



sewage sludge to coating copper sulfide processing tailings to reduce the availability of metals resulting from the production of acidic drainage

Farshad Ayadivand¹, Ahmad Khodadadi Darban^{2*}, Ahamad Jamshidi Zanjani³, Hassan Maleki⁴

1. Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran
farshad.ayadivand@modares.ac.ir
2. Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran
akdarban@modares.ac.ir
3. Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran
ajamshidi@modares.ac.ir
4. School of Mining Engineering, Tehran University, Tehran
hassan.maleki@ut.ac.ir

Received: 2023/12/06 - Accepted: 2024/11/21

Abstract

Due to the development of mines and the high volume of tailings resulting from the processing of minerals, whose particle size is in the range of microns and mostly contain heavy metals exceeding the standard, and also considering that the environment is one of the pillars of the sustainable development of every society. Therefore, mineral waste management is critical to protect the environment. One of the management strategies to prevent tailings oxidation and the subsequent production of acid mine drainage (AMD) is the tailings coating method. In this research, static tests were to predict the ability to produce acidic drainage, and then a column test was to check the performance of the tailings cover in preventing oxygen penetration and, subsequently, oxidation of the tailings and the production of acidic mine drainage on the tailings sample prepared from the mine tailings dam. Sarcheshmeh, Kerman was done. According to the results of static tests, the waste sample with net acid production potential (NNP) equal to -79.42 and the ratio of acid neutralization potential (NP) to acid production potential (AP) equal to 0.27, in the category of wastes with potential Acid production was diagnosed. In the column tests, organic coating (municipal sewage sludge) with a thickness of 7.5 and 15 cm on the tailings and water added based on the amount of monthly rainfall in the Kerman region in the normal state and double the normal state to the column. The performance of the used coating was determined by measuring parameters such as pH, oxidation-reduction potential Eh, electrical conductivity (EC), and the concentration of metals in the collected sewage. Finally, the tailings with a 15 cm cover of organic matter and the amount of added water based on the amount of natural rainfall prevented oxygen penetration into the tailings. An acidic effluent with a pH close to neutral was produced. Also, the concentration of metals in the resulting effluent was reduced.

Keywords

Copper sulfide tailings; Acid mine drainage; Coating; Static tests; Column tests.

* Corresponding Author



1- Introduction

Sulfide and oxide minerals are the principal sources of copper in nature, and most copper is extracted from copper sulfide minerals [1,2]. In the meantime, the pollution of the water and soil environment (due to the production of acidic drainage and consequently the increase in the concentration of heavy metals in the aforementioned environments, which have the potential to cause adverse effects on humans and living organisms) is the most common in metal sulfide mines [3]. The main component of tailings from metal sulfide mines is pyrite (FeS_2), which is more prone to oxidation reactions during natural weathering than other minerals, leading to heavy metal release and AMD formation [4, 5]. Predicting and preventing the production of acidic sewage is the best management plan to protect the environment and human health against the dangers of acidic sewage [6,7,8,9]. The best way to reduce the harmful effects of mineral effluents is to prevent the production or reduce the amount of produced effluents [10]. A classification of acid runoff control methods presented by Osgosen is divided into: 1) alkali addition technique and reclamation of top tailings/surplus material and 2) engineered structures technique [12]. In order to prevent the production of acid mine drainage as well as the release of oxidation products in the underground water tables, bentonite or special clay coatings can be used on the surface of old tailings to prevent the oxidation of sulfide minerals and the subsequent formation of acid mine drainage or on new tailings. It is possible to prevent the infiltration of polluting substances by making a substrate and covering it [11, 13]. Organic coatings can be used to prevent the release of oxygen in the tailings. This type of coating can be sewage sludge, urban waste, or other organic materials. The decomposition of organic matter ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) by biological action includes aerobic and anaerobic decomposition. Anaerobic decomposition occurs in nature when microorganisms cannot easily access oxygen. These organisms need nitrogen, phosphorus, and other nutrients to survive and create cell protoplasm. During this process, microorganisms reduce organic nitrogen to organic acids and ammonia. Carbon from organic compounds that are not used in cellular protein. In the aerobic process, microorganisms use oxygen to consume organic materials and release carbon dioxide. In organic coatings, the upper layer of materials decomposes in aerobic conditions, while the lower layers remain in anaerobic conditions. Therefore, organic materials trap oxygen and minimize the oxidation of the bottom wastes [14]

Using materials obtained from sewage, with the advantage of greatly reducing waste disposal costs, is an interesting perspective to replace costly conventional methods. Urban sewage sludge is a waste product obtained from all kinds of urban waste with a composition close to compost. In this research, the tailings of the Sarcheshme copper complex processing plant are more reactive due to their fine grain size and higher content of sulfides. They were selected for mineralogical studies, prediction of acid mine drainage production using static tests, and evaluation of the effect of tailings coating. Column experiments should study sulfide to prevent these processes by checking different parameters. The performance of an organic coating in controlling the production of acid mine drainage was investigated by considering critical parameters such as the amount of rainfall and the thickness of organic materials (as a coating). Also, in order to carry out mining activities with high confidence, the feasibility of preventing the production of acidic wastewater by covering Sarcheshmeh copper mine processing tailings using organic materials (urban sewage sludge) on a laboratory scale to reduce environmental damage was investigated in this research.

Various parameters, such as pH, Eh, EC, the concentration of ions and metals from the collected effluents, the thickness of the coating, and the amount of precipitation, were investigated to determine the behavior of the tailings coating in preventing tailings oxidation in column tests.

2- Methods

In this article, the tailings of the Sarcheshme copper complex processing plant, where there is a

possibility of less oxidation of sulfide minerals and the production of acidic wastewater, were selected for mineralogical studies and the prediction of mine acid waste production using static tests such as physical tests. A pH paste test and modified acid-base test were performed.

Column tests for managing mineral sulfide tailings consider essential parameters such as rainfall, the thickness of organic materials (as a coating), and the performance of an organic coating in preventing the production of acid mine drainage. In the column tests, the organic material used as a coating was loaded with 30% (w/w) in two thicknesses of 30 and 60 inside the columns on the tailings; the total carbon of this material was reported to be about 37.5% by Leco analysis. According to the studies, heavy metals in this material were also very low. The main inorganic phases identified using the XRD analyzer were quartz and calcite. The amount of rainfall was also applied based on the amount of rainfall in the Sarcheshme area of Kerman in two cases, the amount of natural rainfall and twice the amount of rainfall in different columns.

3- Conclusions

3-1- The results of static tests

The processing tailings used in this study contain 3.5% by weight of sulfur and have a net neutralization potential (NNP) of -79.42 kg CaCO₃/t and an NP/AP value equal to 0.27, which is obtained according to the interpretation of the test results. Calculating the modified acid-base of the mentioned waste has the potential for acid production.

According to the Paste pH test results, the pH value after sample preparation was higher than 7, and this value was reported to be about 8 in the initial tailings. From this, it can be concluded that the waste is oxidized over time, causing its pH to decrease.

3-2- The results of column tests

The use of organic materials such as urban sewage sludge showed that it is a good solution in the management of metal sulfide tailings due to the minimal economic dimension (only the cost of transportation) and also the simultaneous solution of the environmental problem caused by sulfide tailings in order to prevent the production of acid mine drainage in Tailing dams were determined. A high-moisture municipal sewage sludge layer is a physical barrier against oxygen diffusion. The oxygen diffusion coefficient (2-10*2 m²/s) and oxygen solubility (8.6 g/m³ at 25°C) is very low in the water; creating organic coatings is considered one of the most efficient oxygen limiting factors. Which are readily available for acid production control measures. Urban sewage sludge with high alkalinity can neutralize the acidity resulting from the oxidation of sulfide tailings. In addition, due to the low permeability, the amount of water penetrating the sulfides is limited, so the oxidation of sulfide materials is significantly reduced. Also, according to the observations, It can be concluded that lowering the pH causes better drainage. A single layer of urban sewage sludge (having conditions close to compost) in a polluted area, its physical properties such as density, water holding capacity, porosity, and stability of aggregates are significantly improved and prefers the creation of vegetation.

References

1. Maleki, H., Noparast, M., Chehreghani, S., Mirmohammadi, M. S., & Rezaei, A. (2023). Optimization of flotation of the Qaleh Zari mine oxidized copper ore sample by the sequential sulfidation approach using the response surface method technique. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 38(1), 59-68.
2. Mohammadkhani, M., Abdollahy, M., & Khalesi, M. R. (2020). Investigation of Mechanism of Adsorption of Xanthate and Hydroxamate on Malachite. *Journal of Mining and Environment*, 11(3), 921-933.

3. Nieva, N. E., Borgnino, L., & García, M. G. (2018). Long-term metal release and acid generation in abandoned mine wastes containing metal sulfides. *Environmental pollution*, 242, 264-276.
4. Zheng, L., Qiu, Z., Tang, Q., & Li, Y. (2019). Micromorphology and environmental behavior of oxide deposit layers in sulfide-rich tailings in Tongling, Anhui Province, China. *Environmental Pollution*, 251, 484-492.
5. Song, K., Wang, F., Peng, Y., Liu, J., & Liu, D. (2022). Construction of a hydrogeochemical conceptual model and identification of the groundwater pollution contribution rate in a pyrite mining area. *Environmental Pollution*, 305, 119327.
6. US-EPA, (1994). Acid mine drainage prediction. Office of Solid Waste, Special Waste Branch, Washington.
7. Qureshi, A., Maurice, C., Öhlander, B., (2016). The potential of coal mine waste rock for generating acid mine drainage. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 160, pp. 44–54.
8. Abrosimova, N., Gaskova, O., Loshkareva, A., Edelev, A., Bortnikova, S., (2015). Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu–Mo deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 157, pp. 1–14.
9. Shu, W.S., Ye, Z.H., Lan, C.Y., Zhang, Z.Q., Wong, M.H., (2001). Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. *Environment International*, Vol. 26, Issues 5–6, pp. 389–3.
10. J. Taylor and S. Pape. (2007). Managing Acid and Metalliferous Drainage. Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry. no. September, p. 107, 2007.
11. Parisi, D., Horneman, J., & Rastogi, V. (1994). USE OF BACTERICIDES TO CONTROL ACID MINE DRAINAGE FROM SURFACE OPERATIONS¹. In *International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage: Mine drainage* (Vol. 2, p. 319). US Department of the Interior, Bureau of Mines.
12. Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, R., & Hellier, W. (1998). Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage. National Mine Land Reclamation Center, Morgantown, 131.
13. Diao, Z., Shi, T., Wang, S., Huang, X., Zhang, T., Tang, Y., ... & Qiu, R. (2013). Silane-based coatings on the pyrite are used to remediate acid mine drainage. *water research*, 47(13), 4391-4402.
14. Peppas, A., Komnitsas, K. A., & Halikia, I. (2000). Use of organic covers for acid mine drainage control. *Minerals Engineering*, 13(5), 563-574.



مقاله پژوهشی

استفاده از لجن فاضلاب شهری برای پوشش باطله حاصل از فرآوری کانسنگ های سولفیدی مس

فرشاد اعیادی‌وند^۱، احمد خدادادی دربان^{۲*}، احمد جمشید زنجانی^۳، حسن ملکی^۴

۱. کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، farshad.ayadivand@modares.ac.ir
۲. استاد گروه فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، akdarban@modares.ac.ir
۳. دانشیار گروه فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ajamshidi@modares.ac.ir
۴. کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، hassan.maleki@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱

چکیده

با توجه به توسعه معادن و حجم بالای باطله‌های حاصل از فرآوری مواد معدنی که اندازه ذرات آن در حد میکرون و اکثراً دارای فلزات سنگین بیش از حد استاندارد است. با در نظر گرفتن اینکه محیط‌زیست یکی از ارکان توسعه پایدار هر جامعه است، مدیریت باطله‌های معدنی برای حفاظت از محیط‌زیست بسیار مهم است. از جمله راهکارهای مدیریتی برای جلوگیری از اکسیداسیون باطله‌ها و به دنبال آن تولید زهاب اسیدی معدن (AMD)، استفاده از روش پوشش‌دهی باطله است. در این تحقیق، آزمایش‌های استاتیکی برای پیش‌بینی قابلیت تولید زهاب اسیدی و آزمایش‌های ستونی به منظور بررسی عملکرد پوشش باطله برای جلوگیری از نفوذ اکسیژن و به دنبال آن اکسیداسیون باطله و تولید زهاب اسیدی معدن بر روی نمونه باطله تهیه‌شده از سد باطله معدن مس سرچشمه کرمان انجام شد. مطابق نتایج آزمایش‌های استاتیکی، نمونه باطله با پتانسیل خالص تولید اسید (NNP) برابر با ۷۹٫۴۲- و نسبت پتانسیل خنثی‌سازی اسید (NP) بر پتانسیل تولید اسید (AP) برابر با ۰٫۲۷، در رده باطله‌هایی با پتانسیل تولید اسید تشخیص داده شد. در آزمایش‌های ستونی از پوشش آلی (لجن فاضلاب شهری) با ضخامت ۷٫۵ و ۱۵ سانتی‌متر بر روی باطله و آب اضافه‌شده بر اساس میزان بارندگی ماهیانه در منطقه کرمان در حالت عادی و دو برابر حالت عادی به ستون‌ها اضافه شد و عملکرد پوشش مورد استفاده با اندازه‌گیری پارامترهایی همچون pH، پتانسیل اکسیداسیون-احیا Eh، هدایت الکتریکی (EC) و غلظت فلزات در زهاب جمع‌آوری‌شده، تعیین شد. در نهایت باطله با پوشش ۱۵ سانتی‌متری از مواد آلی و میزان آب اضافه‌شده بر اساس میزان بارندگی طبیعی از نفوذ اکسیژن به باطله جلوگیری کرده و زهاب اسیدی با pH نزدیک به خنثی تولید شد و همچنین غلظت فلزات در زهاب حاصل کاهش پیدا کرد.

کلمات کلیدی

باطله‌های سولفیدی مس، زهاب اسیدی معدن، پوشش دهی، آزمایش‌های استاتیکی، آزمایش‌های ستونی.



۱- مقدمه

پوشش‌دهی از نفوذ مواد آلاینده جلوگیری کرد [۱۶،۱۸]. آب‌های اسیدی ناشی از معادن زغال‌سنگ و سولفیدی که حاوی غلظت بالای فلزات سنگین‌اند، اثرات زیست‌محیطی بسیاری را به بار می‌آورند. تولید زهاب‌ها حتی تا صدها سال پس از پایان عمر معدن نیز ادامه می‌یابد. اگرچه ممکن است نتوان از به وجود آمدن زهاب‌های اسیدی جلوگیری به عمل آورد ولی باید آن را با استفاده از فرآیندهای شیمیایی و یا بیولوژیکی تصفیه کرد تا اثرات آن بر محیط‌زیست حذف و یا به حداقل برسد [۱۹].

استفاده از خاکستر بادی^۱ و مواد آلی به‌عنوان لایه پوششی با افزایش pH شیرابه، مصرف اکسیژن در لایه بالایی و کاهش غلظت فلزات محلول در جلوگیری از تولید زهاب اسیدی معدن موثر است. تغییر نسبت مواد پوششی، باعث تغییر چشمگیری در مقدار pH و EC می‌شود [۲۰]. در مقایسه کارایی کاربرد سه نوع مختلف خاکستر بادی (FA) و چهار نوع سنگ‌دانه‌های بتن بازیافت شده (RCAs) نشان داده شد که خاکستر بادی با قلیابیت بالا نتایج مشابه مصالح دانه‌ای در افزایش pH و کاهش غلظت فلزاتی مانند کروم، مس، آهن، منگنز و روی را دارد. علاوه بر این غلظت سولفات در زهاب اسیدی معدن در حالت پوشش‌دهی با سنگ‌دانه‌های بتن بازیافت شده به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد اما در حالت استفاده از خاکستر بادی نتایج عکس گزارش شده است. هدایت الکتریکی زهاب اسیدی معدن در نتیجه انحلال ذرات قلیایی موجود در مصالح دانه‌ای بتن بازیافت شده و خاکستر بادی طی واکنش‌های خنثی‌سازی، افزایش داشته است. استفاده از سنگ‌دانه‌های بتن بازیافت شده موثرتر از روش بهبود با خاکستر بادی است [۲۱]. در استفاده از پوشش‌های کامپوزیتی برای کنترل زهاب اسیدی، شوآنگ یانگ و همکاران از پوشش کامپوزیتی که در آن هیدروکسی آپاتیت به‌عنوان غیرفعال‌کننده طبیعی تعبیه شده بود استفاده کردند؛ در پوشش ۷- مرکاپتوپروپیل تری‌متوکسی‌سیلان (PropS-SH^۲) برای اصلاح عامل غیرفعال‌سازی، افزودن مقدار مناسب هیدروکسی آپاتیت (HA^۳) می‌تواند باعث افزایش آب‌گریزی و راندمان غیرفعال‌سازی پوشش PropS-SH شود. همچنین افزودن HA، پایداری لایه غیرفعال‌ساز متشکل از PropS-SH و ظرفیت

استخراج فلزات از پشتوانه‌های اقتصادی و صنعتی یک کشور محسوب می‌شود و با توجه به تولید حجم زیادی از باطله و همچنین به دلیل داشتن اثرات مخرب زیست‌محیطی، نیازمند توجه ویژه‌ای است [۱]. مقدار زیادی از کانی‌های سولفیدی آهن (به ویژه پیریت، مارکازیت و پیروتیت) موجود در باطله با اکسیژن، آهن سه بار مثبت و میکروارگانیزم‌های موجود در محیط در صورت تجمع طبیعی اکسید می‌شوند و در نتیجه زهاب اسیدی (AMD) حاوی آلاینده‌های بسیار مانند آرسنیک، سلنیوم و سولفات‌ها تولید می‌شود [۲،۳،۴]. اکسایش هر مول پیریت در حضور اکسیژن منجر به تولید ۲ مول اسید سولفوریک می‌شود [۵]. مواد معدنی سولفیدی و اکسیدی منابع اولیه مس در طبیعت‌اند که اکثر مس از مواد معدنی سولفید مس استخراج می‌شود [۶،۷]. در این میان، آلودگی محیط آبی و خاکی (به جهت تولید زهاب اسیدی و به‌تبع آن افزایش غلظت فلزات سنگین در محیط‌های یاد شده که پتانسیل ایجاد اثرات سوء در انسان و موجودات زنده دارند) در معادن سولفید فلزی معمول‌ترین است [۸]. جزو اصلی باطله معادن سولفید فلزی، پیریت (FeS_۲) است که بیشتر از سایر مواد معدنی مستعد واکنش‌های اکسیداسیون در طول هوازدگی طبیعی است و آزادسازی فلزات سنگین و تشکیل AMD را به دنبال دارد [۹،۱۰]. پیش‌بینی و جلوگیری از تولید زهاب اسیدی بهترین طرح مدیریتی است که می‌تواند محیط‌زیست و سلامتی انسان را در برابر خطرات زهاب اسیدی حفظ کند [۱۱،۱۲،۱۳،۱۴]. بهترین روش برای کاهش اثرات مخرب زهاب‌های معدنی، جلوگیری از تولید یا کاهش میزان زهاب‌های تولیدشده است. برای تولید زهاب اسیدی، کانی‌های سولفیدی باید در معرض رطوبت و هوا قرار بگیرند؛ بنابراین اگر هرکدام از این سه عامل از محیط حذف شود تولید زهاب‌های معدنی نیز متوقف می‌شود [۱۵،۱۶]. یک دسته‌بندی از روش‌های کنترلی زهاب اسیدی توسط اسگوسن ارائه شده است که شامل روش افزودنی قلیایی و بازسازی لایه باطله رویی/مواد مازاد و روش ساختارهای مهندسی است [۱۷]. برای جلوگیری از تولید زهاب اسیدی معدن و همچنین انتشار محصولات اکسایش در سفره‌های آب‌های زیرزمینی می‌توان در سطح باطله‌های قدیمی از پوشش‌های بنتونیتی یا رسی خاص برای جلوگیری از اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی و تشکیل زهاب اسیدی معدن استفاده کرد و یا روی باطله‌های جدید می‌توان با بسترسازی و

^۱ Flay ash^۲ γ-mercaptopropyl trimethoxy silane^۳ Hydroxyapatite

محصول زاید حاصل از انواع زباله‌های شهری با ترکیب نزدیک به ترکیبات کمپوست است. در این تحقیق از بخش باطله‌های کارخانه فرآوری مجتمع مس سرچشمه به علت ریزدانه بودن و محتوای بیشتر سولفیدها با واکنش پذیری بیشتر استفاده شد تا مطالعات کانی‌شناسی، پیش‌بینی تولید زهاب اسیدی معدن با استفاده از آزمایش‌های استاتیکی و ارزیابی تاثیر پوشش‌دهی باطله سولفیدی برای جلوگیری از این فرآیندها به وسیله آزمایش‌های ستونی با بررسی پارامترهای مختلف مورد مطالعه قرار گیرد و عملکرد یک پوشش آلی در جلوگیری از تولید زهاب اسیدی معدن با در نظر گرفتن پارامترهای حیاتی مانند میزان بارندگی، ضخامت مواد آلی (به‌عنوان پوشش‌دهنده) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای انجام فعالیت‌های معدنی با اطمینان خاطر بالا، امکان‌سنجی جلوگیری از تولید زهاب اسیدی با پوشش دهی باطله فرآوری معدن مس سرچشمه با استفاده از مواد آلی (لجن فاضلاب شهری) در مقیاس آزمایشگاهی برای کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی، در این تحقیق بررسی شد.

۲- تهیه و آماده‌سازی نمونه

نمونه مورد استفاده در این تحقیق، از سطح سد باطله قدیمی کارخانه فرآوری مجتمع مس سرچشمه واقع در جنوب شرقی ایران، استان کرمان بود که با استفاده از دستگاه نمونه‌برداری اوگر به‌صورت عمودی و با فواصل ۵ متری تهیه شد. با توجه به این‌که نمونه مورد آزمایش، باطله کارخانه فرآوری است، لزومی برای استفاده از سنگ‌شکن یا آسیا برای خردایش ملاحظه شد. پس از یکنواخت کردن نمونه، کل نمونه از سرند ۶۰ مش عبور داده شد. برای انجام آزمایش‌های ستونی به‌منظور بررسی رفتار پوشش باطله در جلوگیری از اکسیداسیون و تولید زهاب اسیدی معدن از نمونه‌های ۱ کیلوگرمی و بقیه مطالعات اعم از آزمایش‌های استاتیکی، کانی‌شناسی، ارزیابی اولیه خاصیت قلیایی و آنالیز گوگرد و کربن از نمونه‌های ۵۰۰ گرمی استفاده شد.

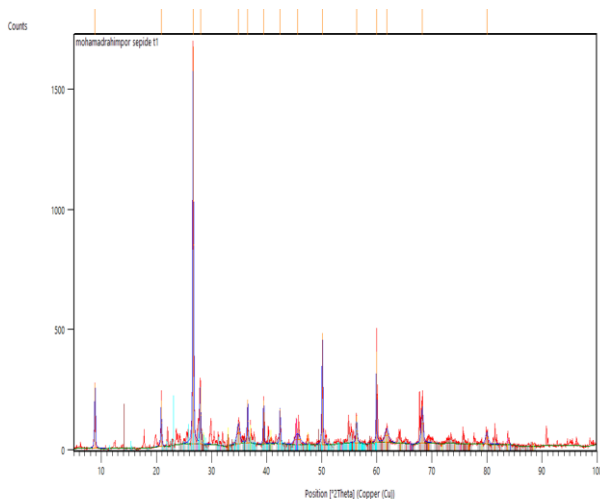
۳- مشخصات باطله فرآوری و مواد آلی

نمونه پودر شده برای شناسایی و تجزیه تحلیل عناصر و ترکیب کانی‌ها با استفاده از آنالیز XRF و XRD مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با توجه به شکل ۱ و نتایج تفسیر شده از آنالیز XRD مشخص شد که عمده کانی‌های موجود در باطله فرآوری به ترتیب فراوانی شامل کوارتز، فلدسپات پتاسیم،

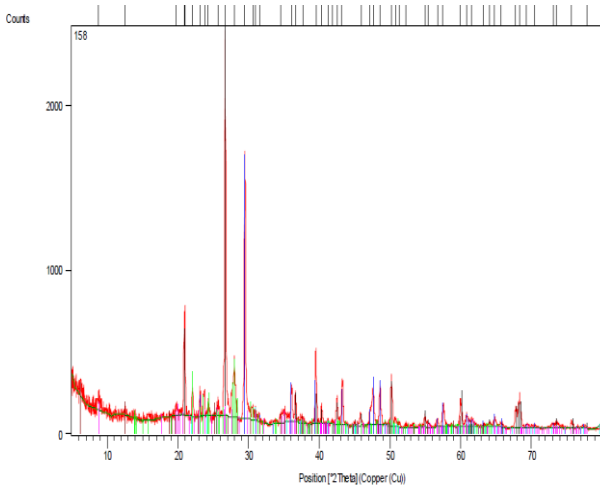
ترکیبی PropS-SH/HA را از طریق تشکیل پیوندهای Si-O-Si و Fe-O-Si افزایش می‌دهد [۲۲]. پوشش نانو کامپوزیت (PSS) PropS-SH/SiO₂ متشکل از PropS-SH و نانو ذرات SiO₂ به‌عنوان نانو پرکننده برای جلوگیری از اکسیداسیون پیریت برای کنترل زهاب اسیدی معدن توسط یون لئو بررسی شد. افزودن نانو ذرات SiO₂ توانایی پوشش و آب‌گریزی را افزایش می‌دهد و راندمان غیرفعال‌سازی پوشش PropS-SH را بهبود می‌بخشد. مکانیزم پوشش‌های PSS روی سطح پیریت شامل تشکیل شبکه PropS-SH، واکنش اتصال متقابل بین PropS-SH و نانو ذرات SiO₂ و چسبندگی شیمیایی پوشش PSS روی سطح پیریت است [۲۳]. در بررسی عوامل پوشش سطحی (KH₂PO₄ و Na₂SiO₃) به‌عنوان غیرفعال‌کننده سطح پیریت مشخص شد که کاربرد Na₂SiO₃ در مقایسه با KH₂PO₄، به‌طور موثری از اکسیداسیون پیریت جلوگیری می‌کند. Na₂SiO₃ به‌عنوان عامل پوشش سطح pH را روی ۵ تا ۶ حفظ کرده و Fe²⁺ و SO₄²⁻ شسته شده از اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی به ترتیب ۹۹ و ۹۷ درصد کاهش داده است [۲۴].

برای جلوگیری از انتشار اکسیژن درون باطله‌ها می‌توان از پوشش‌های آلی استفاده کرد. این نوع پوشش‌دهنده‌ها می‌توانند از لجن‌های فاضلاب، پسماندهای شهری و یا سایر مواد آلی باشد. تجزیه مواد آلی (C₆H₁₂O₆) با عمل بیولوژیکی شامل دو فرآیند تجزیه هوازی و بی‌هوازی است. تجزیه بی‌هوازی زمانی در طبیعت اتفاق می‌افتد که میکروارگانیسم‌ها به راحتی به اکسیژن دسترسی ندارند. این موجودات برای زنده ماندن و ایجاد پروتوپلاسم سلول به نیتروژن، فسفر و سایر مواد مغذی نیاز دارند. در طول این فرآیند میکروارگانیسم‌ها، نیتروژن آلی را به اسیدهای آلی و آمونیاک کاهش می‌دهند. کربن حاصل از ترکیبات آلی که در پروتیین سلولی استفاده نمی‌شود، در فرآیند هوازی، میکروارگانیسم‌ها با استفاده از اکسیژن مواد آلی را مصرف و دی‌اکسید کربن آزاد می‌کنند. در پوشش‌های آلی لایه بالایی مواد در شرایط هوازی تجزیه می‌شود در حالی‌که لایه‌های تحتانی در شرایط بی‌هوازی به سر می‌برند. بنابراین مواد آلی اکسیژن را به دام می‌اندازند و اکسیداسیون باطله‌های زیرین را به حداقل می‌رسانند [۲۵].

استفاده از مواد به‌دست‌آمده از فاضلاب‌ها با مزیت کاهش شدید هزینه‌های دفع باطله، یک چشم‌انداز جالب برای جایگزینی روش‌های مرسوم پرهزینه است. لجن فاضلاب شهری



شکل ۱- آنالیز XRD مربوط به باطله فرآوری سد باطله معدن مس سرچشمه



شکل ۲- آنالیز XRD مربوط لجن فاضلاب شهری

ایلیت، آلبیت و پیریت است. کانی کوارتز و کانی‌های رسی جزو مواد اسیدزا نیست، همچنین پیک مربوط به کانی‌های کربناته که عمده‌ترین خنثی‌کننده اسیدند، در این آنالیز مشاهده نشد.

با توجه به آنالیز XRD مربوط به لجن فاضلاب شهری (شکل ۲) عمده‌ترین کانی‌های شناسایی شده مربوط به کوارتز و کلسیت با مقدار کمی کلینوکلر، آلبیت و دولومیت است. با توجه به ترکیب تشکیل‌دهنده این ماده، می‌توان از آن به‌عنوان پوشش‌دهنده باطله سولفیدی مس برای کنترل اکسیداسیون و جلوگیری از تولید زهاب اسیدی و ترسیب فلزات آلاینده استفاده کرد. نتایج آنالیز XRF در جدول ۱ ارائه شده است، بیشترین درصد وزنی نمونه تهیه‌شده مربوط به سیلیس، آلومینا و آهن است و چنین استنباط می‌شود که کوارتز و کانی‌های رسی بیشترین مقدار کانی‌ها را تشکیل می‌دهند. مقدار کانی کلسیم برای تشکیل کانی‌هایی که به خنثی‌سازی زهاب اسیدی کمک کند، خیلی پایین است. مقدار آهن سه ظرفیتی برای ایجاد محیط اکسیدان قابل توجه است. البته آهن‌ها ضرورتاً در ساختار کانی پیریت یا اکسیدهای آهن قرار ندارد و بخشی از آن در ساختار کانی‌های سیلیکاته نیز است. در لجن فاضلاب شهری نیز سیلیس و اکسید کلسیم بیشترین مقدار را دارد (جدول ۲) که نشانگر وجود کانی‌های خنثی‌کننده اسید با توجه به ماهیت نمونه و مقادیر ناچیزی از فلزات در فازهای مختلف است.

جدول ۱- نتایج آنالیز XRF نمونه باطله سولفیدی فلزی سد باطله مس سرچشمه و لجن فاضلاب شهری

اکسید عناصر	درصد وزنی		اکسید عناصر	درصد وزنی	
	لجن فاضلاب شهری	نمونه باطله		لجن فاضلاب شهری	نمونه باطله
K ₂ O	۱٫۸	۴٫۸۷	Na ₂ O	۱٫۱۷	۱٫۴۰
CaO	۲۰٫۶۲	۰٫۹۳	MgO	۲٫۴۴	۱٫۵۷
TiO ₂	۰٫۵۴	۰٫۵۶	Al ₂ O ₃	۷٫۵۶	۱۷٫۹۴
SO ₃	۱٫۰۳	۳٫۵۷	SiO ₂	۴۱٫۸۹	۶۰٫۷۱
MnO	۰٫۱۲	۰٫۰۷	P ₂ O ₅	۰٫۲۶	۰٫۱۴
Fe ₂ O ₃	۳٫۶۹	۳٫۸۳	Cl	۰٫۰۶	۰٫۰۲
LOI	۲٫۹۲	۴٫۳۱	Cu	۰٫۰۰۴	۰٫۰۶۳

۳-۱- نتایج هضم اسیدی

با توجه به نتایج آنالیز XRF مشخص شد که نمونه باطله سولفیدی سد باطله مس سرچشمه دارای مقادیر قابل توجهی فلزات سنگین بالاتر از حد استانداردهای موجود است، بنابراین دلیل اهمیت وجود فلزات سنگین و جنبه رعایت مسایل محیط زیستی، آزمایش هضم اسیدی بر روی نمونه انجام گرفت و با آزمون ICP-OES میزان دقیق فلزات سنگین مشخص شد. نتایج آنالیز ICP برای مشخص کردن مقادیر فلزات سنگین در جدول ۲ ارائه شده است.

۳-۲- مقدار گوگرد و کربن نمونه خاکی

روش های مختلفی برای اندازه گیری میزان کربن و گوگرد نمونه خاکی استفاده می شود که از جمله آن ها می توان به آزمایش کوره لکو، روش احتراق مرطوب و سرد (والکی بلک) و روش وزن سنجی اشاره کرد. در این تحقیق برای محاسبه میزان گوگرد و کربن نمونه ها از روش کوره لکو استفاده شده است. این روش، شناسایی عناصر کربن و گوگرد را در طیف گسترده ای از مواد شامل انواع آلیاژهای فلزی، سرامیک ها، انواع خاک و

خاکستر، انواع پلیمرها و به طور کلی هم در مواد معدنی و غیر معدنی با دقت یک هزارم درصد وزنی به روش واسنجی اندازه گیری می کند. در این روش آنالیز عنصری (با استاندارد اندازه گیری کربن/گوگرد با دستگاه Leco) با استفاده از دستگاه اندازه گیری کربن و گوگرد، نمونه در یک کوره کاملاً ذوب شده و با اندازه گیری گازهای متصاعد شده از نمونه، میزان عناصر کربن و گوگرد با دقت بالا به دست می آید. برای اندازه گیری میزان گوگرد و کربن نمونه باطله فرآوری و لجن فاضلاب شهری از دستگاه لکو مدل CS ۲۳۰ با دقت ۵۰ ppm برای کربن و ۵ ppm برای گوگرد در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی در کرج استفاده شد. دستگاه کوره لکو برای اندازه گیری عناصر کربن و گوگرد به کار می رود و دقت آن برای کربن ۵۰ ppm و برای گوگرد ۵ ppm است. مقادیر سولفور و کربن کلی حاصل از آنالیز کوره لکو، برای نمونه باطله فرآوری و لجن فاضلاب در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار سولفور کلی حاصل از این آنالیز برای محاسبات مربوط به آزمایش اسید- باز اصلاح شده به کار گرفته می شود.

جدول ۲- نتایج آنالیز ICP-OES باطله فرآوری معدن مس سرچشمه (میلی گرم بر کیلوگرم)

نام عنصر	غلظت (میلی گرم بر کیلوگرم)	نام عنصر	غلظت (میلی گرم بر کیلوگرم)	نام عنصر	غلظت (میلی گرم بر کیلوگرم)
Ag	<۰٫۰۱	Co	۰٫۰۶۰۱	Fe	۲۴۱۷
Al	۱۰۵۵	K	۱۱۸۴	Pb	۲۰
As	۰٫۰۶۹	Mg	۷۱۴	Si	۱۷٫۸
Ca	۱۳۱۰	Mn	۳	Zn	۰٫۰۳۸۹
Cd	۰٫۰۰۸	Mo	۱۲۴	Ni	۰٫۲
Cr	۰٫۰۶۳	Na	۳۳۲	Cu	۷۹۳

جدول ۳- نتایج آنالیزهای کوره لکو، برای تعیین مقادیر سولفور کلی و کربن کلی

گوگرد کلی (درصد)	کربن کلی (درصد)	
۳٫۵	<۰٫۲	باطله سولفید فلزی
۰٫۳۷	۵٫۳۷	لجن فاضلاب شهری

۴- نتایج آزمایش های استاتیکی

۴-۱- نتایج آزمایش pH گل اشباع^۱

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش pH گل اشباع (جدول ۴)، میانگین pH دوغاب های آماده سازی شده بالاتر از ۷ است و باطله در ابتدا خاصیت قلیایی از خود نشان می دهد که ناشی از انحلال مقادیر جزئی کانی های کربناته موجود در نمونه است.

^۱ Paste pH

خالص^۳ را نشان می‌دهد و نسبت این دو مقدار (NP/AP)، نمونه را بر اساس پتانسیل مصرف و تولید اسید طبقه‌بندی می‌کند. معمولاً برای آسان کردن مقایسه مقادیر NNP و NP/AP بر اساس $\text{KgCaCO}_3/\text{tonne}$ بیان می‌شود.

مقدار پتانسیل تولید اسید (AP) بر طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\text{AP} = \%S \times 31/25 \quad (1)$$

محاسبه AP برای نمونه: نمونه باطله فرآوری مس سرچشمه

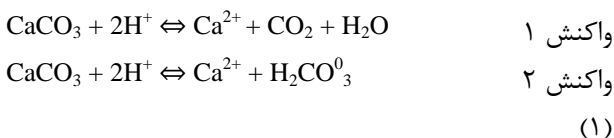
$$\text{AP} = 3.5 \times 31.25 = 109.375 \text{ KgCaCO}_3/\text{tonne}$$

که در آن:

%S: درصد کل گوگرد نمونه

AP: (کیلوگرم) کلسیم کربنات مورد نیاز بر تن باطله یا کیلوگرم اسید سولفوریک تولیدشده بر تن باطله است.

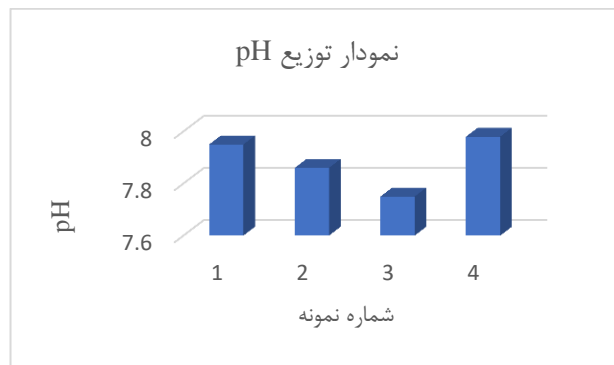
از نظر استوکیومتری، ماده‌ای حاوی ۱ درصد وزنی گوگرد به $31/25$ کیلوگرم کربنات کلسیم نیاز دارد تا اسید تولیدشده با یک تن ماده باطله خنثی شود یا به عبارت دیگر در صورت اکسایش ۱ درصد گوگرد $31/25$ کیلوگرم اسید سولفوریک به ازای هر تن از مواد باطله تولید می‌شود و معمولاً مبنای ضریب محاسبه $31/25$ برای محاسبه AP نمونه‌ای که روی غلظت گوگرد کل یا گوگرد سولفیدی یک نمونه اعمال می‌شود، واکنش ۱ و ۲ است. این فاکتور از فرضیات ناشی می‌شود که یک مول کلسیت می‌تواند دو مول پروتون را خنثی کند. از آنجا که اکسیداسیون پیریت ۴ مول پروتون در هر مول پیریت اکسید شده تولید می‌کند و پیریت حاوی دو مول گوگرد است، فرض نهایی این است که پروتون‌های تولیدشده با اکسیداسیون یک مول گوگرد با یک مول کلسیت خنثی می‌شوند که منجر به محاسبه زیر می‌شود:



$$[(100) \text{ mole weight calcite} / (32) \text{ mole sulfur weight}] \times (10) \text{ tCaCO}_3/1000\text{t} = 31.25$$

ضریب ۱۰ ارایه شده نشان می‌دهد که چه مقدار کربنات به مواد تشکیل‌دهنده زهاب اسیدی معدن در تن برای بافر کردن سیستم اضافه می‌شود.

شکل ۳ توزیع pH را در نمونه تهیه‌شده از سد باطله مجتمع مس سرچشمه را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نتایج حاصل از آزمایش pH گل اشباع

۴-۲- نتایج آزمایش فیز

با آزمایش فیز غلظت و حجم اسید مورد نیاز تعیین می‌شود. آزمایش میزان فیز، یک آزمایش کیفی است و معیار خاصی برای آن وجود ندارد و درجه واکنش نمونه به اسید با ارزیابی درجه فیز به صورت بصری توسط متخصص آزمایشگاه تعیین می‌شود. در این آزمایش به ۲ گرم از نمونه باطله مس سرچشمه چند قطره هیدروکلریک اسید ۲۵ درصد حجمی اضافه شد. نتیجه آزمایش فیز نشان داد که سرعت واکنش ضعیف تا بدون واکنش است. سرعت واکنش نمونه‌ها تعیین شده و حجم و غلظت اسید از جدول ۴ انتخاب می‌شود.

جدول ۴- حجم و نرمالیت اسید مورد استفاده برای رتبه‌بندی عدد فیز در آزمایش ABA اصلاح شده

ویژگی‌های اسید کلریدریک		آزمایش Fizz
حجم (میلی لیتر)	نرمالیت	
۲۰	۰/۱	بدون واکنش
۴۰	۰/۱	ضعیف
۴۰	۰/۵	متوسط
۸۰	۰/۵	قوی

۴-۳- نتایج آزمایش محاسبه اسید-باز اصلاح شده

مقادیر پتانسیل تولید اسید^۱ و خنثی‌سازی^۲ با رابطه ۱ و ۲ محاسبه می‌شود. اختلاف AP و NP، پتانسیل خنثی‌سازی

^۱ Acid Potential (AP)

^۲ Neutralization Potential (NP)

^۳ Net Neutralization Potential (NNP)

بر اساس نظر رابستون و براگتون استفاده می شود.

قسمت‌هایی که دارای وضعیت نامعلوم‌اند باید تحت آزمایش‌های سینتیکی قرار گیرند تا وضعیت آن‌ها مشخص شود. اگر برای ارزیابی نمونه‌ها از ملاک تفسیر نسبت NP/AP استفاده شود زمانی که این نسبت بیش از ۳ باشد امکان تولید زهاب وجود ندارد و اگر کوچک‌تر از ۱ باشد، نمونه تولیدکننده اسید است. برای مقادیر بین ۳ و ۱ وضعیت نمونه‌ها نامشخص است. اگر برای ارزیابی نمونه‌ها از ملاک تفسیر NNP استفاده شود، برای مقادیر بزرگ‌تر از ۲۰ امکان تولید زهاب وجود ندارد و اگر کوچک‌تر از ۲۰- باشد، تولیدکننده اسید است و برای مقادیر بین ۲۰ و ۲۰- وضعیت نمونه نامشخص است [۲۶،۲۷].

بر اساس نتیجه آزمایش فیز، حجم و غلظت اسید مصرفی برای آزمایش محاسبه اسید- باز اصلاح‌شده به ترتیب ۰/۱ نرمال و ۲۰ میلی‌لیتر انتخاب شد. آزمایش بر اساس مشخصات ارائه‌شده در جدول ۵ انجام گرفت و طبق محاسبات انجام‌شده، مقادیر پتانسیل تولید و خنثی‌سازی اسید به دست آمده در جدول ۶ ارائه‌شده است.

روش‌های متعددی برای تفسیر نتایج آزمایش محاسبه اسید- باز اصلاح‌شده وجود دارد که اساس همه آن‌ها، مقایسه پتانسیل تولید اسید (AP) و پتانسیل خنثی‌سازی اسید (NP) و اختلاف بین آن‌ها (NNP) و نسبت بین آن‌ها است. معمول‌ترین این روش‌ها، روش رابستون و براگتون به صورت جدول ۷ است. با توجه به نتایج محاسبات ارائه‌شده در جدول ۶، مقدار NNP کوچک‌تر از ۲۰- و نسبت NP/AP عددی کوچک‌تر از ۱ است. با این اوصاف نمونه در بخش مواد دارای پتانسیل تولید اسید قرار می‌گیرد.

جدول ۵- مشخصات شرایط آزمایش محاسبه اسید- باز اصلاح‌شده

شماره نمونه	نرخ فیز	اسید اضافه شده		pH پس از ۶ ساعت	اسید اضافه شده پس از ۶ ساعت	pH پایانی	مشخصات باز	
		حجم (ml)	نرمالیت (N)				حجم (ml)	نرمالیت (N)
۱	بدون واکنش	۲۰	۰/۱	۱/۳۳	۰	۲	۰/۱	۸

جدول ۶- نتایج آزمایش محاسبه اسید- باز اصلاح‌شده

شماره نمونه	نوع باطله	درصد گوگرد	مقدار AP	مقدار NP	مقدار NNP	نسبت NP/AP
۱	باطله سد باطله	۳/۵	۱۰۹/۳۸	۲۶/۹۶	-۷۹/۴۲	۰/۲۷

جدول ۷- تفسیر نتایج آزمایش محاسبه اسید- باز اصلاح‌شده بر اساس نظر رابستون و براگتون [۲۶]

ملاک تفسیر	وضعیت نامعلوم	دارای پتانسیل تولید اسید	فاقد پتانسیل تولید اسید
NNP(KgCaCO ₃ /tonne)	بین ۲۰ و ۲۰-	کوچک‌تر از ۲۰-	بزرگ‌تر از ۲۰
NP/AP (بدون واحد)	بین ۱ و ۳	کوچک‌تر از ۱	بزرگ‌تر از ۳

پس از پایان آزمایش مقدار پتانسیل خنثی (NP) مطابق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$NP = [(N \cdot V)_{HCl} - (N \cdot V)_{NaOH}] \times 50 / W \quad (2)$$

محاسبه NP برای نمونه: نمونه باطله فرآوری مس سرچشمه

$$NP = [(0.1 \times 20) - (0.1 \times 8)] \times 50 / 2.003 = 29.96 \text{ KgCaCO}_3/\text{tonne} \quad (3)$$

که در آن:

N: نرمالیت

V: حجم (میلی‌لیتر)

W: وزن نمونه (گرم)

ضریب ۵۰، فاکتور تبدیل به KgCaCO₃/tonne NP کلسیم کربنات یا کیلوگرم سولفوریک اسید بر تن باطله (کیلوگرم)

سپس اختلاف و نسبت پتانسیل اسیدی به پتانسیل خنثی محاسبه می‌شود. اگرچه روش‌های مختلفی برای ارائه نتایج آزمایش محاسبه اسید- باز اصلاح‌شده وجود دارد اما متداول‌ترین آن‌ها پتانسیل خنثی‌سازی خالص (NNP) است.

$$NNP = NP - AP \quad (4)$$

محاسبه NNP برای نمونه: نمونه باطله فرآوری مس سرچشمه

$$NNP = 20.96 - 109.375 = -79.415 \text{ KgCaCO}_3/\text{tonne}$$

برای تحلیل و نتایج حاصل آزمایش محاسبه اسید- باز اصلاح‌شده معمول‌ترین روش استفاده از جدول ۷ طراحی‌شده

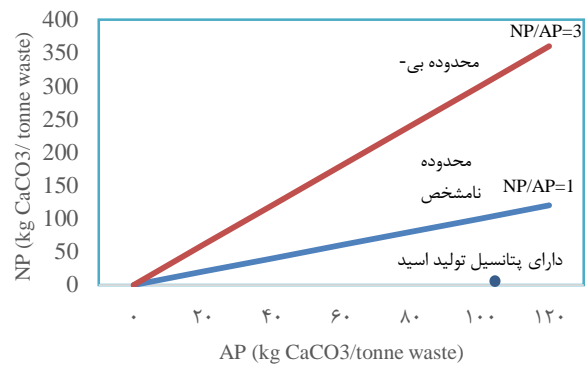
۵- تحلیل نتایج آزمایش‌های ستونی

۵-۱- نتایج اندازه‌گیری pH

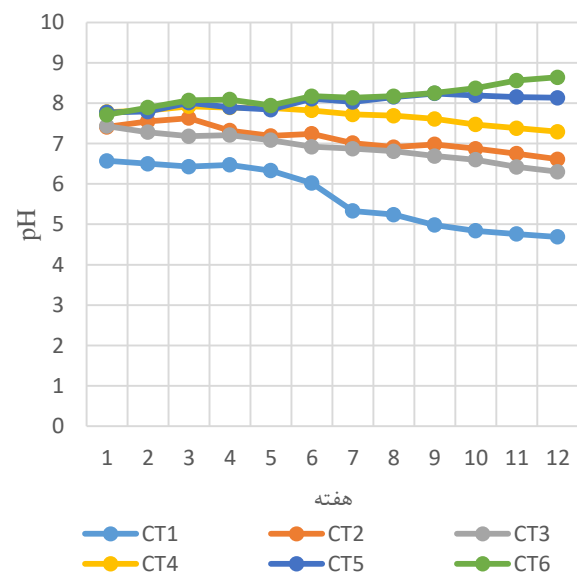
pH نمونه‌های زهاب بلافاصله بعد از جمع‌آوری اندازه‌گیری شد. با توجه به شکل ۵ منحنی pH برای ستون‌های ۱ تا ۴ روند نزولی در طولانی مدت را نشان می‌دهد که این روند برای ستون ۱ با توجه به اکسیداسیون بالا شیب تندتری دارد، همچنین این روند کاهشی در اوایل دوره چندان محسوس نیست اما به‌مرور زمان منظم‌تر می‌شود. در ستون‌های ۳ تا ۶ در هفته‌های اول یک بازه افزایش در مقدار pH دیده می‌شود که احتمالاً به دلیل انحلال کلسیم کربنات پوشش آلی قبل از شروع فرآیند اکسیداسیون است و اینکه با توجه به ضخامت بالاتر پوشش باطله در ستون‌های ۶ در مدت‌زمان دوره آزمایش pH رو به افزایش و در اواخر دوره شیب کندتری دارد که به دلیل کاهش کربنات بوده و شروع دوره اکسایش پیش‌بینی می‌شود اما در ستون ۶ با توجه به محتوای بالای آب و افزایش pH تولید زهاب قلیایی وجود دارد.

۵-۲- نتایج اندازه‌گیری Eh

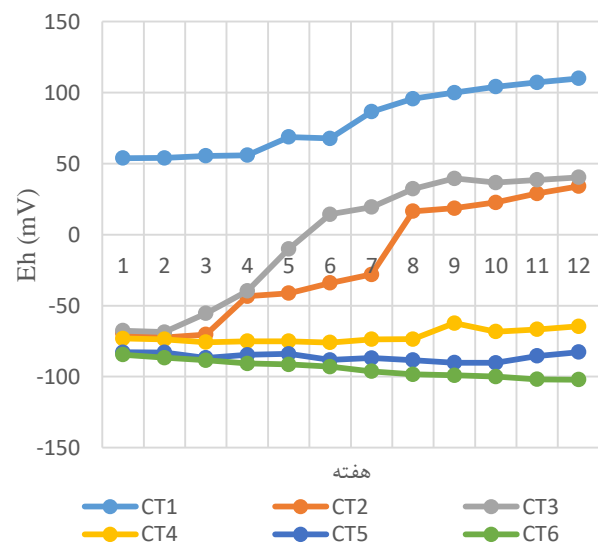
برای اندازه‌گیری پتانسیل اکسایش-کاهش Eh زهاب‌های جمع‌آوری‌شده از ستون‌های آزمایش از دستگاه pH متر، بلافاصله بعد از جمع‌آوری زهاب استفاده شد. همچنین نمونه‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری Eh همان نمونه‌های تهیه‌شده برای اندازه‌گیری pH بود. با توجه به منحنی در شکل ۶ در ستون‌های ۱، ۲ و ۳ با توجه به اینکه نرخ pH به نسبت کمتری کاهش پیدا کرده و به دنبال آن Eh به ویژه در اواخر به صورت صعودی افزایش پیدا کرده است، نشان‌دهنده این است که به تدریج شرایط برای اکسیداسیون مواد باطله فرآوری مهیا می‌شود. در هفته‌های اول یک قسمت نزولی در منحنی ستون ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که به دلیل انحلال سریع کلسیم کربنات ماده آلی پوشش‌دهنده است. مقدار Eh در ستون‌های ۴، ۵ و ۶ منفی است که نشان‌دهنده شرایط احیایی است اما این شرایط احیایی برای ستون ۴ و ۵ پایدار نیست و در هفته‌های آخر دوره میل به اکسایش مشاهده می‌شود. اختلاف تغییرات Eh در ستون ۵ چندان چشمگیر نبوده و این امر دلیلی برای کافی بودن مقدار ماده آلی به‌کاررفته در این ستون است. در ستون ۶ در کل اثری از اکسایش دیده نمی‌شود که دلیل آن میزان آب بیش از حد باعث خراب شدن پوشش می‌شود.



شکل ۴- نمودار تفسیر نتایج آزمایش محاسبه اسید- باز اصلاح‌شده [۲۴]

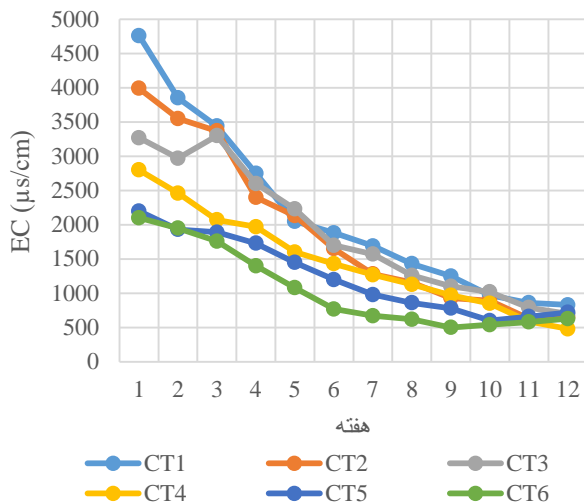


شکل ۵- نمودار تغییرات pH در هر کدام از ستون‌ها در طول دوره آزمایش

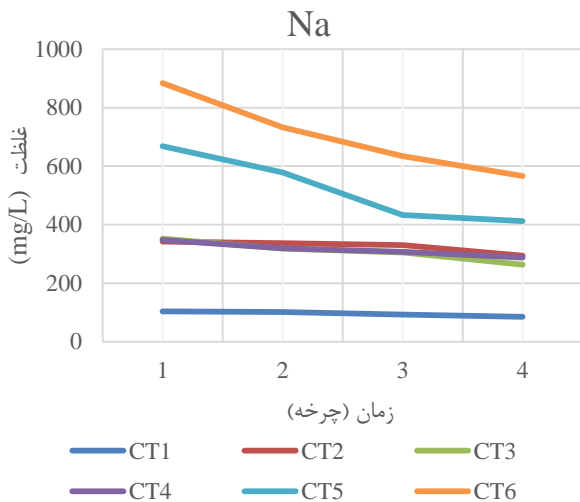


شکل ۶- تغییرات Eh در هر کدام از ستون‌ها در طول دوره آزمایش

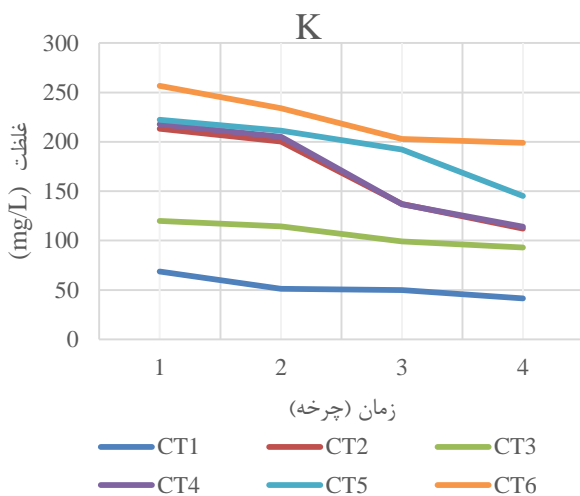
۵-۳- نتایج اندازه‌گیری EC



شکل ۷- نمودار تغییرات هدایت الکتریکی (EC) زهاب حاصل از ستون‌ها در طول دوره آزمایش



شکل ۸- تغییرات غلظت سدیم در زهاب حاصل از ستون‌های آزمایش



شکل ۹- تغییرات غلظت پتاسیم در زهاب حاصل از ستون‌های آزمایش

برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی زهاب‌ها، ابتدا EC متر با استفاده از محلول پتاسیم کلرید ۰/۵ نرمال استاندارد واسنجی شد و سپس مورد اندازه‌گیری قرار زهاب‌های گرفت. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، میزان هدایت الکتریکی زهاب‌ها در سلول ۱، ۲ و ۳ در مقایسه با سلول‌های دیگر بالاتر است. این موضوع نشان می‌دهد که میزان یون‌ها و فلزات موجود در زهاب ستون ۱، ۲ و ۳ به مراتب بیشتر از سایر ستون‌ها است که علت آن شروع شرایط اکسیداسیون و در نتیجه تحرک بیشتر فلزات موجود در باطله است. در ستون‌های ۴، ۵ و ۶ منحنی هدایت الکتریکی در سطوح پایین‌تری قرار دارند، دلیل این حالت وجود کربنات و شرایط احیایی حاکم در سلول‌ها است که از تحرک یون‌ها و فلزات جلوگیری می‌کند. در این شرایط اکثر فلزات نامحلول بوده و رسانایی چندانی ایجاد نمی‌شود. در اواخر دوره میزان هدایت الکتریکی با شدت کم‌تری کاهش پیدا می‌کند که به دلیل افزایش انحلال یون کلسیم است.

۵-۴- نتایج اندازه‌گیری غلظت عناصر محلول

نمودارهای مربوط به غلظت عناصر موجود در زهاب حاصل از هر ستون در شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که مقدار عناصر مختلف در ستون ۱ کمترین مقدار خود را دارد که به دلیل کمبود ترکیبات است اما در سایر ستون‌ها با افزایش مقدار ماده پوشش‌دهنده به ویژه در ستون‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ با افزایش انحلال ترکیبات، مقادیر عناصر افزایش پیدا کرده است، دلیل دیگری که برای افزایش مقدار عناصر وجود دارد، هیدرولیز کانی‌ها و آزاد شدن یون‌ها در اثر افزایش pH است، اما در کل روند نزولی در ستون‌ها مشاهده می‌شود. این روند در ستون ۱ برعکس عمل کرده است و منحنی در هفته‌های آخر روند صعودی نه‌چندان چشمگیری به خود گرفته است با توجه به این روند چنین استنباط می‌شود که علت آن محیا شدن شرایط اکسیداسیون در طولانی‌مدت و کاهش pH باشد. در مورد سایر فلزات که خارج از حد تشخیص گزارش شده‌اند، دلیل آن در ستون‌های دارای پوشش آلی وجود مواد خنثی‌کننده و تشکیل رسوب است اما در ستون ۱ که نسبت به ستون ۲ و ۳ شرایط اکسایش و کاهش pH حاکم است، دلیل آن شرایط نه‌چندان اسیدی بودن در طول دوره است که باعث تحرک فلزات نشده است.

۶-۱- نتایج آزمایش‌های استاتیکی

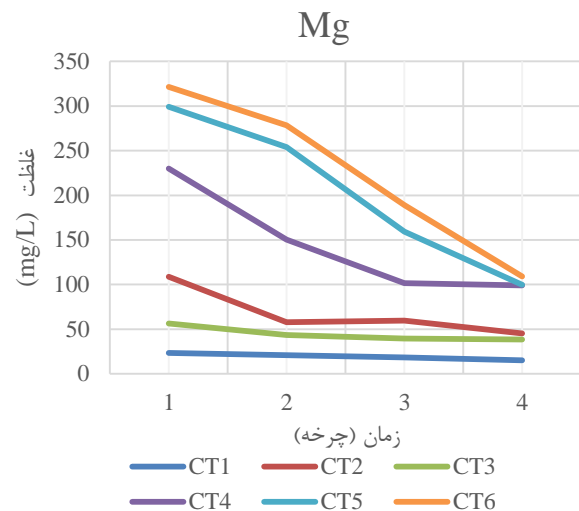
- باطله‌های فرآوری مورد استفاده در این مطالعه حاوی ۳/۵ درصد وزنی گوگرد و دارای پتانسیل خنثی‌سازی خالص (NNP) $CaCO_3/t$ ۷۹/۴۲- و مقدار NP/AP برابر با ۰/۲۷ به دست آمده است که طبق تفسیر نتایج آزمایش محاسبه اسید- باز اصلاح شده باطله یاد شده دارای پتانسیل تولید اسید است.
- با توجه به نتیجه آزمایش Paste pH مقدار pH پس از آماده‌سازی نمونه بالاتر از ۷ بوده و این مقدار در باطله اولیه حدود ۸ گزارش شد. از این مطلب چنین استنباط می‌شود که باطله یاد شده در گذر زمان اکسید شده و سبب کاهش pH آن می‌شود.

۶-۲- نتایج آزمایش‌های ستونی

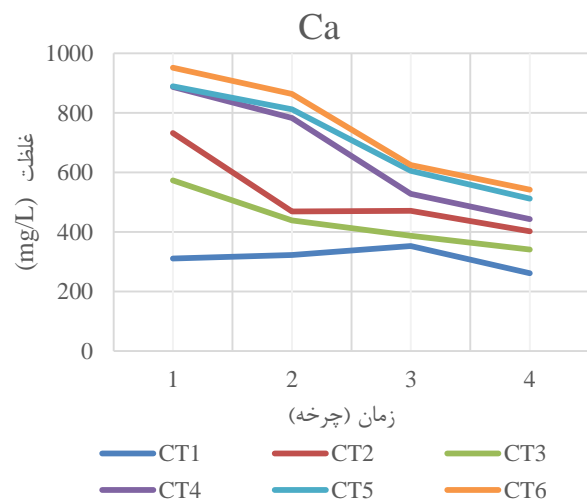
در آزمایش‌های ستونی، ماده آلی مورد استفاده به عنوان پوشش با ۳۰ درصد (w/w) در دو ضخامت ۳۰ و ۶۰ در داخل ستون‌ها بر روی باطله بارگذاری شد، کل کربن این ماده با آنالیز لکو حدود ۵/۳۷ درصد گزارش شد. با توجه به آنالیزهای انجام شده مقدار فلزات سنگین این ماده نیز خیلی پایین بود. عمده فازهای غیرآلی شناسایی شده با استفاده از XRD کوارتز و کلسیت بود. میزان بارندگی نیز بر اساس میزان بارندگی در منطقه سرچشمه کرمان در دو حالت میزان بارندگی طبیعی و دو برابر میزان بارندگی در ستون‌های مختلف اعمال شد.

پارامترهای مختلفی از جمله pH، Eh، EC، غلظت یون و فلزات حاصل از زهاب‌های جمع‌آوری شده، ضخامت پوشش و میزان بارندگی برای بررسی رفتار پوشش باطله در جلوگیری از اکسیداسیون باطله در آزمایش‌های ستونی مورد بررسی قرار گرفت که می‌توان به صورت خلاصه به نتایج حاصل از آن در بندهای زیر اشاره کرد:

- منحنی مربوط به pH و هدایت الکتریکی زهاب سلول‌های ۱ که با نمونه باطله بارگذاری شده و ستون‌های ۲ و ۳ که به ترتیب با مقدار $5+7/5$ و $5+7/5$ سانتی‌متر ماده آلی پوشش داده شده است، در رسته پایین‌تر از ستون‌های دیگر یک‌روند نسبتاً منظم کاهش و در Eh در سطح بالاتر از منحنی‌های مربوط به ستون‌های دیگر یک‌روند افزایشی نشان داد که می‌تواند دلیلی بر تایید وجود محیط اکسایش در مدت‌زمان کمتر در ستون ۱ و با گذشت زمان نه‌چندان



شکل ۱۰- تغییرات غلظت منیزیم در زهاب حاصل از ستون‌های آزمایش



شکل ۱۱- تغییرات غلظت کلسیم در زهاب حاصل از ستون‌های آزمایش

۶- نتیجه‌گیری

بخش مدیریتی باطله تاکید بر روی جلوگیری از تولید زهاب اسیدی معدن دارد و به همین دلیل آزمایش‌هایی با روش پوشش‌دهی باطله در داخل ستون‌هایی از جنس پلکسی گلاس در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفت. در ادامه برای بررسی رفتار پوشش در جلوگیری از اکسیداسیون باطله و تولید زهاب اسیدی معدن کیفیت زهاب حاصل از ستون‌ها مورد بررسی قرار گرفت. موارد زیر را می‌توان از اصلی‌ترین نتایج این مطالعه دانست:

در نظر گرفته می شود که به راحتی برای اقدامات کنترل تولید اسید در دسترس است.

- لجن فاضلاب شهری با خاصیت قلیایی بالا، می تواند اسیدیته حاصل از اکسیداسیون باطله های سولفیدی را خنثی کند. بعلاوه، به دلیل نفوذپذیری کم، مقدار آبی که به سولفیدها نفوذ می کند محدود است، بنابراین اکسیداسیون مواد سولفیدی به طور قابل توجهی کاهش می یابد.

- یک لایه لجن فاضلاب شهری (با داشتن شرایطی نزدیک به کمپوست) بر روی یک منطقه آلوده، ویژگی های فیزیکی آن مانند تراکم، ظرفیت نگهداری آب، تخلخل و پایداری سنگ دانه ها به طور قابل ملاحظه ای بهبود یافته و ایجاد پوشش گیاهی را ترجیح می دهد.

منابع

۱. صادقی وزین، مهسا و کرابی، سیدمحسن و اخترپور، علی و دلیری، فرزاد، ۱۳۹۹، بررسی استراتژی های مدیریت زهاب اسیدی معدن، ششمین همایش بین المللی مهندسی عمران، معماری، شهرسازی با رویکرد توسعه پایدار

2. Gutiérrez, M., Mickus, K., & Camacho, L. M. (2016). Abandoned PbZn mining wastes and their mobility as proxy to toxicity: A review. *Science of the Total Environment*, 565, 392-400.

3. Moreno-González, R., Macías, F., Olías, M., & Cánovas, C. R. (2022). Temporal evolution of acid mine drainage (AMD) leachates from the abandoned tharsis mine (Iberian Pyrite Belt, Spain). *Environmental Pollution*, 295, 118697.

4. Liu, J., Li, N., Zhang, W., Wei, X., Tsang, D. C., Sun, Y., ... & Feng, Y. (2019). Thallium contamination in farmlands and common vegetables in a pyrite mining city and potential health risks. *Environmental pollution*, 248, 906-915.

۵. شاه حسینی، مجید، دولتی ارده جانی، فرامرز، امینی، مهدی، ابراهیمی، لونا، محبی، عباس. (۱۳۹۸). ارزیابی پتانسیل تولید زهاب اسیدی بر اساس روش های استاتیک در یکی از انباشته های کم عیار معدن مس میدوک. *نشریه مهندسی معدن*.

6. Maleki, H., Noparast, M., Chehrehani, S., Mirmohammadi, M. S., & Rezaei, A. (2023). Optimization of flotation of the Qaleh Zari mine

زیاد در ستون های ۲ و ۳ باشد، همچنین اضافه کردن مواد آلی تا ۵ سانتی متر در پایان دوره ها با توجه به تغییر در پارامترها در دوره های مختلف نشانگر اثرگذاری این عمل است اما در کل به دلیل کاهش pH در ستون های ۲ و ۳ و مشاهده فرسایش، دلیل بر کافی نبودن محتوای آب (به ویژه که منطقه کرمان تابستان هایی با دمای هوای بالاتر و تبخیر و تعرق نسبتا بالایی را تجربه می کند) و عملکرد ناکارآمد پوشش است.

- با توجه به نتایج به دست آمده از اندازه گیری پارامترهای مختلف در ستون های ۵ و ۶، مشخص شد که ضخامت دو برابر ماده آلی بخشی از کمبود مربوط به آب را جبران می کند و این که آب اضافی باقی مانده در سطح ستون ۶ نشانگر بیش از حد بودن آب لازم برای جلوگیری از اکسیداسیون است و چون شرایط pH در دو ستون تقریبا نزدیک به هم است، بنابراین با توجه به نتایج اندازه گیری ها ستون ۵ در طولانی مدت با توجه به شرایط محیطی معدن کارآمدتر است.

- غلظت اکثر فلزات در زهاب های جمع آوری شده به جز برخی فلزات قلیایی و قلیایی خاکی زیر حد تشخیص باقی می ماند.

- حجم زهاب های جمع آوری شده نشان می دهد که زهکشی در دوران پایانی آزمایش ها کاهش پیدا کرد که علت آن مقدار بالای کانی های رسی در ماده باطله و متورم شدن آن ها در برابر رطوبت و همچنین اندازه کوچک مواد است و همچنین با توجه به مشاهدات می توان نتیجه گرفت که کاهش pH باعث زهکشی بهتر می شود.

- استفاده از مواد آلی مانند لجن فاضلاب شهری نشان داد که در مدیریت باطله های سولفیدی فلزی به علت بعد اقتصادی حداقلی (صرفا هزینه جابه جایی) و همچنین حل هم زمان مشکل زیست محیطی ناشی از باطله سولفیدی، راهکار خوبی برای جلوگیری از تولید زهاب اسیدی معدن در سدهای باطله تعیین شد.

- یک لایه از لجن فاضلاب شهری با رطوبت بالا به عنوان یک مانع فیزیکی در برابر انتشار اکسیژن عمل می کند. با توجه به اینکه ضریب انتشار اکسیژن (۹-۲×۱۰ مترمربع بر ثانیه) و حلالیت اکسیژن (۸/۶ گرم در مترمکعب در ۲۵ درجه سانتی گراد) در آب بسیار کم است، ایجاد پوشش های آلی به عنوان یکی از کارآمدترین عوامل محدود کننده اکسیژن

17. Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, R., & Hellier, W. (1998). Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage. National Mine Land Reclamation Center, Morgantown, 131.
18. Diao, Z., Shi, T., Wang, S., Huang, X., Zhang, T., Tang, Y., ... & Qiu, R. (2013). Silane-based coatings on the pyrite for remediation of acid mine drainage. *Water Research*, 47(13), 4391-4402.
19. Brady, K. B., Smith, M. W., & Schueck, J. (1998). Coal mine drainage prediction and pollution prevention in Pennsylvania. Pennsylvania Department of Environmental Protection, Harrisburg.
20. Win, T. S., Dwiki, S., Mastumoto, S., & Kusuma, G. J. (2020). Application of fly ash and organic material as dry cover system in prevention of acid mine drainage generation. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8(5), 56-64.
21. Jones, S. N., & Cetin, B. (2017). Evaluation of waste materials for acid mine drainage remediation. *Fuel*, 188, 294-309.
22. Yang, S., Luo, T., Fan, J., Zhou, C., Hu, M., Wang, J., ... & Liu, G. (2021). Performance and mechanisms of PropS-SH/HA coatings in the inhibition of pyrite oxidation. *ACS Omega*, 6(47), 32011-32021.
23. Liu, Y., Hu, X., & Xu, Y. (2017). PropS-SH/SiO₂ nanocomposite coatings for pyrite oxidation inhibition to control acid mine drainage at the source. *Journal of Hazardous Materials*, 338, 313-322.
24. Kang, C. U., Jeon, B. H., Park, S. S., Kang, J. S., Kim, K. H., Kim, D. K., ... & Kim, S. J. (2016). Inhibition of pyrite oxidation by surface coating: a long-term field study. *Environmental Geochemistry and Health*, 38, 1137-1146.
25. Peppas, A., Komnitsas, K. A., & Halikia, I. (2000). Use of organic covers for acid mine drainage control. *Minerals Engineering*, 13(5), 563-574.
۲۶. بهنام فرد، علی، خفاجه، اسماعیل، و علایی، رسول. (۱۳۹۸). ارزیابی پتانسیل تولید زهاب اسیدی باطله های کارخانه فرآوری مجتمع سنگ آهن سنگان. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۱۰ پیاپی ۸۹)، ۳۱-۴۰.
۲۷. سهرابی، وحید، قادری، مرتضی. (۱۳۸۳). بررسی پتانسیل تولید زهاب اسیدی از باطله های کارخانه زغالشویی البرز شرقی با استفاده از آزمایش ABA اصلاح شده. کنفرانس مهندسی معدن ایران.
7. Mohammadkhani, M., Abdollahy, M., & Khalesi, M. R. (2020). Investigation of Mechanism of Adsorption of Xanthate and Hydroxamate on Malachite. *Journal of Mining and Environment*, 11(3), 921-933.
8. Nieva, N. E., Borgnino, L., & García, M. G. (2018). Long term metal release and acid generation in abandoned mine wastes containing metal-sulphides. *Environmental Pollution*, 242, 264-276.
9. Zheng, L., Qiu, Z., Tang, Q., & Li, Y. (2019). Micromorphology and environmental behavior of oxide deposit layers in sulfide-rich tailings in Tongling, Anhui Province, China. *Environmental Pollution*, 251, 484-492.
10. Song, K., Wang, F., Peng, Y., Liu, J., & Liu, D. (2022). Construction of a hydrogeochemical conceptual model and identification of the groundwater pollution contribution rate in a pyrite mining area. *Environmental Pollution*, 305, 119327.
11. US-EPA, (1994). Acid mine drainage prediction. Office of Solid Waste, Special Waste Branch, Washington.
12. Qureshi, A., Maurice, C., Öhlander, B., (2016). Potential of coal mine waste rock for generating acid mine drainage. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 160, pp. 44-54.
13. Abrosimova, N., Gaskova, O., Loshkareva, A., Edelev, A., Bortnikova, S., (2015). Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu-Mo deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 157, pp. 1-14.
14. Shu, W.S., Ye, Z.H., Lan, C.Y., Zhang, Z.Q., Wong, M.H., (2001). Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. *Environment International*, Vol. 26, Issues 5-6, pp. 389-394.
15. J. Taylor and S. Pape. (2007). Managing Acid and Metalliferous Drainage. Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry. no. September, p. 107, 2007.
16. Parisi, D., Horneman, J., & Rastogi, V. (1994). USE OF BACTERICIDES TO CONTROL ACID MINE DRAINAGE FROM SURFACE OPERATIONS¹. In International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage: Mine drainage (Vol. 2, p. 319). US Department of the Interior, Bureau of Mines.