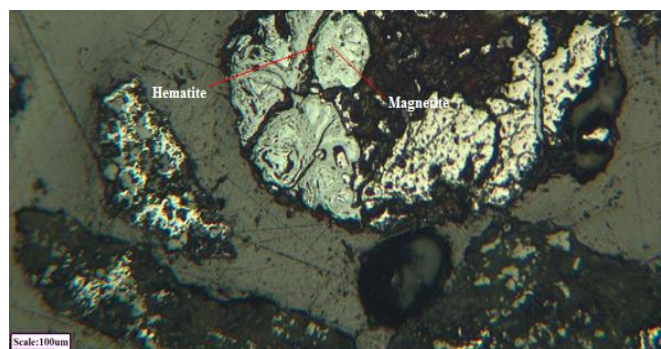
شکل ۴: تصویری از پردازش تصاویر میکروسکوپی به وسیله نرم‌افزار imageJ برای تعیین درجه آزادی

شاخص ارتباط برای اکسیدهای آهن (منیتیت و هماتیت) در باطله آهن مورد مطالعه اقدام شد. شاخص ارتباط پارامتر کمی‌سازی شده بافت و حاصل از اطلاعات بافت کانه منتج شده از مطالعات کانی‌شناسی است [۱۶]. توالی‌های پردازش تصویر شامل تفکیک فاز، جداسازی ذرات و استخراج ویژگی‌ها با نوشتن کد در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. کد نوشته شده می‌تواند بافت کانه و نمونه‌های ذرات را آنالیز و ویژگی‌های بافتی کانه را به صورت عددی بیان کند. برای تصاویر BSE، جداسازی فاز با تخصیص مقادیر آستانه چندگانه با توجه به طیفی از سطوح خاکستری مربوط به هر فاز آغاز شد. به مقادیر پیکسل تصویری که با هر بازه آستانه مطابقت داشته، مقدار جدیدی که نشان‌دهنده یک فاز بوده، اختصاص داده شد (شکل ۶). به ناحیه اپوکسی برای پردازش ساده‌تر اشیاء در طول پردازش تصویر، مقدار صفر اختصاص داده شد. در مرحله بعدی، مساحت هر فاز (تعداد پیکسل‌های اشغال شده به وسیله فاز) در یک ذره تعیین

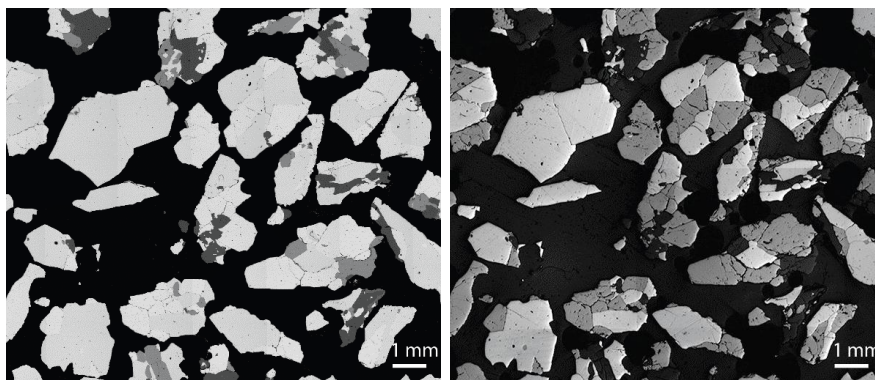
دیگر ویژگی مورد بررسی در مورد باطله‌های آهن، وجود آلتراسیون بوده است. آلتراسیون منیتیت به هماتیت در تمامی فراکسیون‌های دانه‌بندی مشاهده شده است (شکل ۵). منیتیت به عنوان کانی اصلی آهن در باطله مورد بررسی، در اثر دگرسانی به صورت موضعی- پدیده مارتیتی شدن- با هماتیت جایگزین شده است. لازم به ذکر است که این پدیده، بیشتر از طریق ریزشکستگی‌های موجود در منیتیت و با گذشت زمان ایجاد می‌شود. تغییرات میزان آلتراسیون برای این نمونه از حدود ۳ درصد برای ذرات با ابعاد ۴۵ میکرون، تا بیش از ۱۰ درصد برای ذرات با ابعاد ۱+ میلی‌متر متغیر است. آلتراسیون کانی کالکوپیریت به کالکوسیت، کوولیت و گوتیت و همچنین فلدسپات به کانی‌های رسی، در ذرات با ابعاد ۲۵۰+ میکرون مشاهده شده است.

۳-۲- تعیین شاخص ارتباط باطله آهن مورد مطالعه

با پردازش تصاویر میکروسکوپی الکترونی به تعیین



شکل ۵: تصویری از آلتراسیون منیتیت به هماتیت (مارتیتی شدن) در محدوده ابعادی ۰/۵۰۰-۰/۲۵۰+ میلی‌متر



شکل ۶: پردازش تصویر BSE (سمت راست) و نوری (سمت چپ) با طیف‌های رنگ خاکستری در نرم‌افزار MATLAB (فراکسیون دانه‌بندی ۱+ میلی‌متر)

$$C = \begin{pmatrix} 12 & 22 & 13 \\ 22 & 16 & 14 \\ 13 & 14 & 18 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$AIM_C = \begin{pmatrix} 0 & 62.9 & 37.1 \\ 61.1 & 0 & 38.9 \\ 48.1 & 51.9 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

در جدول ۴ مقادیر شاخص ارتباط کانی‌های منیتیت و هماتیت با سایر کانی‌های موجود در باطله آهن در فراکسیون‌های مختلف دانه‌بندی آمده است. بر اساس نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی و همچنین دسته‌بندی^۷ کانی‌ها به وسیله نرم‌افزار MATLAB، بیشترین سطح درگیری در تمامی فراکسیون‌های دانه‌بندی میان دو کانی اکسیدی آهن یعنی منیتیت و هماتیت است که ناشی از مارتیتی شدن منیتیت به هماتیت است. از این‌رو در ادامه این مقاله برای جلوگیری از تکرار، کلمه منیتیت یا عبارت کانی‌های اکسیدی آهن به معنی مجموع هر دو کانی منیتیت و هماتیت است.

شده است. برای تبدیل این مقدار به درصد وزنی، از چگالی کانی‌ها به عنوان فاکتورهای وزنی در محاسبه ترکیب استفاده شده است. همچنین مقدار مرز مشترک کانی‌ها با یکدیگر اندازه‌گیری شده است. در جدول ۳ نمونه‌ای از ماتریس همزمانی برای فراکسیون دانه‌بندی ۱+ میلی‌متر آمده است. در این فراکسیون ارتباط و درگیری کانی منیتیت (فاز ۱) با کانی‌های هماتیت (فاز ۲) و مجموع کانی‌های گانگ (فاز ۳) بررسی شده است.

بنابراین ماتریس همزمانی به صورت زیر خواهد بود (ماتریس C). با نرمال‌سازی ماتریس همزمانی (نرمال‌سازی سلول‌های غیرمورب در هر سطر یا ستون)، شاخص ارتباط بر اساس فراوانی ارتباط سطحی برای فازهای مختلف حاصل شده است. این ماتریس، ماتریس شاخص ارتباط (AIM) نامیده می‌شود. در ماتریس AIM مقادیر غیرمورب شاخص‌های ارتباط هستند. به عنوان مثال، فاز یک - یعنی منیتیت - ۶۲٫۹ درصد با فاز دو (هماتیت) و ۳۷٫۱ درصد با فاز سه (مجموع کانی‌های گانگ)، ارتباط دارد.

جدول ۳: جدول همزمانی، نشان‌دهنده فراوانی منیتیت با هماتیت و مجموع کانی‌های گانگ

همزمانی فازها	۰°	۴۵°	۹۰°	۱۳۵°	۱۸۰°	۲۲۵°	۲۷۰°	۳۱۵°	مجموع
۱-۱	۲	۱	۳	۰	۲	۱	۳	۰	۱۲
۱-۲	۲	۳	۳	۳	۲	۱	۴	۴	۲۲
۱-۳	۳	۱	۰	۱	۱	۳	۱	۳	۱۳
۲-۱	۲	۱	۴	۴	۲	۳	۳	۳	۲۲
۲-۲	۴	۱	۲	۱	۴	۱	۲	۱	۱۶
۲-۳	۲	۴	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۱۴
۳-۱	۱	۳	۱	۳	۳	۱	۰	۱	۱۳
۳-۲	۲	۱	۱	۱	۲	۴	۲	۱	۱۴
۳-۳	۲	۱	۴	۲	۲	۱	۴	۲	۱۸

جدول ۴: شاخص ارتباط کانی‌های اکسیدی آهن با سایر کانی‌های موجود در باطله در فراکسیون‌های دانه‌بندی مختلف

فراکسیون دانه‌بندی (mm)	پیریت	کالکوپیریت	کلسیت / دیوپسید	کلریت	بیوتیت	فلدسپار	گارت / کوارتز
+۱	۰٫۹۰	۰٫۴۰	۲۵٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۰	۰٫۰۰	۲۰٫۰۰
+۰٫۵۰ - ۱	۰٫۸۰	۰٫۴۰	۲۲٫۰۰	۳٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۰۰	۱۸٫۰۰
+۰٫۲۵۰ - ۰٫۵۰۰	۰٫۸۰	۰٫۳۰	۲۰٫۰۰	۲٫۰۰	۰٫۳۰	۰٫۰۰	۱۷٫۰۰
+۰٫۱۰۶ - ۰٫۲۵۰	۰٫۳۰	۰٫۲۰	۱۵٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۲۰	۱٫۰۰	۱۰٫۰۰
+۰٫۰۴۵ - ۰٫۱۰۶	۰٫۳۰	۰٫۲۰	۱۰٫۰۰	۰٫۵۰	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۱۲٫۰۰
-۰٫۰۴۵	۰٫۰۵	۰٫۱۰	۵٫۰۰	۰٫۵۰	۰٫۱۰	۰٫۰۵	۴٫۰۰

در هر فراکسیون دانه‌بندی استفاده شد. از این پارامتر می‌توان برای بررسی خواص و ویژگی‌های رفتار خردایشی و مغناطیسی ذرات در هر فراکسیون دانه‌بندی استفاده کرد. برای تعیین عیار کانی‌ها در نمونه باطله از روش تبدیل عنصر به کانی (EMC)^۸ استفاده شد. در این روش از نتایج آنالیزهای شیمیایی و مطالعات میکروسکوپی (به عنوان مودال مرجع) برای تعیین عیار کانی در هر فراکسیون دانه‌بندی، استفاده شده که نتایج آن در مقاله‌ای جداگانه چاپ شده است [۲۳]. در جدول ۵ نسبت AI کانی‌های اکسیدی آهن (منیتیت و هماتیت) به عیار کانی‌های همراه در فراکسیون‌های مختلف دانه‌بندی نمونه باطله آهن، ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش ابعاد ذرات، مقدار نسبت AI به عیار کاهش یافته است. بر اساس مفهوم ارائه شده، این پارامتر با شاخص ارتباط دو کانی نسبت مستقیم و با عیار کانی‌های همراه نسبت معکوس دارد. با تعیین عدد ۱ به عنوان شاخصی برای این نسبت، مشخص است که مقادیر بیشتر از ۱ گویای ارجحیت کانی هدف (در اینجا کانی‌های اکسیدی آهن) نسبت به کانی مرتبط و مقادیر کمتر از ۱ در کل نشان‌دهنده ارجحیت کانی مرتبط در شرایط مورد بررسی است. منظور از ارجحیت غلبه ویژگی کانی مورد نظر (در اینجا خاصیت مغناطیسی) در ذرات درگیر است و در صورت انجام فرآیند جداسازی این ذرات به بخش مربوطه منتقل می‌شوند. طبق جدول ۵، در محدوده ابعادی ۲۵۰+ میکرون کانی‌های اکسیدی آهن نسبت به کانی پیریت و در محدوده ابعادی ۴۵+ میکرون نسبت به کانی کالکوپیریت، ارجحیت دارد. به عبارت دیگر مقدار کانی‌های اکسیدی آهن در این فراکسیون‌ها بیشتر از کانی درگیر همراه است. با کاهش ابعاد ذرات و در نتیجه کاهش نسبت AI به عیار، ارجحیت به فاز همراه کانی‌های اکسیدی آهن تغییر یافته است. یعنی در طی پروسه‌های فرآوری رفتار و خواص کانی‌های همراه غالب

بر اساس ارقام ارائه شده در جدول ۴، با کاهش ابعاد ذرات، شاخص ارتباط منیتیت با تمامی کانی‌های موجود در نمونه کاهش یافته است. با کاهش ابعاد ذرات، درجه آزادی افزایش و میزان درگیری کانی‌ها کاهش می‌یابد. بیشترین شاخص ارتباط مربوط به کانی منیتیت با کانی‌های کلسیت و دیوپسید در ابعاد ۲۵۰+ میکرون است. پس از آن در ابعاد یاد شده، منیتیت بالاترین مقادیر ارتباط با کانی‌های گارنت و کوارتز را دارد. کمترین میزان ارتباط نیز مربوط به منیتیت با کانی فلدسپار است. همچنین ارتباط منیتیت با کانی‌های سولفیدی از جمله کالکوپیریت پایین است.

اطلاعات جدول ۴ برای طرح مدار خردایش و دستیابی به ابعاد بهینه ذرات با توجه به میزان درگیری کانی‌های آهن با سایر کانی‌ها بسیار ارزشمند است. مشابه این جدول، می‌توان اطلاعاتی در مورد سایر کانی‌های باارزش یا منتخب در خصوص میزان درگیری آنها به دست آورد و بر اساس آن برای حصول بهینه‌ترین نتایج نسبت به طراحی مدار فرآوری اقدام کرد. در این زمینه پربان و همکاران (۲۰۱۸) نتیجه گرفتند که توزیع شاخص ارتباط ذرات در تعریف رفتار شکست ذرات اهمیت دارد. با مقایسه شاخص ارتباط در نمونه اولیه و خرد شده، آنها به یک نتیجه‌گیری در مورد تصادفی بودن در مقابل درجه ترجیحی در شکست، دست یافتند [۱۶]. این مقدار تخمینی است که چگونه شکستگی یک فاز را از فاز دیگر در مقایسه با بافت سنگ اولیه بیان می‌کند.

۳-۳- بررسی رفتار فرآوری باطله‌های آهن بر مبنای شاخص ارتباط

در راستای بررسی رفتار فرآوری منیتیت در باطله‌های آهن، با در نظر گرفتن درجه آزادی و عیار کانی‌ها، از پارامتر حاصل از تقسیم شاخص ارتباط به عیار کانی همراه منیتیت

جدول ۵: پارامتر نسبت شاخص ارتباط کانی‌های اکسیدی آهن به عیار کانی همراه در فراکسیون‌های مختلف دانه‌بندی نمونه باطله آهن

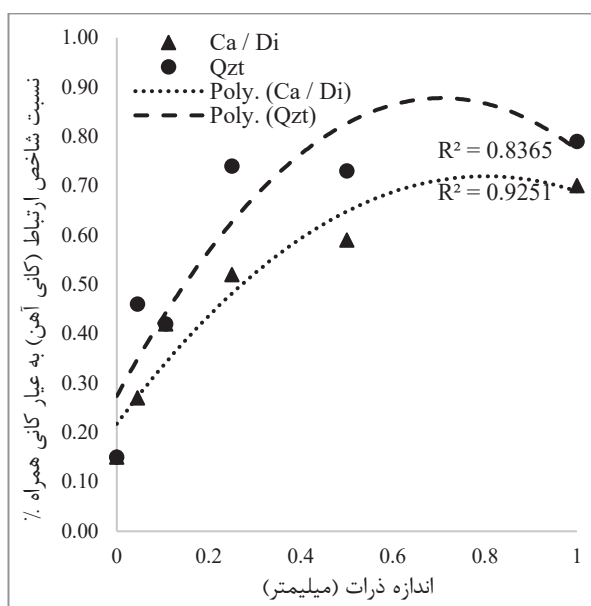
فراکسیون دانه‌بندی (mm)	پیریت	کالکوپیریت	کلسیت / دیوپسید	کلریت	بیوتیت	فلدسپار	گارنت / کوارتز
+۱	۱/۵۵	۴/۰۰	۰/۷۰	۰/۳۳	۰/۴۰	۰/۰۰	۰/۷۹
+۰.۵۰۰ - ۱	۱/۷۰	۳/۶۳	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۰۰	۰/۷۳
+۰.۲۵۰ - ۰.۵۰۰	۱/۲۷	۲/۷۳	۰/۵۲	۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۷۴
+۰.۱۰۶ - ۰.۲۵۰	۰/۶۴	۲/۰۰	۰/۴۲	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۴۲
+۰.۰۴۵ - ۰.۱۰۶	۰/۵۶	۱/۶۷	۰/۲۷	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۴۶
-۰.۰۴۵	۰/۱۶	۰/۸۳	۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۱۵

مغناطیسی بازیابی خواهند شد. این مساله از نظر استحصال عناصر ارزشمندی همچون مس اهمیت دارد، اما از دیدگاه افزایش مقدار گوگرد ناشی از این دو کانی (CuFeS_2 , FeS_2) در کنسانتره آهن لازم به بررسی است. در صورت دستیابی به عیار مناسب برای مس در کنسانتره آهن، می‌توان با انجام فرآیند فلوتاسیون بر روی آن علاوه بر استحصال مس، میزان گوگرد کنسانتره را به کمتر از حد مجاز (۰/۲ درصد در کنسانتره‌های آهن) تقلیل داد.

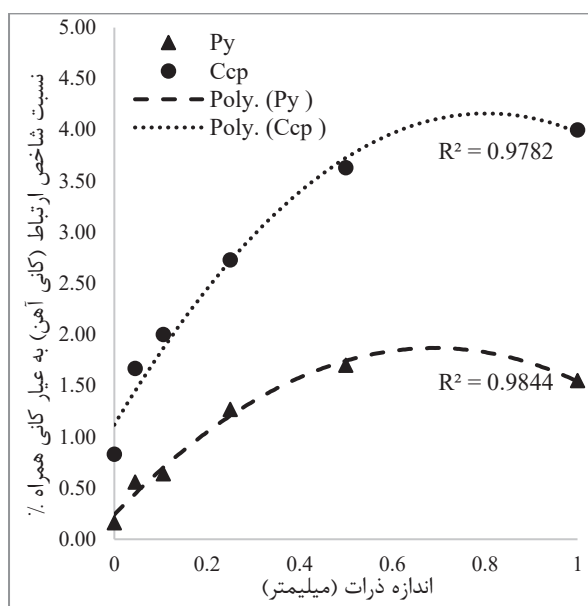
از طرفی در فراکسیون دانه‌بندی $250+ \mu\text{m}$ میکرون، مقدار کم نسبت شاخص ارتباط به عیار کانی‌های گانگ کلسیت، دیوپسید و کوارتز نشان‌دهنده ارجح بودن کانی‌های گانگ است (شکل ۷-ب)، بنابراین با جدایش مغناطیسی، بخشی از این کانی‌ها که درگیر با کانی‌های آهن هستند، به کنسانتره بازیابی خواهند شد. از این رو لازم است که با تغییرات در مدار خردایش تا ابعاد کمتر از $250 \mu\text{m}$ میکرون، به درجه آزادی بالاتری برای اکسیدهای آهن دست یافته شود؛ تا از بازیابی باطله‌ها به کنسانتره در طی جدایش مغناطیسی جلوگیری شود. با کاهش ابعاد ذرات و افزایش درجه آزادی، شاخص ارتباط کاهش می‌یابد، در نتیجه نسبت شاخص ارتباط (نسبت سطح درگیری) به عیار کانی باطله کاهش می‌یابد (ارجحیت کانی گانگ) و می‌توان انتظار داشت که طی فرآیند جدایش مغناطیسی باطله‌های آهن، عیار

خواهد بود. در رابطه با سایر فازهای موجود (کانی‌های غیرفلزی و گانگ)، در تمامی فراکسیون‌های دانه‌بندی، کانی‌های گانگ ارجحیت داشته و کانی‌های اکسیدی آهن فاز همراه هستند.

پارامتر نسبت شاخص ارتباط به عیار کانی همراه برای بررسی توجیه رفتار فرآوری ذراتی که به درجه آزادی مناسب نرسیده‌اند، کاربرد دارد. در مورد ذرات حاوی کانی‌های آهن با استفاده از این پارامتر می‌توان به یک تخمین و پیش‌بینی مناسب برای جدایش مغناطیسی آنها دست یافت. با کاهش اندازه ذرات و رسیدن به درجه آزادی مناسب این پارامتر با محدودیت مواجه خواهد بود، زیرا در این حالت کانی هدف آزاد و رفتار آن متأثر از شرایط فرآیند خواهد بود و پارامترهای بافت کانه برای پیش‌بینی رفتار آن درجه اهمیت کمتری دارند. در شکل ۷، برای کانی‌های اکسیدی آهن تغییرات مقدار نسبت AI به عیار کانی‌های فلزی (پیریت و کالکوپیریت) و همچنین عمده‌ترین کانی‌های گانگ یعنی کانی‌های گروه کلسیت/دیوپسید و کوارتز، نشان داده شده است. در رابطه با کانی‌های فلزی پیریت و کالکوپیریت، در ابعاد $250+ \mu\text{m}$ میکرون مقدار این نسبت بالاتر از ۱ است (شکل ۷-الف)، در نتیجه کانی‌های اکسیدی آهن ارجح‌تر هستند، بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که در صورت انجام جدایش مغناطیسی بر روی باطله‌ها در این ابعاد، یقیناً پیریت و کالکوپیریت به کنسانتره



(ب)



(الف)

شکل ۷: شاخص ارتباط کانی‌های اکسیدی آهن الف) با کانی‌های فلزی و ب) با باطله‌های غیرفلزی در فراکسیون‌های مختلف باطله آهن

کانی‌های کلسیت، دیوپسید و کوارتز در ابعاد ریزتر از ۱۰۶ میکرون به صورت چشمگیری کاهش یابد. این روند کاهش عیار برای سایر فازهای باطله نیز صادق است.

۳-۴- اعتبارسنجی- جدایش مغناطیسی

برای اعتبارسنجی برآوردهای به دست آمده از کمی‌سازی اطلاعات بافت باطله‌های آهن و تأثیر آن بر رفتار فرآوری، بر روی نمونه‌ای از باطله آهن با d_{80} برابر با ۲ میلی‌متر، آزمایش جدایش مغناطیسی انجام شده است. در این آزمایش نمونه‌ای به وزن ۲۰ کیلوگرم با عیار ۱۷/۸۳ آهن، به درام مغناطیسی تر با سرعت دوران (rpm) ۵۰ و شدت میدان ۲۰۰۰ گوس وارد شده است. در طی این آزمایش ۳۳/۵ درصد وزنی از بار ورودی به درام مغناطیسی به کنسانتره بازیابی شده و مابقی آن (۶۶/۵ درصد وزنی) به باطله منتقل شده است. در این آزمایش عیار و بازیابی آهن به کنسانتره به ترتیب ۳۱ و ۵۸/۲ درصد تعیین شده است.

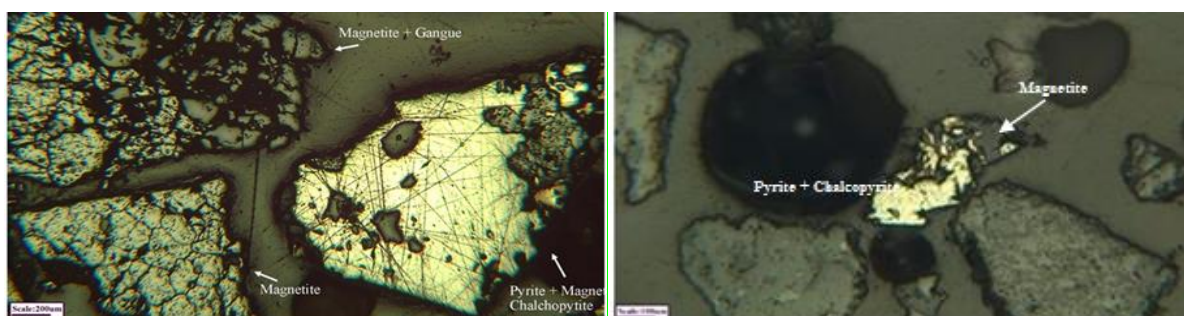
کنسانتره و باطله حاصل از این آزمایش در فراکسیون‌های دانه‌بندی ۱+، ۱-، ۰/۵۰۰+، ۰/۵۰۰-، ۰/۲۵۰+ و ۰/۲۵۰- میلی‌متر طبقه‌بندی شده‌اند و سپس بر روی آنها آنالیز XRF برای تعیین ترکیب شیمیایی انجام شده است. فراکسیون‌های یاد شده با دیدگاه بررسی رفتار ذرات درشت دانه، ذرات در محدوده متوسط و ذرات ریز دانه انتخاب شده‌اند. در جدول ۶ نتایج آنالیز XRF کنسانتره و باطله در هر فراکسیون آمده است. بر اساس جدول ۶، با کاهش ابعاد ذرات، عیار آهن کل در کنسانتره افزایش یافته که این مساله ناشی از افزایش

درجه آزادی کانی‌های اکسیدی آهن (منیتیت و هماتیت) و بازیابی آنها به کنسانتره است. در ذرات دانه درشت‌تر همانند محدوده‌های ابعادی ۱+ میلی‌متر عیار گوگرد در کنسانتره بیش از باطله است. این روند در رابطه با عیار مس نیز صادق است. در بخش قبل (محاسبه نسبت شاخص ارتباط به عیار کانی همراه) این نتیجه پیش‌بینی شده بود؛ که در محدوده‌های ابعادی ۲۵۰+ میکرون پیریت و در ۱۰۶+ میکرون کالکوپیریت به کنسانتره بازیابی خواهند شد و در نتیجه مقدار عناصر گوگرد و مس در کنسانتره افزایش خواهد یافت. برای تایید هرچه بیشتر این نتیجه از کنسانتره در محدوده‌های ابعادی ۱+ و ۲۵۰+ میلی‌متر مقطع صیقلی تهیه و مطالعه گردید که در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

بررسی ترکیبات همراه از جمله SiO_2 نیز گویای مقادیر بالاتر آنها در کنسانتره برای ذرات با اندازه ۲۵۰+ میلی‌متر است. علت این امر درگیری کانی‌های گانگ با منیتیت در محدوده‌های درشت دانه است که در بخش قبل بیان گردید. در محدوده ابعادی ۲۵۰- میلی‌متر با افزایش درجه آزادی روند معکوس شده و بخش عمده کانی‌های گانگ به باطله منتقل شده‌اند. این محدوده ابعادی و رفتار جدایش مغناطیسی در بخش پیشین با استفاده از اطلاعات بافتی پیش‌بینی شده بود. در مورد کانی‌های گانگ حاوی CaO، عیار آنها در کنسانتره کمتر از باطله است؛ که این نتیجه در جدول ۵ (کانی‌های کلسیت/دیوپسید) بر اساس اطلاعات بافتی پیش‌بینی شده بود.

جدول ۶: نتایج آنالیز XRF کنسانتره و باطله آزمایش جدایش مغناطیسی در هر فراکسیون دانه‌بندی

فراکسیون دانه‌بندی (mm)	محصول	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	Fe(T) %	K ₂ O %	MgO %	S %	Cu %
تمامی ابعاد	خوراک	۳۳/۶۱	۶/۶۸	۱۶/۹۶	۱۷/۸۳	۰/۵۹	۳/۷۹	۱/۲۰	۰/۲۸
۱+	کنسانتره	۲۷/۸۵	۴/۲۹	۱۴/۳۷	۳۱/۴۷	۰/۲۳	۴/۷۷	۰/۷۰	۰/۱۱
	باطله	۴۱/۴۲	۹/۳۸	۲۲/۹۰	۱۰/۱۴	۰/۹۵	۴/۵۱	۰/۲۵	۰/۰۶
۱- ۰/۵۰۰+	کنسانتره	۲۴/۹۷	۴/۴۶	۱۱/۸۶	۳۵/۲۶	۰/۲۵	۴/۶۷	۰/۵۳	۰/۱۲
	باطله	۴۰/۱۶	۹/۰۰	۲۲/۴۴	۱۱/۵۳	۰/۷۶	۳/۷۴	۰/۴۷	۰/۰۴
۰/۲۵۰- ۰/۵۰۰+	کنسانتره	۲۶/۴۷	۵/۵۳	۱۲/۵	۳۱/۴۷	۰/۳۹	۴/۶۸	۰/۴۹	۰/۱۱
	باطله	۳۸/۴۳	۸/۴۸	۲۳/۱۵	۱۲/۴۷	۰/۵۵	۴/۵۴	۱/۰۴	۰/۱۳
۰/۲۵۰-	کنسانتره	۲۳/۲۱	۴/۵۹	۱۰/۲۱	۳۷/۹۸	۰/۲۹	۳/۹۹	۰/۴۲	۰/۱۶
	باطله	۳۹/۱۳	۹/۲۱	۲۳/۸۲	۱۲/۵۸	۰/۶۵	۳/۶۴	۱/۰۳	۰/۲۰



شکل ۸: درگیری منیتیت با کانی‌های فلزی سولفیدی و کانی‌های گانگ در کنسانتره مغناطیسی (تصویر سمت راست ابعاد ۱+ میلی‌متر و تصویر سمت چپ ابعاد ۰/۲۵+ میلی‌متر)

۴- نتیجه‌گیری

با کانی‌های هماتیت، کلسیت، دیوپسید، گارنت و کوارتز در ابعاد ۲۵۰+ میکرون است. با کاهش ابعاد ذرات شاخص ارتباط منیتیت با تمامی کانی‌های شناسایی شده در نمونه کاهش می‌یابد. بر اساس این اطلاعات می‌توان میزان خردایش و شرایط آن را برای حصول بهینه‌ترین نتایج طراحی کرد. نسبت شاخص ارتباط به عیار کانی همراه با منیتیت به عنوان یک پارامتر مفید برای بررسی رفتار جدایش مغناطیسی منیتیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق برای فرآوری باطله مورد مطالعه، در صورت انجام جدایش مغناطیسی در ابعاد ۲۵۰+ میکرون، یقیناً پیریت و کالکوپیریت به کنسانتره مغناطیسی منتقل خواهند شد. با کاهش ابعاد ذرات تا ۱۰۶- میکرون علیرغم عیار بالای کانی‌های کلسیت، دیوپسید و کوارتز، با جدایش مغناطیسی باطله‌های آهن، بخش کمتری از این کانی‌ها به کنسانتره راه خواهند یافت.

۵- مراجع

- [1] Rumpf, H. (1973). "Physical aspects of comminution and new formulation of a law of comminution". Powder Technology, 7(3): 145-159.
- [2] Dunham, S., and Vann, J. (2007). "Geometallurgy, geostatistics and project value—does your block model tell you what you need to know". In: Proceedings of the Project Evaluation Conference, Melbourne, Australia, 19-20.
- [3] Lynch, A. (2015). "Comminution Handbook". Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- [4] Lotter, N. O., Kowal, D. L., Tuzun, M. A., Whittaker, P. J., and Kormos, L. (2003). "Sampling and flotation testing of Sudbury Basin drill core for process mineralogy modelling". Minerals Engineering, 16(9): 1133-1144.

بازفرآوری ذخایر ثانویه آهن یا باطله‌های فرآوری آهن به لحاظ اقتصادی، محیط زیستی، تقاضای بالای آهن و کاهش حجم استخراج از منابع اولیه حایز اهمیت است. با این وجود بازیابی آهن از باطله‌های فرآوری آن به دلیل عیار پایین آهن و مینرالیزاسیون پیچیده با چالش‌های متعددی مواجه است. در تحقیق حاضر سعی بر آن بوده است که با تعیین خواص کانی‌شناسی و شناسایی بافت باطله‌های آهن نسبت به رایج الگوریتمی برای بازفرآوری این دست از ذخایر ثانویه آهن و حل چالش‌های آنها پرداخته شود. انجام مطالعات کانی‌شناسی شامل طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس و میکروسکوپی نوری اطلاعات بنیادی در رابطه با حضور کانی منیتیت در باطله‌های آهن و نحوه ارتباط آن با کانی‌های گانگ حاصل کرده است. در نمونه مورد مطالعه یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شناسایی شده پدیده مارتیتزاسیون و آلتراسیون حاشیه‌های کانی منیتیت به هماتیت است. این پدیده بر رفتار مغناطیسی منیتیت و شدت میدان مورد نیاز برای جدایش آن تاثیر خواهد گذاشت. همچنین مطالعات میکروسکوپی نوری با بررسی درجه آزادی کانی منیتیت به این نتیجه منجر شد که با در نظر گرفتن عدد ۹۰ درصد برای آزادی کانی‌ها، اکسیدهای آهن در ذرات با ابعاد کمتر از ۱۰۶ میکرون به درجه آزادی مناسب رسیده‌اند.

بر اساس مطالعات میکروسکوپی الکترونی، به محاسبه و تعیین پارامتر جدیدی به نام شاخص ارتباط اقدام شد. این شاخص به تعیین میزان درگیری کانی هدف (در اینجا منیتیت) با سایر کانی‌های با ارزش و گانگ اشاره دارد. بر اساس بررسی‌های انجام شده برای نمونه باطله آهن مورد بررسی، بیشترین شاخص ارتباط به ترتیب مربوط به کانی منیتیت

- J. (2018). "Ore texture breakage characterization and fragmentation into multiphase particles". Powder Technology, 327: 57-69.
- [17] Sousa, R., Futuro, A., Fiúza, A., and Leite, M. M. (2020). "Pre-concentration at crushing sizes for low-grade ores processing—Ore macro texture characterization and liberation assessment". Minerals Engineering, 147: 106156.
- [18] Perez-Barnuevo, L., Lévesque, S., and Bazin, C. (2018). "Automated recognition of drill core textures: A geometallurgical tool for mineral processing prediction". Minerals Engineering, 118: 87-96.
- [19] Nguyen, A., Tungpalan, K., Evans, C., Manlapig, E., Jackson, J., Nguyen, K., and Valenta, R. (2021). "A method for rapid estimation of processing behaviour based on ore texture". Minerals Engineering, 171: 107111.
- [20] Zhang, Y., Francois, N., Henley, R. W., Knuefing, L., Turner, M., Saadatfar, M., Brink, F., and Knackstedt, M. (2024). "In-situ study of texture-breakage coupling in a copper ore using X-ray micro-CT". Minerals Engineering, 205: 108464.
- [21] Bonnici, N., Hunt, J. A., Walters, S. G., Berry, R., and Collett, D. (2008, September). "Relating textural attributes to mineral processing: Developing a more effective approach for the Cadia East Cu–Au porphyry deposit". In: Proceedings of the ninth international congress for applied mineralogy conference (ICAM), 4-5.
- [22] Lamberg, P. (2011). "Particles—the bridge between geology and metallurgy". In: Proceedings of Conference in Mineral Engineering, Luleå, Sweden, 1-16.
- [23] Kazemi, F., and Abdollahzadeh, A. A. (2024). "Valorisation of iron ore tailing piles: utilisation of element-to-mineral conversion and association index to building mineralogical modal". Canadian Metallurgical Quarterly, 1-14.
- [24] Galvão, 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.
- [25] Lamberg, P., Rosenkranz, J., Wanhainen, C., Lund, C., Minz, F., Mwanga, A., and Parian, M. (2013, September). "Building a geometallurgical model in iron ores using a mineralogical approach with liberation data". In: Proceedings of the Second AusIMM International Geometallurgy Conference, Brisbane, Australia, 317-324.
- [26] Parian, M. (2017). "Development of a geometallurgical framework for iron ores—A mineralogical approach to 857-864.
- [5] Becker, M., Brough, C., Reid, D., Smith, D., and Bradshaw, D. (2008). "Geometallurgical characterisation of the Merensky Reef at Northam Platinum Mine; comparison of normal, pothole and transitional reef types". In: International Congress for Automated Mineralogy, 391-399.
- [6] Hunt, J. A., Berry, R., Walters, S., Bonnici, N., Kamenetsky, M., Nguyen, K., and Evans, C. L. (2008). "A new look at mineral maps and the potential relationships of extracted data to mineral processing behaviours". In: Ninth International Congress for Applied Mineralogy, AusIMM., 429-432.
- [7] Walters, S. (2008). "An overview of new integrated geometallurgical research". Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, 79-82.
- [8] Can, N. M., Celik, I. B., Bicak, O., and Altun, O. (2013). "Mass balance and quantitative mineralogy studies for circuit modification". Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 34(5): 348-365.
- [9] Tungpalan, K., Wightman, E., and Manlapig, E. (2015). "Relating mineralogical and textural characteristics to flotation behaviour". Minerals Engineering, 82: 136-140.
- [10] Wills, B. A., and Napier-Munn, T. (2016). "Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, seventh ed". Elsevier Science and Technology.
- [11] Rincon, J., Gaydardzhiev, S., and Stamenov, L. (2019). "Investigation on the flotation recovery of copper sulphosalts through an integrated mineralogical approach". Minerals Engineering, 130: 36-47.
- [12] Bahrami, A., Abdollahi, M., Mirmohammadi, M., Kazemi, F., Danesh, A., and Shokrzadeh, M. (2020). "A process mineralogy approach to study the efficiency of milling of molybdenite circuit processing". Scientific Reports, 10(1): 21211.
- [13] Zhang, J., and Subasinghe, N. (2012). "Extracting ore texture information using image analysis". Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 121(3): 123-130.
- [14] Lund, C., Lamberg, P., and Lindberg, T. (2015). "Development of a geometallurgical framework to quantify mineral textures for process prediction". Minerals Engineering, 82: 61-77.
- [15] Hilden, M. M., and Powell, M. S. (2017). "A geometrical texture model for multi-mineral liberation prediction". Minerals Engineering, 111: 25-35.
- [16] Parian, M., Mwanga, A., Lamberg, P., and Rosenkranz,

particle-based modeling". Doctoral dissertation, Luleå University of Technology.

[27] Koch, P. H., Lund, C., and Rosenkranz, J. (2019). "Automated drill core mineralogical characterization method for texture classification and modal mineralogy estimation for geometallurgy". *Minerals Engineering*, 136: 99-109.

[28] Lishchuk, V., Lund, C., Koch, P. H., Gustafsson, M., and Pålsson, B. I. (2019). "Geometallurgical characterisation of Leveäniemi iron ore—Unlocking the patterns". *Minerals Engineering*, 131: 325-335.

¹ Process mineralogy

² Association Index Matrix

³ Association Index

⁴ Co-occurrence matrix

⁵ Cone and quartering

⁶ Back-scattered electrons

⁷ Segmentation

⁸ Element to Mineral conversion