Journal of Mineral Resources Engineering, 7(3): 139-153, (2022)

Imam Khomeini International University
Vol. 7, No. 3, Autumn 2022

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

Research Paper

Investigation of the Effect of Various Parameters on the Ore Hardness of Gole-Gohar's No. 1 Mine

Sfaram Jooneghani M.[1], Razavian S.M.[2*], Ghorbannejad M.[3]

1- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
2- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
3- M.Sc, Mineral Processing Senior Researcher, Golgohar Mining and Industrial Company, Sirjan, Iran

Received: 18 Feb. 2021 **Accepted: 17 Jul. 2021**

Abstract: Attention to the hardness of ores and their grindability is increasing due to the importance of energy consumption. In this study, 73 samples of iron ore were prepared from Gole-Gohar's No. 1 mine, and the SAG power index test was performed to measure hardness. The distribution of the hardness values of these samples and its comparison with the results of the last five years showed a significant increase in the hardness of the mine so that the average hardness increased from 32.1 minutes to 65.6 minutes. In addition, the hardness distribution of Gole-Gohar mine demonstrated that 52%, 26%, and 22% of the ore were obtained with a hardness of less than 50 minutes (soft materials), 50-100 minutes (medium), and more than 100 minutes (hard), respectively. Among the hardness-related parameters, the total Fe, S, Fe/FeO ratio, density, and magnetite recovery in the Davis tube test had no significant relationship with hardness, indicating the special importance of homogenizing the feed to the processing plant based on ore hardness in addition to grade homogenization. However, mineralogical factors such as texture, the composition of the constituent minerals, and the type and frequency of the constituent minerals have a significant effect on the hardness of the samples.

Keywords: Iron Ore, Hardness, SPI Test, Gole-gohar.

How to cite this article
Sfaram Jooneghani, M., Razavian, S. M., and Ghorbannejad, M. (2022). *"Investigation of the effect of various parameters on the ore hardness of Gole-Gohar's No. 1 mine"*. Journal of Mineral Resources Engineering, 7(3): 139-153.
DOI: 10.30479/JMRE.2021.15095.1492

*Corresponding Author Email: *razavian@kashanu.ac.ir*

COPYRIGHTS
©2022 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.
This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCTION

With the advancement in the science of grinding and thus autogenous and semiautogenous (SAG) mills, the mining industry has always been associated with the problem of preparing representative samples for the design, sizing, and experiments related to mill grinding. Apart from providing such a sample, performing such tests was costly. Accordingly, some plants and companies were seeking to find methods to solve these problems. MinnovEX (1993) developed a SAG power index (SPI) test that was proper according to less representation sample and cost [1,2]. With the advent of the SPI method, various mining companies can easily and quickly measure the hardness of the ore. If the test is accurate, the grindability of the ore in different areas is obtained by the extensive sampling of the mine and testing on these samples, and the distribution of the special energy of the mill in the entire deposit can be calculated accordingly. Design and processing engineers can design and select equipment based on hardness-related fluctuations and changes by determining the distribution of specific power and energy throughout the deposit. Therefore, using the SPI test and SAG mill power, it is possible to prevent the reduction of plant throughput and instability caused by changes related to crushing capacity in the plant [3,4]. Various studies have recently focused on investigating the hardness of the ore entering the AG mill and its performance in the Gole-Gohar Mining and Industrial Complex [5-7].

Considering the previous research and the necessity of updating the hardness information of Gole-Gohar's No. 1 mine and observing the fluctuations in the performance of the plant equipment, especially the AG mill, the current study evaluated the hardness of the feed of Gole-Gohar's Plant. Fluctuations related to the AG mill can be reduced by examining and determining the hardness of different areas of the mine pit and its blocking, along with determining the relationship between the hardness of feed and the specific power of the AG mill, ultimately leading to improved mill performance. Previous evidence has shown what factors affect the change in hardness and how to act to control the hardness and proper feeding to the plant. Thus, the hardness of different samples, which were prepared from exploration cores in different parts of the mine, was determined by the SPI test, and then the hardness number for each sample with specific coordinates was computed as well. Next, the hardness distribution of the samples was compared with related data of previous research in this regard. Eventually, the relationship between different factors related to the hardness of the ore was evaluated, including Fe, FeO, S, density, Davis tube test results, and optical and electron microscope studies.

METHODS

In this research, 73 different samples were used to perform SPI tests, which were prepared from exploration cores in various parts of the Gole-Gohar Iron Ore Mine located in Mine-1 in Sirjan-Kerman. These samples were moved to the pilot plant of Gole-Gohar Complex for testing. After crushing the samples, they were homogenized using a chute sample splitter and reduced to the subsamples of 2 kg for the SPI test.

SPI standard for the SPI:

The SPI test is the commercial name given to a laboratory ore-hardness characterization test by the MinnovEX Technology Company, and its procedure was originally developed by John Starkey [3]. The procedure involves the use of a 300 mm diameter, 100 mm long laboratory mill loaded with 25 mm steel balls. In addition, 2 kg of the feed material is crushed to -19 mm (F80 is approximately 12.5 mm) and ground in the mill until obtaining a product P80 of 1.7 mm. The time in minutes to reach this point is the SPI. The SPI parameter is applied in conjunction with the following equation to predict the specific energy of SAG mills [4,5].

$$P_{SAG} = \left(P_{80}{}^{-0.33}\right)(2.2 + 0.1t) \quad (1)$$

Where:

P80 and t: denote the d80 of the SPI test product and the total time consumption of the test, respectively.

To study the grade of different elements of the samples, the iron titration method and the X-ray fluorescence method, Davis tube test, and specific gravity determination were used from the pycnometer in the central laboratory of Gole-Gohar Complex. Moreover, the samples were sent to the Laboratory of Iran Mineral Processing Research Center located in Karaj for microscopic studies of thin and polished sections,

XRD, and SEM, and the results were evaluated accordingly.

FINDINGS AND ARGUMENT

The hardness study of 73 samples from various parts of the mine with the SPI test is graphically illustrated in Figure 1-2018. The hardness range of the ore is divided into five categories of highly soft, soft, medium, hard, and extremely hard based on the test results. Accordingly, 27% and 25%, of the mine have soft and highly soft ores with a hardness between 20-50 minutes and extremely low and less than 20 minutes, respectively. Further, 26% of the ore has an average hardness range of 50-100, and a small percentage of the mine generally covering 22% of the ore has a hardness of more than 100 minutes.In the hardness evaluation of Gole-Gohar No. 1 mine (2013), the average hardness of the studied samples and their standard deviations were 32.1 minutes and 20.8, respectively. Furthermore, the softest sample had a hardness of one minute while the hardest sample represented a hardness of 103 minutes. The following results can be obtained by comparing the hardness results of Gole-Gohar No. 1 mine in 2013 and 2018. As the mine progresses, the hardness of the ore indicates an increase. The hardest sample in 2013 had a hardness of 103 minutes. However, the hardness of the ore reached 324 minutes in the current study. The relation between ore hardness and Fe, S, and Davis tube recovery is depicted in Figure 2. As shown, there is no correlation between the hardness parameter and the values of Fe and S, and predicting the ore hardness based on the grade of Fe and S is impossible. Therefore, these parameters are completely independent.

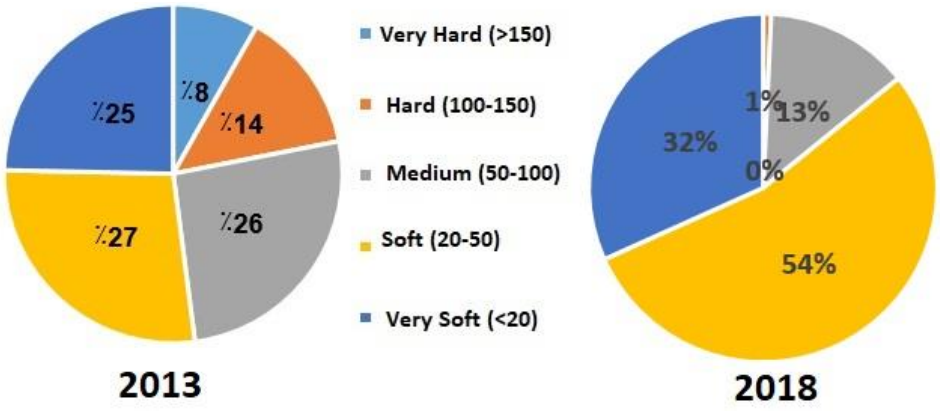


Figure 1. Comparison of the distribution of ore hardness of Gole-gohar No. 1 mine's

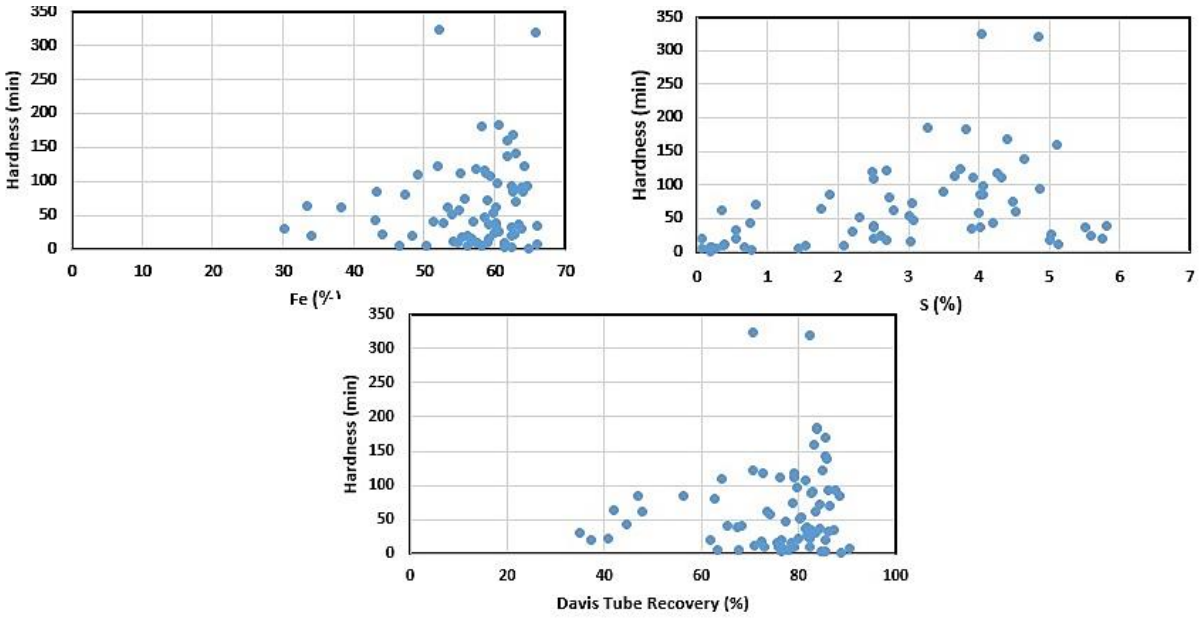
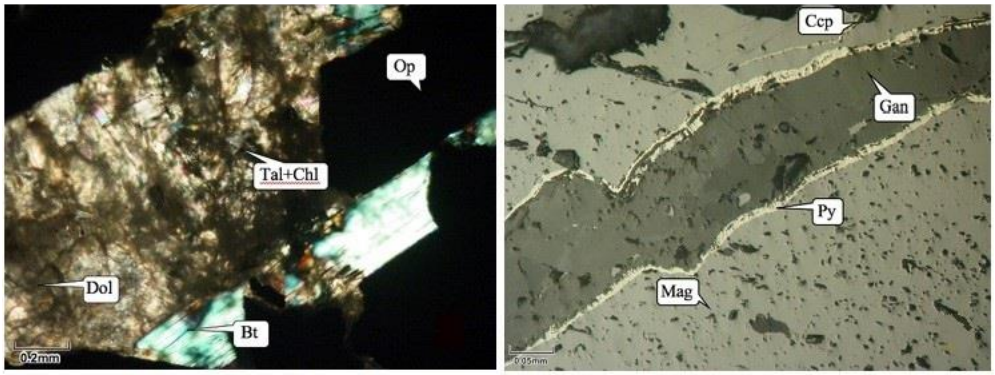


Figure 2. Relation between ore hardness and Fe, S and Davis tube recovery

Mineralogical studies performed on samples with different hardness showed that the difference in the hardness of the samples depends on many factors. The most important and effective reasons for the change in hardness in different samples included the texture of the sample, the minerals in the sample, the frequency of each mineral, the degree of alterations, porosity and weathering, the involvement of different minerals, and the degree of mineral oxidation. According to Figure 3-A, the space between the magnetite cavities is included by talc, chlorite, biotite, and dolomite minerals, leading to a reduction in the hardness of the sample. However, the inclusion of cavities and vessels and veins between the magnetite by pyrite and chalcopyrite sulfide minerals is observed (Figure 3-B), increasing the hardness of the sample.



(A) **(B)**

Figure 3. A: Soft minerals inclusion (dolomite, biotite, talc, chlorite), **B:** Hard mineral inclusion (pyrite)

CONCLUSIONS

The distribution of the hardness values of 73 representative samples of Gole-Gohar No. 1 mine and its comparison with the results of the last 5 years demonstrated a significant increase in the hardness of the mine so that the average hardness increased from 32.1 minutes to 65.6 minutes. Additionally, the hardness distribution of the Gole-Gohar mine showed that 52% of the ore resulted with a hardness of less than 50 minutes (soft materials). Further, 26% and 22% of materials were obtained with a hardness of 50-100 minutes (medium) and more than 100 minutes (hard), respectively. Among the parameters related to hardness, the total Fe, S, Fe/FeO ratio, density, and magnetite recovery in the Davis tube test exerted no significant relationship with hardness, implying the special importance of homogenizing the feed to the processing plant based on ore hardness in addition to grade homogenization. However, mineralogical factors such as texture, the composition of the constituent minerals, and the type and frequency of the constituent minerals had a significant effect on the hardness of the samples.

REFERENCES

[1] Bis, K. (2018). *"Geometallurgical characterization of the Kittilä gold ore deposit"*. European Mining, Minerals and Environmental Program (EMMEP), 44-75.

[2] Napier-Munn, T. J. (1996). *"Mineral comminution circuits: their operation and optimizatio*n*"*. JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing, University of Queensland, 100-140.

[3] Starkey, J., and Dobby, G. (1996). *"Application of the Minnovex SAG power index at five Canadian SAG plants"*. Proceeding Autogenous and Semi-Autogenous Grinding, 345-360.

[4] Kosick, G., and Bennett, C. (1999). *"The value of orebody power requirement profiles for SAG circuit design"*. In Proceedings of the 31st Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors, Ottawa, Canada, 241-254.

[5] Akbarinasab, A. (2002). *"Investigation of the effect of feed hardness on the performance of Auto-Geneous mills in Gole-Gohar iron ore grinding circuit"*. MSc. Thesis, Mining Department, ShahidBahonar University of Kerman, 14-25.

[6] Lorak agha, M. R. (2013). *"Open pit mine production planning of Gole-gohar No. 1 mine due to SAG power index test"*. MSc. Thesis, Azad University (south Tehran), 47-59.

[7] Barani Beiranvand, K., and Ghorbani moghaddam, M. (2016). *"Effect of Ore Characteristics on the AG Mill Circuit Performance of Gole-Gohar Iron Ore Processing Plant"*. Iranian Journal of Mining Engineering, 11(32): 109-117.

نشریه مهندسی منابع معدنی، سال ۱۴۰۱، دوره هفتم، شماره ۳، ص ۱۵۳-۱۳۹

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

دانشگاه بین المللی امام خمینی
IMAM KHOMEINI INTERNATIONAL UNIVERSITY

دوره هفتم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، صفحه ۱۴۴ تا ۱۵۳
Vol. 7, No. 3, Autumn 2022, pp. 144-153

علمی-پژوهشی

بررسی تاثیر عوامل مختلف بر سختی کانسنگ معدن شماره یک گل‌گهر

میلاد اسفرم جونقانی[۱]، سیدمحمد رضویان[۲*]، مجتبی قربان نژاد[۳]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان
۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان
۳- کارشناسی ارشد، پژوهشگر ارشد، شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، سیرجان

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

چکیده

امروزه با توجه به اهمیت مصرف انرژی توجه به سختی کانسنگ‌های معدنی و قابلیت خردایش آنها رو به افزایش است. در این پژوهش ۷۳ نمونه کانسنگ آهن از معدن شماره یک گل‌گهر تهیه و برای سنجش سختی روی آنها آزمون SPI انجام شد. توزیع مقادیر سختی این نمونه‌ها و مقایسه آن با نتایج ۵ سال گذشته نشان از افزایش قابل توجه سختی نمونه معدنی داشت، به طوری که میانگین سختی از ۳۲٫۱ به ۶۵٫۶ دقیقه افزایش یافت. علاوه بر این توزیع سختی نمونه‌های شماره یک گل‌گهر نشان داد که ۵۲ درصد کانسار، مواد با سختی زیر ۵۰ دقیقه (مواد نرم)، ۲۶ درصد مواد با سختی ۵۰ تا ۱۰۰ دقیقه (متوسط) و ۲۲ درصد مواد با سختی بیش از ۱۰۰ دقیقه (سخت) هستند. از میان عوامل مرتبط با سختی، عیار آهن کل، عیار گوگرد، نسبت Fe/FeO، چگالی و بازیابی مگنتیت در آزمون لوله دیویس ارتباط معناداری با سختی نداشته و همین مطلب اهمیت ویژه به همگن‌سازی خوراک ورودی بر اساس سختی به کارخانه فرآوری را علاوه بر همگن‌سازی عیاری ضروری می‌سازد، اما عوامل کانی‌شناسی از جمله بافت، نحوه درگیری کانی‌های تشکیل‌دهنده، نوع و فراوانی کانی‌های سازنده بر روی سختی ماده معدنی تاثیر بارز دارند.

کلمات کلیدی

کانسنگ آهن، سختی، آزمایش SPI، گل‌گهر.

استناد به این مقاله
اسفرم جونقانی، م.، رضویان، س. م.، قربان نژاد، م.؛ ۱۴۰۱؛ "**بررسی تاثیر عوامل مختلف بر سختی کانسنگ معدن شماره یک گل‌گهر**". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۳، ص ۱۵۳-۱۳۹.

DOI: 10.30479/JMRE.2021.15095.1492

*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: razavian@kashanu.ac.ir

حق‌مؤلف © نویسندگان
ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

۱- مقدمه

هدف از انجام آزمایش‌های تعیین سختی سنگ، بررسی نحوه شکست سنگ در سنگ‌شکن‌ها و آسیاها است. از آنجایی که آزمایش‌های مکانیک‌سنگی تعیین مقاومت در مقابل شکست، اطلاعاتی در مورد دانه‌بندی ذرات حاصل از شکست و انرژی لازم فراهم نمی‌کند، در بحث فرآوری و خردایش کاربرد زیادی ندارند. بیشترین کاربردی که در تعیین ابعاد و مشخصات تجهیزات، طراحی مدار و بهینه‌سازی وجود دارد، استفاده از رابطه بین کاهش اندازه و انرژی است که این امر بر اساس آزمایش‌های سختی‌سنجی انجام می‌شود. این کار از طریق آزمایش‌هایی مانند آسیاکنی ناپیوسته، آزمایش‌های باند و آزمون ذرات جداگانه انجام می‌شود. برخی از این آزمایش‌ها شامل آزمایش میله فشار هاپکینسون، آزمایش باند، آزمایش مک‌فرسون، آزمایش سقوط وزنه و آزمایش شاخص توان آسیای نیمه‌خودشکن است[۲،۱]. این روش‌ها برای بهینه‌سازی فرآیند، ایجاد تغییرات و یافتن مشکلات در طراحی و تجهیزات، طراحی اولیه تجهیزات و کاهش هزینه طراحی‌های بدون پیش‌بینی و با تغییر در ابعاد گلوله، ابعاد و نرخ خوراک، ابعاد دهانه خروجی و نوع سنگ معدن و موارد دیگر استفاده می‌شوند[۱].

با پیشرفت در علم فرآوری و خردایش و تولید آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن، بخش معدن همواره با مشکل تهیه نمونه‌ای مناسب برای طراحی، تعیین اندازه و آزمایش‌های مربوط به نحوه خردایش در این نوع آسیاها همراه بود. فارغ از تهیه چنین نمونه‌ای، هزینه انجام چنین آزمایش‌هایی بسیار زیاد بود، بنابراین کارخانه‌ها و شرکت‌های مختلف برای پیدا کردن روش‌هایی در بحث آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن در تلاش بودند تا اینکه در سال ۱۹۹۳ شرکت مینووکس آزمایشی را طراحی کرد که هم مشکل تهیه نمونه مناسب را حل کرد و هم کمترین هزینه ممکن را داشت. با پیدایش روش SPI، شرکت‌های مختلف معدنی قادر خواهند بود سختی کانسنگ را به راحتی و با سرعت اندازه‌گیری کنند. در صورتی که انجام آزمایش دقیق باشد، با نمونه‌گیری گسترده از معدن و انجام آزمایش بر روی این نمونه‌ها، سختی سنگ معدن در نواحی مختلف به دست می‌آید و بدین ترتیب، توزیع نوسان انرژی ویژه آسیا در کل کانسار قابل تعیین است. با تعیین توزیع توان و انرژی ویژه در کل کانسار، مهندسان طراحی و فرآوری قادر خواهند بود بر اساس نوسان و تغییرات مربوط به سختی، نسبت به طراحی تجهیزات و انتخاب آن‌ها اقدام کنند، بنابراین با استفاده از این آزمایش و پیش‌بینی‌ها و اقدامات انجام شده، می‌توان ازکاهش ظرفیت کارخانه و نوساناتی که در اثر تغییرات مربوط به سختی در کارخانه ایجاد می‌شود، جلوگیری کرد [۳]. کوشیک و بنت، در پژوهشی توزیع توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن را در سه ماده معدنی مختلف ارزیابی کرده و مواد را از نظر ساختارهای سنگی به سه گروه A، B و C تقسیم کردند. آزمایش SPI به روی هرکدام از این بخش‌های معدنی انجام شد. بر اساس این پژوهش، پروفیل‌هایی که بیشترین نمونه از آن‌ها گرفته شده بود، بیشترین تغییرات را داشتند. همچنین با توجه به این که تغییرات اندک در توان آسیا به تغییرات در ظرفیت مدار منجر خواهد شد، در صورت عدم توزیع سختی در کانسار ایجاد مشکل خواهد شد، بنابراین با تعیین و دانستن توزیع کامل و صحیح سختی در توده معدنی، در مورد آسیای نیمه‌خودشکن صنعتی می‌توان تصمیم منطقی اتخاذ کرد. همچنین با مشخص شدن سختی کانسار، درصدی از کانسار که در تناژ مورد نظر خردایش می‌شود، تعیین می‌شود [۴]. آقای عظیمی با مطالعه‌ای که بر روی آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه داشت، به طراحی و ساخت آسیای آزمایشگاهی برای تعیین شاخص توان آسیای نیمه‌خودشکن اقدام کرد. در این پژوهش، پس از ساخت آسیای آزمایشگاهی و انجام آزمایش SPI، نشان داده شد که استفاده از رابطه ارایه شده به وسیله شرکت مینووکس، برای این مجتمع دقت و کارآیی لازم را ندارد، بنابراین با نمونه‌گیری از مدار و انجام آزمایش SPI با آسیای طراحی شده و دخیل کردن پارامترهای عملیاتی دیگر، رابطه تجربی جدید برای مجتمع مس سرچشمه به دست آوردند که با استفاده از این مدل، امکان پیش‌بینی توان ویژه آسیای نیمه‌خودشکن صنعتی با بیشینه خطای ۲٫۵ درصد به وجود آمد [۵]. آقای دهقانی فیروزآبادی با هدف بررسی عملکرد آسیای خودشکن خط سه چاهون چغارت، پروژه‌ای را انجام داد که طی آن، کارآیی آسیای خودشکن بررسی شد. با توجه به تاثیر زیاد میزان سختی بر روی عملکرد آسیای خودشکن، بر اساس آزمایش SPI، توان آسیای خودشکن به صورت تجربی و وابسته به زمان به دست آمد [۶]. آقای جهانی در تحقیقی که در مجتمع مس سرچشمه انجام گرفت، دو آسیای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای را از نظر مصرف انرژی و تولید محصول نهایی با هم مقایسه و ارزیابی کرد [۷]. آمیلانکسن و همکاران به بررسی

آزمایش SPI و اصلاح این آزمایش پرداختند. آن‌ها آزمایش قابلیت آسیاشوندگی نیمه‌خودشکنی (SGI) را برای محاسبه سختی خوراک و استفاده از آن برای تخمین توان مصرفی آسیاهای نیمه‌خودشکن با ایجاد تغییراتی در روند آزمایش استارکی و تجهیزات آن، طراحی کردند [۸]. در مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر هم از سال‌های گذشته تحقیقات فراوانی در مورد سختی کانسنگ ورودی به آسیای خودشکن و عملکرد آن انجام شده است. در سال ۱۳۸۲، پروژه‌ای تحقیقاتی در ارتباط با سختی خوراک آسیای خودشکن و همچنین بررسی دانه‌بندی محصول آزمایش و آسیای صنعتی توسط آقای اکبری نسب انجام شد. در این پژوهش، با نمونه‌گیری از کارخانه و انجام آزمایش SPI، سختی خوراک آسیای خودشکن مشخص شد. او با مقایسه سختی خوراک و توان مصرفی آسیا، رابطه تجربی جدیدی ارایه کرد [۹]. لورک‌آقا در پژوهشی که بر روی معدن شماره یک گل‌گهر انجام داد، نشان داد که در برنامه‌ریزی تولید و استخراج معدن، باید علاوه بر عیار آهن و گوگرد، میزان سختی هم لحاظ شود. او با نمونه‌گیری از چال‌های اکتشافی مربوط به طرح ۵ ساله معدن و انجام آزمایش شاخص توان آسیای نیمه‌خودشکن بر روی این نمونه‌ها، تفاوت زیاد در میزان سختی نمونه‌ها را نشان داد [۱۰]. کیانوش بارانی و میثم قربانی مقدم برای بررسی عملکرد آسیای خودشکن خط ۳ گل‌گهر، به ۱۱ دوره نمونه‌گیری از خوراک آسیای خودشکن اقدام کردند. ایشان برای بررسی سختی کانسنگ از آزمایش SPI استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش شاخص SPI خوراک محصول آسیا دانه ریزتر شده است. افزایش سختی بار ورودی موجب ایجاد ذرات با ابعاد بحرانی در آسیا شده و در نتیجه حجم بار داخل آسیا افزایش یافته است. بررسی تاثیر توزیع دانه‌بندی خوراک نشان داد که نسبت ذرات به اندازه درشت (۱۰۰+ میلی‌متر) به ذرات با اندازه متوسط (۴۰+۱۰۰- میلی‌متر) رابطه معکوسی با شاخص SPI دارد. همچنین با کاهش نسبت ذرات درشت به متوسط، شاخص SPI افزایش یافته و محصول تولیدی ریزتر شده است [۱۱].

آقای رازانی و همکاران در پژوهشی تاثیر اندازه ذرات و سختی خوراک ورودی به آسیای نیمه‌خودشکن بر توزیع دانه‌بندی محصول را بررسی کردند. بر این اساس دامنه اندازه ۱۹ تا ۲۲٫۴ میلی‌متر در بار ورودی به آسیا، بیشترین تاثیر در محصول خرد شده و اندیس خردشدگی را نشان داد [۱۲]. آقای بیس مطالعه‌ای انجام داد و از روش‌های ساده و سریع برای تعیین اندیس‌های خردایش خودشکنی استفاده کرد. ایشان همبستگی و ارتباط بین آزمون‌های انجام شده را مشخص کرد که امکان تخمین شاخص خردایش به واسطه شاخص دیگر را فراهم می‌کرد [۱]. آقای بهنام‌فرد و همکاران در پژوهشی به بررسی بهبود عملکرد آسیای خودشکن صنعتی سنگان با تغییر ویژگی‌های بار ورودی پرداختند. بر این اساس با افزودن جداگانه قطعات بزرگ از ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متری در با ورودی به آسیای خودشکن، انرژی مصرفی ویژه آسیا از ۸٫۴ به ۵٫۱۶ کیلووات ساعت بر تن کاهش یافت. علاوه بر این ظرفیت بار ورودی از ۵۱۵ به ۶۱۵ تن بر ساعت افزایش یافت. ضمن اینکه باتوجه به سختی بار ورودی، با همگن‌سازی نمونه‌های سخت و نرم، انرژی مصرفی از ۹٫۴۹ به ۶٫۶۳ کیلووات ساعت بر تن کاهش یافت و ظرفیت ورودی از ۵۱۱ به ۵۲۱ تن بر ساعت افزایش یافت [۱۳].

با توجه به تحقیقات گذشته و لزوم به روزرسانی اطلاعات سختی کانسنگ معدن شماره یک گل‌گهر و مشاهده نوسانات موجود در عملکرد تجهیزات کارخانه و به ویژه آسیای خودشکن، در این پژوهش به بررسی سختی خوراک ارسالی به کارخانه‌های گل‌گهر اقدام شد. با بررسی و تعیین سختی نواحی مختلف معدن و بلوک‌بندی آن و تعیین ارتباط میان سختی خوراک ارسالی به آسیا با توان ویژه آسیا، می‌توان از نوسانات مربوط به آسیای خودشکن کم کرد و نهایتا به بهبود عملکرد آسیا منجر شد. مطالعات و بررسی‌های انجام شده نشان داد که چه عواملی در تغییر سختی تاثیرگذار هستند و برای کنترل میزان سختی و خوراک‌دهی مناسب به کارخانه باید به چه ترتیبی عمل کرد. تعیین سختی نمونه‌های مختلف که از مغزه‌های اکتشافی و در نقاط مختلف معدن نمونه‌گیری شده بود، از طریق آزمایش SPI به دست آمد و برای هر نمونه با مختصات مشخص مربوط به خود، عدد سختی آن تعیین شد. در ادامه به بررسی توزیع سختی نمونه‌ها و مقایسه آن با تحقیقات گذشته پرداخته شد. همچنین با مطالعات مشخصه‌یابی نمونه‌ها ارتباط عوامل مختلف از جمله مقادیر Fe، FeO، S، چگالی، نتایج آزمون لوله دیویس، مطالعات میکروسکوپ معمولی و الکترونی با سختی بررسی و تحلیل شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نمونه‌برداری

در این پژوهش از ۷۳ نمونه مختلف برای مطالعه مشخصه‌یابی استفاده شد. برای انجام نمونه‌گیری از معدن از

مغزه‌های اکتشافی موجود استفاده شد. این مغزه‌های اکتشافی که سراسر معدن شماره ۱ گل‌گهر را پوشش می‌دهد، در سال ۹۷ و همزمان با شروع این پژوهش گرفته شده بودند و در انبار مغزه و درون جعبه‌هایی مخصوص نگهداری می‌شدند. توزیع این نمونه‌ها بسیار دقیق بوده و اطلاعات کاملی از برنامه آینده معدن را پوشش می‌دهد. این جعبه‌ها که شامل ۶ متر مغزه‌اند، اطلاعاتی از جمله عیار آهن و گوگرد، جنس سنگ و موقعیت مغزه گرفته شده در معدن دارند که از این اطلاعات تنها موقعیت مغزه در معدن، در اختیار ما قرار داده شد. برای انجام آزمایش‌های تعیین سختی، این نمونه‌ها به آزمایشگاه نیمه صنعتی مجتمع گل‌گهر انتقال داده شدند. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، از یک سنگ‌شکن فکی موجود در آزمایشگاه نیمه‌صنعتی استفاده شد تا نمونه‌ها از لحاظ ابعادی به مقدار مورد نیاز برای انجام آزمایش برسند. پس از خرد شدن نمونه‌ها، با استفاده از تقسیم کننده مجرایی نمونه مورد نظر همگن، تقسیم و جداسازی شد و برای تهیه نمونه ۲ کیلوگرمی برای انجام آزمایش SPI، نمونه‌های معرف آماده شد.

۲-۲- مشخصه‌یابی نمونه‌ها

برای بررسی دلایل تغییرات سختی کانسنگ معدن در نواحی مختلف و ارتباط پارامتر سختی با ویژگی‌های دیگر کانسنگ، به مطالعه دقیق نمونه‌های مختلف معدن نیاز بود. به همین منظور تعدادی از نمونه‌ها با سختی متفاوت را برای شناسایی و مطالعات بیشتر انتخاب کرده و پس از تهیه نمونه معرف، مطالعات و آنالیزهای مختلف و آزمایش‌های زیادی بر روی این نمونه‌ها انجام گرفت. برای بررسی و آنالیز عیار عناصر مختلف نمونه‌ها از روش تیتراسیون آهن و روش XRF ، قابلیت پرعیارسازی از آزمایش لوله دیویس و تعیین وزن مخصوص از پیکنومتر موجود در آزمایشگاه مرکزی مجتمع گل‌گهر استفاده شد. همچنین برای مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک و صیقلی، XRD و SEM، نمونه‌ها به آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران واقع در کرج ارسال و نتایج آن مطالعه شد.

۲-۳- آزمایش تعیین سختی SPI

در روش‌های قبل از روش SPI برای تعیین سختی سنگ معدن برای انجام آزمایش‌های نیمه‌صنعتی از نمونه‌هایی با وزن بیش از ۲۰ تن استفاده می‌شد، بنابراین مشکلی که در تهیه نمونه و هزینه زیاد در این آزمایش‌ها بود، باعث تمایل شرکت‌های مختلف در ارایه روش ساده‌تری برای این آسیاها شد. شرکت مینووکس در سال ۱۹۹۳ برای پیش‌بینی توان آسیای نیمه‌خودشکن، یک آزمایش کوچک‌مقیاس بر روی مغزه‌های اکتشافی را بررسی کرد. هدف این بررسی و آزمایش، فراهم کردن انجام آزمایش‌های سختی‌سنجی برای آسیاهای نیمه‌خودشکن بود. آزمایش SPI شامل یکسری مراحل نرم‌کنی و سرندکنی است که درون آسیای نیمه‌خودشکن آزمایشگاهی با طول ۱۰٫۲ سانتی‌متر و قطر ۳۰٫۵ سانتی‌متر و مقدار نمونه ۲ کیلوگرمی طی آن نمونه مورد آزمایش از ابعاد با K_{80} برابر با ۱۲٫۷ میلی‌متر به K_{80} برابر با ۱٫۷ میلی‌متر می‌رسد. در واقع مدت زمانی که طول می‌کشد تا نمونه از ابعاد اولیه مشخص و صنعتی که برای اولین بار توسط استارکی ارایه شد به صورت رابطه ۱ است که به کمک آن می‌توان توان آسیای نیمه‌خودشکن صنعتی را محاسبه کرد[۳].

$$P_{SAG} = \left(d_{80p}{}^{-0.33}\right)(2.2 + 0.1t) \qquad (۱)$$

که در آن:

P_{SAG} : توان آسیای نیمه خودشکن صنعتی (kWh/t)

d_{80p} : اندازه برابر با ۸۰ درصد عبوری محصول (میکرون)

t : مدت زمان انجام آزمایش (min) است.

هرچند واحد زمان به طور خاص واحد سختی نیست اما به طور معمول در آزمایش SPI به صورت غیرمستقیم مدت زمان انجام آزمایش نشان‌دهنده سخت یا نرم بودن کانسنگ است، بنابراین در این پژوهش برای بررسی عامل سختی اصطلاحا مدت زمان انجام آزمایش SPI در نظر گرفته شده است.

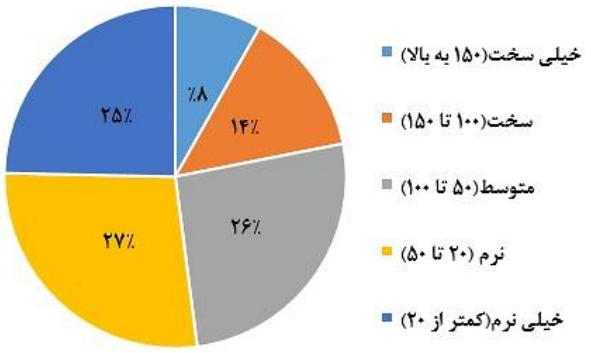
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تعیین سختی مغزه‌های اکتشافی

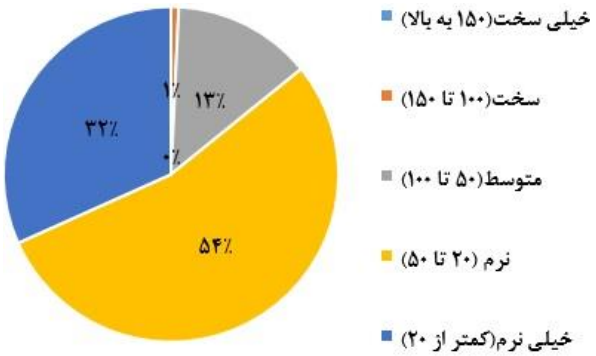
مطالعه بررسی سختی ۷۳ نمونه مختلف از نقاط مختلف معدن با آزمون SPI، در شکل ۱ نشان داده شده است. اگر بازه سختی کانسنگ معدن را بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش به ۵ دسته خیلی نرم، نرم، متوسط، سخت و خیلی سخت تقسیم شود، همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ۲۷ درصد معدن دارای کانسنگ نرم و با سختی بین ۲۰ تا ۵۰ دقیقه، ۲۵ درصد معدن دارای کانسنگ خیلی نرم که سختی این قسمت خیلی پایین و در حد کمتر از ۲۰ دقیقه است، ۲۶ درصد کانسنگ معدن سختی متوسط بین ۵۰ تا ۱۰۰ دارند و درصد کمی از معدن که مجموعا ۲۲ درصد کانسنگ

معدن را پوشش می‌دهد، سختی بالاتر از ۱۰۰ دقیقه دارد، اما نکته مهم این بود که داده‌های حاصل اختلاف زیادی نسبت به هم داشتند و بازه تغییرات آن‌ها بسیار زیاد بود. به طوری که بزرگترین عدد به دست آمده یا در واقع سخت‌ترین نمونه سختی ۳۲۴ دقیقه و نرم‌ترین نمونه سختی ۱٫۲۵ دقیقه داشت. علاوه بر این میانگین اعداد به دست آمده ۶۵٫۶ دقیقه و انحراف معیار آن ۶۳٫۷ بود. این اختلاف و پراکندگی بسیار زیاد لزوم توجه و همگن‌سازی بار ورودی به آسیای خودشکن را بیش از پیش آشکار می‌سازد. این مطلب وقتی بیشتر جلوه می‌کند که نتایج کنونی را با نتایج مطالعات پیشین مقایسه کنیم. شکل ۲ نتایج نموداری بررسی سختی نمونه‌های مختلف معدن شماره ۱ گل‌گهر را در سال ۹۲ نشان می‌دهد که توسط آقای لورک آقا انجام شده است [۱۰].

در بررسی سختی کانسنگ معدن شماره یک گل‌گهر که در سال ۹۲ انجام شد، میانگین سختی نمونه‌های بررسی شده، ۳۲٫۱ دقیقه و میزان انحراف معیار آن‌ها ۲۰٫۸ بود. همچنین



شکل ۱: توزیع آماری سختی نمونه‌های معدن شماره ۱ گل‌گهر



شکل ۲: توزیع آماری سختی نمونه‌های معدن شماره ۱ گل‌گهر سال ۹۲ [۱۰]

نرم‌ترین نمونه سختی ۱ دقیقه و سخت‌ترین نمونه سختی ۱۰۳ دقیقه داشت. در مقایسه نتایج سختی معدن شماره یک گل‌گهر در دو سال ۹۲ و ۹۷ می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

- با پیشروی معدن، سختی سنگ معدن در حال افزایش است. به نحوی که سخت‌ترین نمونه در سال ۹۲ دارای سختی ۱۰۳ دقیقه بوده است ولی در بررسی کنونی، سختی سنگ معدن به ۳۲۴ دقیقه رسیده است.

- بازه تغییرات سختی سنگ معدن نسبت به سال ۹۲ خیلی بیشتر شده است به گونه‌ای که در سال ۹۲، ۸۶ درصد مواد دارای سختی پایین و در بازه صفر تا ۵۰ دقیقه بوده‌اند. در صورتی که در بررسی کنونی، ۵۲ درصد مواد سختی پایین‌تر از ۵۰ دقیقه دارند.

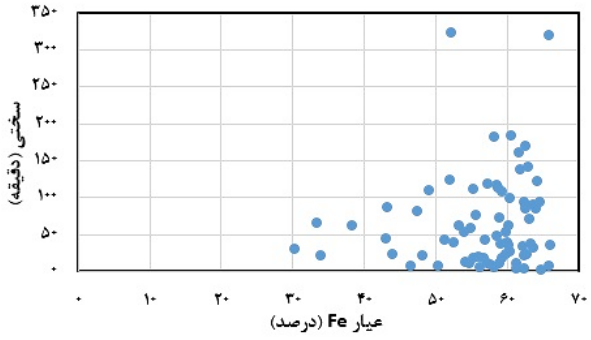
- نمونه‌های با سختی بالای ۱۰۰ دقیقه در پهنه‌بندی قدیم به ندرت وجود دارد به گونه‌ای که تنها ۱ درصد از کل معدن را این مواد شامل می‌شدند، اما در مورد پهنه‌بندی جدید ۲۲ درصد از معدن دارای سختی بالای ۱۰۰ دقیقه است که ۸ درصد از آن سختی بیش از ۱۵۰ دقیقه دارد.

به طور کلی می‌توان گفت که بازه تغییرات سختی در پهنه‌بندی جدید بیشتر شده است و مواد از نظر سختی اختلاف خیلی بیشتری نسبت به قبل دارند. همچنین با پیشروی معدن کانسنگ سخت‌تر شده و بیشینه سختی از ۱۰۳ دقیقه به ۳۲۴ دقیقه رسیده است. با توجه به این که هرچقدر ماده معدنی تغییرات بیشتر و نوسان بیشتری از لحاظ سختی داشته باشد، نوسانات کارخانه و به ویژه آسیای خودشکن بیشتر خواهد شد، بنابراین با این روند افزایشی تغییرات سختی باید نسبت به همگن‌سازی خوراک ارسالی به کارخانه دقت و حساسیت بیشتری اعمال شود و با ارایه برنامه خوراک‌دهی مناسب به کارخانه از نوسانات آسیا و کارخانه جلوگیری کرد. با افزایش سختی خوراک ارسالی به کارخانه، توان آسیا و میزان انرژی لازم برای خردایش خوراک افزایش خواهد یافت. میزان انحراف معیار بالای اعداد مربوط به پهنه‌بندی جدید، تغییرات زیاد در میزان سختی نمونه‌ها و تنوع کانسنگ از نظر سختی را نشان می‌دهد که باید برای کنترل نوسانات کارخانه نسبت به همگن‌سازی بارهای مختلف معدن اقدامات لازم را به عمل آورد. بالا بودن سختی کانسنگ و رسیدن به مقادیر بالاتر از ۱۵۰ دقیقه دقت و حساسیت بیشتری برای ارایه برنامه خوراک‌دهی و کنترل عملکرد آسیا را می‌طلبد.

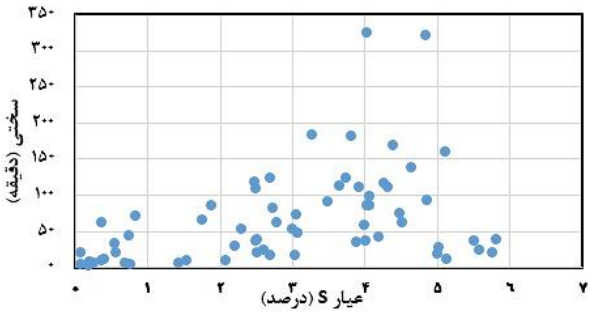
۳-۲- مطالعه ارتباط سختی با عیار نمونه‌ها

برای ارایه برنامه طراحی، انفجار، استخراج و در نهایت خوراک‌دهی به کارخانه به داشتن اطلاعات عیاری نواحی مختلف معدن نیاز است که این امر با نتایج به دست آمده از آنالیزهای عیاری انجام گرفته بر روی مغزه‌های اکتشافی میسر شد. علاوه بر عیار اطلاعات سختی نیز در بهبود عملکرد خردایش و مصرف انرژی موثر است. در واقع با اطلاع از میزان عیار و سختی هر بخش از معدن می‌توان بهترین مدل ممکن برای طراحی معدن را به کار برد. به نحوی که بیشترین بهره‌وری در کارخانه حاصل شود. با داشتن اطلاعات سختی و عیاری به بررسی ارتباط این عوامل پرداخته شد.

شکل ۳ ارتباط بین سختی و عیار آهن کل نمونه‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۴ نیز ارتباط بین سختی و عیار گوگرد نمونه‌ها را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود ارتباطی بین پارامتر سختی با مقادیر Fe و S دیده نمی‌شود و نمی‌توان بر اساس عیار آهن و گوگرد به پیش‌بینی سختی کانسنگ پرداخت و بنابراین این پارامترها کاملا از هم جدا و مستقل‌اند. در واقع اهمیت بررسی نمودارهای شکل ۳ و ۴ در ارتباط با برنامه‌ریزی نظام استخراج مواد معدنی است. از گذشته عامل اصلی در برنامه استخراج توزیع عیاری کانی‌های باارزش و گانگ بوده است، اما امروزه باتوجه به اهمیت موضوع انرژی لزوم توجه به بررسی سختی و مصرف انرژی خردایش نیز حایز اهمیت است. مستقل بودن عیار از سختی این واقعیت را نشان می‌دهد که برنامه همگن‌سازی بار ورودی به کارخانه فرآوری باید تغییر کند و عامل سختی نیز جداگانه و مستقل از عیار مورد توجه قرار گیرد.

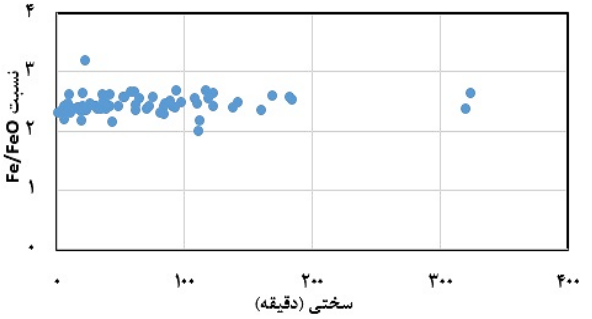


شکل ۳: ارتباط سختی با میزان آهن موجود در نمونه



شکل ۴: ارتباط بین عیار گوگرد و سختی نمونه‌ها

شکل ۵ ارتباط بین سختی و نسبت Fe/FeO را نشان می‌دهد. هر چقدر این نسبت کمتر باشد، میزان مگنتیت نمونه بیشتر خواهد بود و بنابراین با توجه به روند ثابت این نسبت در سختی‌های متفاوت، می‌توان گفت که نسبت کانی مگنتیت به کانی‌های آهن‌دار دیگر از جمله هماتیت در نواحی مختلف معدن تقریبا ثابت است که این موضوع عمدتا به نحوه کانی‌سازی در معدن ارتباط دارد.



شکل ۵: ارتباط بین سختی و نسبت Fe/FeO

۳-۳- مطالعه ارتباط سختی با چگالی نمونه‌ها

ارتباط چگالی به دست آمده با سختی هر نمونه در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، چگالی همانند عیار آهن و گوگرد به سختی ماده معدنی بستگی ندارد. این مطلب لزوم بررسی عوامل دیگری از جمله اطلاعات مربوط به مطالعات میکروسکوپی و کانی‌شناسی نمونه‌ها را برای بررسی عوامل تاثیرگذار بر سختی نمونه‌ها نشان می‌دهد.

شکل ۷ رابطه میان چگالی و عیار آهن موجود در نمونه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رابطه بین این دو پارامتر مستقیم و خطی و به جز در یک نقطه، برازش نقاط بسیار

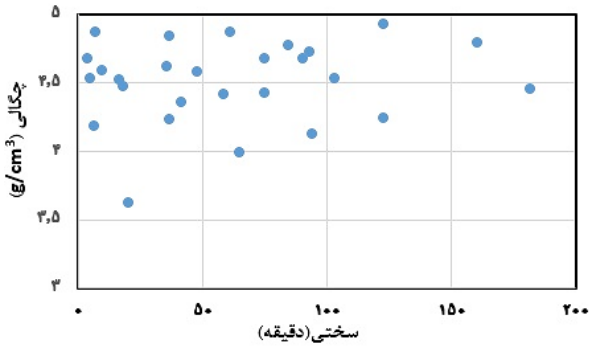
خوب است. این رابطه نشان می‌دهد که چگالی کانسنگ معدن بیشتر به آهن موجود در نمونه و کانی‌های آهن‌دار بستگی دارد و با افزایش عیار آهن، چگالی نمونه افزایش می‌یابد. سطح اطمینان برازش این نقاط ۹۳ درصد است که می‌توان بر اساس رابطه بین این دو پارامتر و با مشخص بودن یکی از آن‌ها، مقدار پارامتر دیگر را به دست آورد که این مساله در کاهش زمان و هزینه‌های انجام آزمایش‌ها و استفاده در موارد مختلف ممکن است موثر باشد.

۳-۴- مطالعه ارتباط بین سختی و آزمون لوله دیویس

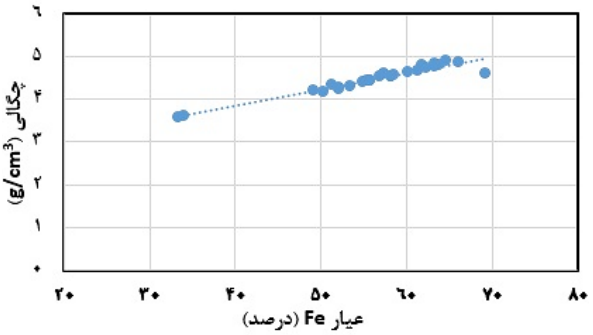
با توجه به شکل ۸ ارتباطی بین میزان بازیابی به دست آمده از آزمایش لوله دیویس و سختی ماده معدنی وجود ندارد. میزان سختی نمونه در عملیات خردایش ماده معدنی و رسیدن به درجه آزادی مناسب تاثیرگذار است و با توجه به این که درجه آزادی برای همه نمونه‌ها در آزمایش لوله دیویس یکسان است، بنابراین پارامتر سختی در میزان جدایش نمونه‌ها در این بررسی بی‌تاثیر نشان داده شده است، اما با توجه به تحقیقاتی که در زمینه ارتباط دانه‌بندی نمونه‌های مختلف با میزان جدایش مغناطیسی و بازیابی وزنی انجام گرفته است [۱۱] و نشان داده شده است که میزان جدایش مغناطیسی با دانه‌بندی مواد در ارتباط است، می‌توان گفت که میزان سختی نمونه که در دانه‌بندی خروجی تجهیزات خردایش تاثیرگذار است، ممکن است در میزان بازیابی وزنی نقش بسزایی داشته باشد. همچنین عدم ارتباط بین این دو پارامتر بار دیگر لزوم پهنه‌بندی معدن بر اساس پارامتر سختی را نشان می‌دهد.

۳-۵- نتایج مربوط به مطالعات میکروسکوپی، XRD و SEM

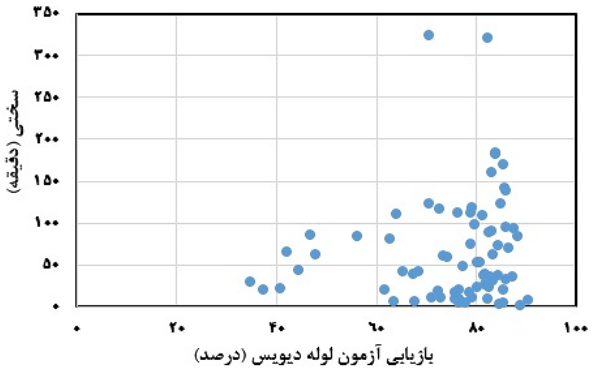
مطالعات کانی‌شناسی انجام‌شده روی نمونه‌های با سختی متفاوت نشان داد که تفاوت در میزان سختی نمونه‌ها به عوامل زیادی وابسته است. مهمترین و تاثیرگذارترین دلایل تغییر سختی در نمونه‌های مختلف شامل بافت نمونه، کانی‌های موجود در نمونه، فراوانی هر کدام از کانی‌ها، میزان دگرسانی، تخلخل و هوازدگی، نحوه درگیری کانی‌های مختلف، میزان اکسیداسیون کانی‌ها هستند که به تحلیل آن‌ها پرداخته می‌شود. از میان عوامل نام‌برده، بافت تشکیل‌دهنده کانه مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده سختی نمونه است. بر اساس نتایج به دست آمده از آنالیزهای مختلف مشخص شد که بافت کانی مگنتیت در اکثر نمونه‌ها به صورت متراکم و توده‌ای بوده اما به دلایل مختلف تکتونیکی و زمین‌شناسی، چنانچه بافت کانه در اثر فشار شکسته



شکل ۶: ارتباط سختی با چگالی نمونه‌ها



شکل ۷: ارتباط بین چگالی و عیار آهن نمونه‌ها

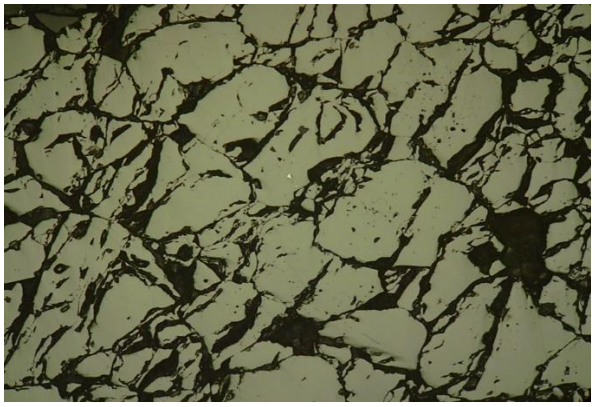


شکل ۸: ارتباط بین میزان بازیابی لوله دیویس و سختی ماده معدنی

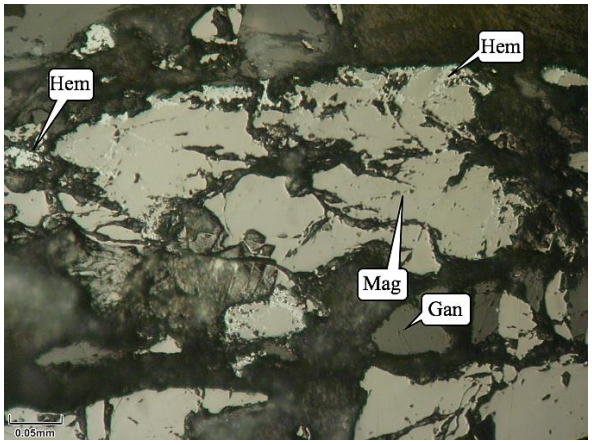
و خرد شود و یا این که بافت آن برشی شود، سختی در نمونه کاهش می‌یابد. همچنین چنانچه در اثر اکسیداسیون، ترکیب مارتیتی شده و هماتیت تشکیل شود و یا بر اثر دگرسانی از بافت متراکم و توده‌ای خود فاصله بگیرد و باعث هوازدگی، دگرسانی، افزایش تخلخل و اکسیداسیون کانسنگ شود، کاهش میزان سختی نمونه را در پی خواهد داشت.

در شکل ۹ نمونه‌ای از مطالعات مقاطع میکروسکوپی نشان داده شده است که در آن خرد و برشی شدن بافت مگنتیت به خوبی قابل مشاهده است. همچنین در شکل ۱۰ پایین بودن سختی در نتیجه اکسیداسیون مگنتیت و مارتیتی شدن و تشکیل هماتیت مشاهده می‌شود. البته سهم این عوامل در مقایسه با ادخال کانی‌ها خیلی کمرنگ بوده و نمی‌توان تاثیر بارزی را مشاهده کرد.

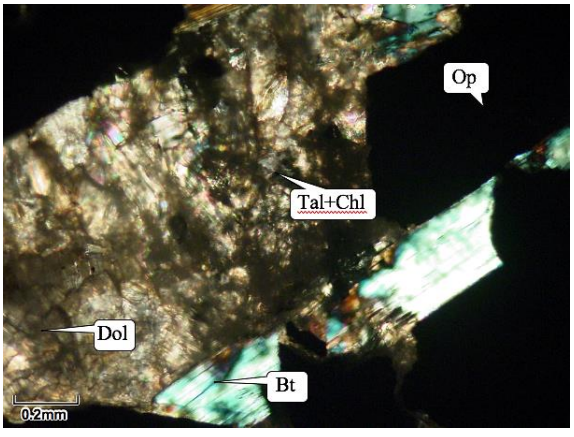
بر اساس مطالعات XRD، مگنتیت به عنوان کانی اصلی در تمام نمونه‌ها شناسایی شده که مقدار آن بیش از حدود ۷۰ درصد در هر نمونه بوده است. سایر کانی‌های فرعی که میزان آن‌ها در هر نمونه کمتر از ۱۰ درصد بوده در میزان سختی نمونه‌ها تاثیرگذار بودند. به طور کلی و در شرایط یکسان بافت کانی، نوع درگیری و قرارگیری کانی‌های مختلف در هر نمونه بر میزان سختی نمونه‌ها بسیار تاثیرگذار است. چنانچه فضای بین حفرات و رگه‌ها و رگچه‌های مگنتیت با پیریت، کالکوپیریت، پیروتیت و مارکازیت که کانی‌های سولفیدی‌اند پر شود، سختی نمونه بالا می‌رود، اما اگر بین حفرات و شکستگی‌ها، کانی‌های رسی، میکاها، تالک، دولومیت، کلسیت، کلریت و سرپانتین وجود داشته باشد باعث کاهش سختی نمونه می‌شود. در مورد حضور پیریت به عنوان یکی از فراوان‌ترین کانی‌های موجود در کانسنگ بعد از مگنتیت، نوع قرارگیری و بافت نمونه بسیار مهم است. به گونه‌ای که اگر کانی پیریت به صورت ادخال در مگنتیت حضور داشته باشد، سختی نمونه حتی با وجود مقادیر زیادی از کانی پیریت می‌تواند پایین باشد، اما اگر پیریت و یا کالکوپیریت به صورت پرشدگی در حفرات و رگ‌ها و رگچه‌های موجود در مگنتیت باشند و یا این که پیریت به صورت جانشینی در مگنتیت جای گرفته باشد، سختی در نمونه افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که فضای موجود بین حفرات مگنتیت، به وسیله کانی‌های تالک، کلریت، بیوتیت و دولومیت پر شده و همین امر به کاهش سختی نمونه منجر شده است. در حالی که در شکل ۱۲ پرشدگی حفرات و رگ‌ها و رگچه‌های میان مگنتیت به وسیله کانی‌های سولفیدی پیریت و کالکوپیریت مشاهده می‌شود که همین مساله به بالا رفتن سختی نمونه منجر شده است. بر اساس مطالعات انجام شده به وسیله پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی، فلورسانس پرتو ایکس و مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک و صیقلی، می‌توان بیان کرد که در شرایط یکسان از نظر بافت و درگیری کانی‌های مختلف، حضور کانی‌هایی همچون تالک، سرپانتین، میکا، کلریت، کلسیت، کانی‌های رسی و دولومیت



شکل ۹: سختی پایین نمونه در نتیجه خرد و برشی شدن بافت مگنتیت



شکل ۱۰: پایین بودن سختی در نتیجه اکسیداسیون مگنتیت و مارتیتی شدن و تشکیل هماتیت

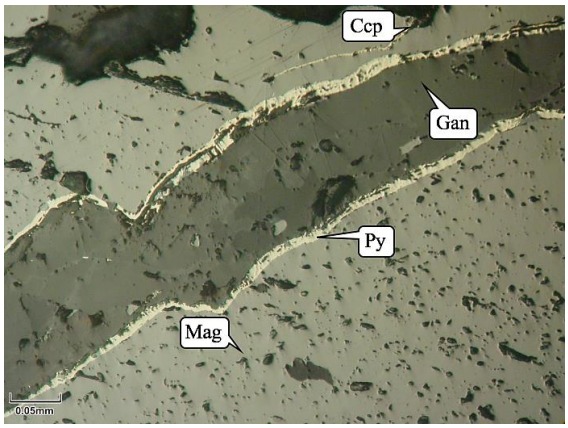


شکل ۱۱: حضور کانی‌های دولومیت، بیوتیت، تالک و کلریت در نمونه‌ای با سختی پایین

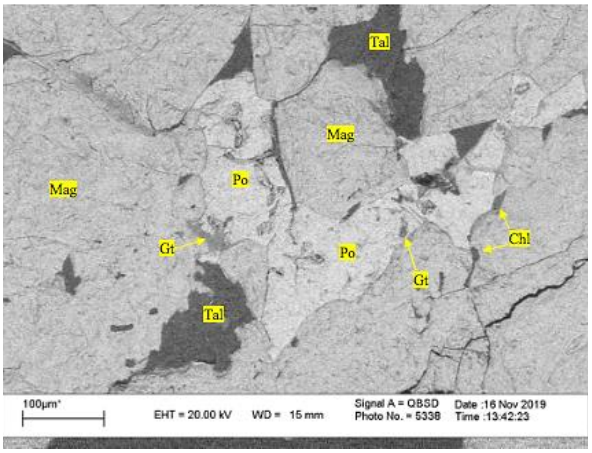
که به عنوان باطله در کانسنگ وجود دارند، باعث کاهش سختی نمونه می‌شود. وقتی ویژگی‌های این کانی‌ها از جمله سختی (تالک: ۱، سرپانتین: ۴-۲٫۵، میکا: ۴-۲٫۵، کلریت: ۲٫۵-۲، کلسیت: ۳، کانی‌های رسی: ۲٫۵-۲ و دولومیت:۴-۲٫۵) بررسی شود مشاهده می‌شود که همه این کانی‌ها جزو کانی‌های نرم محسوب می‌شوند و به همین دلیل وجود این کانی‌ها در ترکیب باعث سختی کل کانسنگ می‌شود. اما حضور کانی‌هایی همچون پیریت (سختی: ۶٫۵-۶) ، مارکازیت (۶٫۵-۶)، کوارتز (سختی: ۷) و در بیشتر مواقع پیریت به افزایش سختی در نمونه منجر می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این کانی‌ها همه سختی بیشتر از ۶ دارند و جزو کانی‌های سخت به حساب می‌آیند. برای اطمینان بیشتر همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، مطالعات تفصیلی و کامل جهت تعیین دقیق کانی‌های موجود با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد و نتایج این بررسی‌ها تاثیر حضور کانی‌های مختلف در میزان سختی نمونه‌ها را تایید کرد.

۴- نتیجه‌گیری

طی این پژوهش ۷۳ نمونه مختلف از نقاط مختلف معدن برای تعیین سختی بر اساس آزمایش SPI بررسی شد که داده‌های حاصل اختلاف زیادی نسبت به هم داشتند و بازه تغییرات آن‌ها بسیار زیاد بود. نتایج آزمون‌های سختی نشان داد که با پیشروی معدن، سختی کانسنگ در حال افزایش است. همچنین بازه تغییرات سختی کانسنگ بسیار زیاد است و چنانچه بار معدن بدون توجه به سختی کانسنگ به کارخانه ارسال شود، نوسانات زیادی را در پی خواهد داشت. توزیع سختی کانسنگ معدن شماره یک گل‌گهر به گونه‌ای است که ۵۲ درصد کانسار، مواد با سختی زیر ۵۰ دقیقه (مواد نرم)، ۲۶ درصد مواد با سختی ۵۰ تا ۱۰۰ دقیقه (متوسط) و ۲۲ درصد مواد با سختی بیش از ۱۰۰ دقیقه (سخت) هستند. با آگاهی از محل دقیق مناطق سخت، متوسط و نرم (از لحاظ قابلیت خردایش)، می‌توان برای تهیه نمونه‌ای شاخص برای انجام آزمایش‌های نیمه‌صنعتی از بهترین نقاط برای نمونه‌گیری استفاده کرد. از میان عوامل مرتبط با سختی، عیار آهن کل، عیار گوگرد، نسبت Fe/FeO، چگالی و بازیابی مگنتیت در آزمون لوله دیویس ارتباط معناداری با سختی ندارند و همین مطلب اهمیت ویژه به همگن‌سازی خوراک ورودی به کارخانه فرآوری را علاوه بر همگن‌سازی عیاری ضروری می‌سازد، اما



شکل ۱۲: پرشدگی رگ و رگچه‌ها به وسیله پیریت در نمونه‌ای سخت



شکل ۱۳: مطالعات نمونه به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی

عوامل کانی‌شناسی از جمله بافت، نحوه درگیری کانی‌های تشکیل‌دهنده، نوع و فراوانی کانی‌های سازنده بر روی سختی ماده معدنی تاثیرگذار است. به نحوی که در شرایط یکسان از نظر بافت و درگیری کانی‌های مختلف، حضور کانی‌هایی همچون تالک، سرپانتین، میکا، کلریت، کلسیت، کانی‌های رسی و دولومیت که به عنوان باطله در کانسنگ وجود دارند و همگی جزو کانی‌های نرم محسوب می‌شوند باعث کاهش سختی در نمونه می‌شود، اما حضور کانی‌های سختی همچون مارکازیت، کوارتز و در بیشتر مواقع پیریت به افزایش سختی در نمونه منجر می‌شود.

۵- تازه‌های تحقیق

۱- بررسی عدم ارتباط عواملی مانند عیار آهن، عیار گوگرد، نسبت Fe/FeO، چگالی و بازیابی مگنتیت در آزمون لوله دیویس با سختی

۲- بررسی تاثیر مستقیم عواملی مانند بافت، ساخت و وجود ناخالصی‌ها بر سختی کانسنگ آهن از جمله حضور پیریت

۳- اثبات لزوم توجه به همگن‌سازی خوراک ورودی به کارخانه گل‌گهر با توجه به افزایش سختی ذخیره معدن در آینده

۶- سپاس‌گزاری

تهیه‌کنندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر برای حمایت‌های مادی و آزمایشگاهی از این پژوهش ابراز می‌دارند.

۷- مراجع

[1] Bis, K. (2018). *"Geometallurgical characterization of the Kittilä gold ore deposit*". European Mining, Minerals and Environmental Program (EMMEP), 24-35.

[2] Napier-Munn, T. J. (1996). "*Mineral comminution circuits: their operation and optimization"*. JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing, University of Queensland, 100-140.

[3] Starkey, J., and Dobby, G. (1996). *"Application of the Minnovex SAG power index at five Canadian SAG plants"*. Proceeding Autogenous and Semi-Autogenous Grinding, 345-360.

[4] Kosick, G., and Bennett, C. (1999). *"The value of orebody power requirement profiles for SAG circuit design"*. In Proceedings of the 31st Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors, Ottawa, Canada, 241-254.

[۵] عظیمی، ا.؛ ۱۳۸۵؛ "**بررسی کارآیی مدار آسیاکنی کارخانه جدید پرعیارکنی مجتمع مس سرچشمه**". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص ۴۸-۳۲.

[۶] دهقانی فیروزآبادی، ج.؛ ۱۳۸۸؛ "**بررسی عملکرد آسیای خود شکن کارخانه چغارت خط سه چاهون**". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، ص ۳۶-۲۵.

[۷] جهانی، م.؛ ۱۳۸۸؛ "**بررسی مصرف انرژی در آسیاهای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای کارخانه مس سرچشمه**". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ص ۷۱-۵۴.

[8] Amelunxen, P., Berrios, P., and Rodriguez, E. (2014). *"The SAG grindability index test"*. Minerals Engineering, 55: 42-51.

[۹] اکبری نسب، ا.؛ ۱۳۸۲؛ "**بررسی تاثیر سختی خوراک بر عملکرد آسیاهای خودشکن در مدار خردایش سنگ آهن گل گهر**". پایان نامه کارشناسی ارشد, دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص ۲۵-۱۴.

[۱۰] لورک‌آقا، م.؛ ۱۳۹۲؛ "**برنامه ریزی تولید معدن شماره یک گل‌گهر با در نظر گرفتن شاخص توان آسیای نیمه خودشکن**". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، ص ۵۹-۴۷.

[۱۱] بارانی بیرانوند، ک.، قربانی‌مقدم، م.؛ ۱۳۹۵؛ "**بررسی تاثیر مشخصات بار ورودی بر عملکرد آسیای خودشکن خط سه کارخانه منیتیت شرکت گل‌گهر سیرجان**". نشریه مهندسی معدن، دوره ۱۱، شماره ۳۲، ص ۱۱۷-۱۰۹.

[12] Razani, M., Masoumi, A., Rezarizadeh, M., and Noaparast, M. (2018). *"Evaluating the Effect of Feed Particles Size and Their Hardness on the Particle Size Distribution of Semi-Autogenous (SAG) Mill's Product"*. Particulate Science and Technology, 36(7): 867-872.

[13] Behnamfard, A., Namaei Roudi, D., and Veglio, F. (2020). *"The performance improvement of a full-scaleutogenous mill by setting the feed ore properties"*. Journal of Cleaner Production, 271: 122-554.