



Geochemistry and Mineralogy of Coal Spoils: A Case Study of Takht Coal Mine, Golestan Province

Arian Yadollahi Zadeh¹, Giti Forghani Tehrani^{2*}

¹ Msc Student, Department of Environmental Geology and Hydrology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Associate Professor, Department of Environmental Geology and Hydrology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 11 June 2023
Revised: 17 September 2023
Accepted: 17 September 2023

Keywords

Toxic Elements
Acid Drainage
Spoil
Takht Coal Mine
Eastern Alborz

*Corresponding author

Giti Forghani Tehrani
✉ forghani@shahroodut.ac.ir

ABSTRACT

This study investigates the geochemical and mineralogical characteristics of Takht Coal Spoils in Minoodasht, Iran. For this purpose, six representative spoil samples were collected. The geochemistry of the samples were studied using XRF and ICP-OES analyses, microscopic studies, XRD, and SEM-EDX spectra. To examine the potential of Acid Mine Drainage (AMD) by the spoil samples, different static tests including pH and EC measurement of saturated paste, Acid-Base Accounting tests (ABA), and Net Acid Generation (NAG) / Net Acid Potential (NAP) test were applied. Based on the geochemical data, the studied samples are not enriched with Fe, Mn, Ni, Zn, low enriched with Cu and Cd, moderately enriched with Mo, significantly enriched with Sb and Pb, and strongly enriched with As. Quartz, muscovite, clinocllore and kaolinite are the major mineral phases in the studied samples. Static tests indicate that most of the samples are characterized by saturated paste pH<5.5, pH NAG<4.5, negative net neutralization potential (NNP), and positive NAPP values. NNP and NAG values as well as the position of the samples on the geochemical diagrams show that the formation of acid drainage is likely through the oxidation of spoils discarded around the mine. Regarding the environmental hazards imposed by acid mine drainage, the proper management of the spoils in the studied area deems necessary.

How to cite this article

Forghani Tehrani, G. and Yadollahi Zadeh, A., 2023. Geochemistry and Mineralogy of Coal Spoils: A Case Study of Takht Coal Mine, Golestan Province. *Journal of Economic Geology*, 15(4): 31–53. (in Persian with English abstract)

<https://doi.org/10.22067/econg.2023.82856.1080>



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Coal is one of the most important fossil fuels that has been used by humans since ancient times due to its unique properties. However, coal extraction typically results in environmental problems such as land destruction, mine collapse, mine explosions, land subsidence, surface and groundwater pollution, soil and air pollution, and the production of Acid Mine Drainage (AMD). AMD is produced through the oxidation of metal sulfides (especially pyrite) present in waste rock dumps, processing wastes, underground mine tunnels, and open-pit mines. Oxygen, moisture, and ferric iron resulting from the oxidation of iron-bearing sulfides (especially pyrite) are the most important factors in sulfide oxidation (Munksgaard et al., 2012). AMD is one of the most important environmental problems in mining industry and one of the main causes of water pollution (Mohanty et al., 2018; Rezaie and Anderson, 2020), which reduces the pH and enhances the electrical conductivity (EC) of water and increases the concentration of potentially toxic elements (especially copper, zinc, arsenic, manganese, cobalt, nickel, lead, cadmium, barium, and mercury) in the surrounding areas (Pan et al., 2021; Kavehei et al., 2021). Moreover, the detrimental effects of AMD persist for decades and even centuries after mine closure. Coal spoils are among the most important sources of AMD production, because they usually contain high amounts of sulfidic minerals (e.g., pyrite, chalcopyrite, and arsenopyrite). Considering the negative impacts of AMD on the whole ecosystem, especially in coal mines where very large amounts of spoils are produced during extraction of coal, the prediction of AMD formation is of great importance that is useful in proper managing of spoil's disposal and taking actions for preventing the formation of AMD (Kavehei et al., 2021). The aim of this study is investigating the geochemistry, mineralogy, and potential of AMD production by the coal spoils of Takht Coal Mine, located in Minoodasht County, Golestan Province, Iran. Coal extraction produces a large amount of waste materials, which are disposed around the mine tunnels. Since coal spoils is one of the most important sources for AMD production, examining their potential for acid generation is of great importance. Moreover, the geochemistry and

mineralogy of the studied spoils were investigated by XRF and ICP analyses, microscopic studies, XRD, and SEM-EDX spectra of the representative samples.

Materials and methods

Five representative samples were taken from the waste rock (spoil) dumps disposed near the extraction tunnels, and one representative sample was taken from the spoils discarded around Takht Coal Mine. To obtain a representative sample at each station, at least 30 sub-samples were collected and mixed together. The weight of each sub-sample was approximately 3 kg. To identify the minerals present in the samples, polished sections were prepared and studied, and X-ray diffraction (XRD) and SEM-EDX analyses were implemented. The geochemical compositions of the studied samples were studied by X-ray fluorescence (XRF) (for major oxides and sulfur) and ICP-OES (for major and trace elements) analyses. To predict the potential of AMD production by the studied samples, the most common statistic tests were conducted using standard methods: 1) measuring pH and electrical conductivity (EC) of saturation pastes of the samples; 2) the modified Acid-Base Accounting (ABA) tests; and 3) Net Acid Generation (NAG) and Net Acid Potential (NAP) tests.

Results and Discussion

The results showed that the spoils of Takht Coal Mine is not enriched with Fe, Mn, Ni, and Zr, significantly enriched with Sb, Pb, Mo, and extremely enriched with As. The high enrichment of toxic elements (i.e., As, Sb, and Pb) in the studied samples is likely due to the presence of pyrite and chalcopyrite in the samples, as confirmed by the mineralogical studies in which pyrite presents as framboidal aggregates and semi-idiomorphic particles. Moreover, the high concentration of potentially toxic elements in the studied samples must be considered a potential risk which may result in serious environmental impacts on the surrounding areas. The statistic tests showed that the pH values of samples 1, 2, 3, and 4 in the net Acid Generation (NAG) test are <4.5. On the other hand, these samples have a positive Net Acid Production Potential (NAPP) and a negative Net Neutralization Potential (NNP). On the other hand, in samples 5 and 6, NAG pH is greater than 4.5, and the pH value of the saturation paste is approximately neutral. The

two samples have the lowest sulfur among all samples. Moreover, XRD spectra showed that muscovite and quartz are present in these samples, which can prevent acid production or neutralize the produced acid. The results of the static tests showed that samples 5 and 6 have a negative NNP and a positive NAPP. Therefore, the possibility of acid production in the waste materials is uncertain.

Conclusion

Considering the high concentrations of potentially toxic elements in the spoil samples of Takht Coal Mine, in the event of acid mine drainage formation, the surface and groundwater resources and soil of the studied area will be seriously affected. To reduce the

environmental impacts of Takht Coal Mine's spoils, taking proper measures is very relevant. Some possible measures include adding lime to the waste materials to neutralize the spoils, adding soil to the waste material, providing drainage channels under the waste dump bed to transfer produced acid into ponds containing lime materials, depositing waste material away from surface water paths, and separating pyrite from the waste material can be taken into account.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Research Office of the Shahrood University of Technology.



زمین‌شیمی و کانی‌شناسی باطله‌های استخراج زغال‌سنگ: بررسی موردی معدن تخت، استان گلستان

آرین یدالهی‌زاده^۱، گیتی فرقانی تهرانی^{۲*} 

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی زیست‌محیطی و آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی زیست‌محیطی و آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی باطله‌های معدن زغال‌سنگ تخت واقع در شهرستان مینودشت استان گلستان مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ۶ نمونه معرف برداشت شد و بررسی‌های زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی شامل آنالیزهای ICP، XRF، بررسی مقاطع میکروسکوپی و طیف‌های XRD و SEM-EDX انجام شد. برای ارزیابی پتانسیل تولید زهاب اسیدی معدن توسط باطله‌های معدنی، آزمایش‌های استاتیک (شامل اندازه‌گیری pH و EC گل اشباع، آزمون‌های محاسبه اسید-باز (ABA) و آزمایش‌های تشکیل اسید خالص (NAG) و پتانسیل اسید خالص (NAP)) انجام شد. بر اساس داده‌های زمین‌شیمیایی، باطله‌های معدن تخت نسبت به Fe، Mn، Ni و Zn بدون غنی‌شدگی، نسبت به Cu و Cd دارای غنی‌شدگی اندک، نسبت به Mo دارای غنی‌شدگی متوسط، نسبت به Pb و Sb دارای غنی‌شدگی نسبتاً شدید و نسبت به As دارای غنی‌شدگی شدید هستند. کانی‌های موجود در باطله‌ها شامل کوارتز، مسکویت، کلینوکلر و کائولینیت است. نتایج آزمایش‌های استاتیک نشان داد که pH گل اشباع همه نمونه‌ها کمتر از ۵/۵، pH NAG بیشتر نمونه‌ها کمتر از ۴/۵، مقدار NAG همه نمونه‌ها مثبت و مقدار پتانسیل خنثی‌سازی اسید (NNP) آنها منفی است. مقادیر پتانسیل اسید خالص (NAP) و تشکیل اسید خالص (NAP) و همچنین موقعیت نمونه‌ها بر روی نمودارهای زمین‌شیمیایی بیانگر احتمال تشکیل زهاب در اثر اکسایش باطله‌های دورریزی شده در پیرامون معدن است. با توجه به خطرهای زیست‌محیطی ناشی از تشکیل زهاب اسیدی معدن در محدوده مورد بررسی، مدیریت زیست‌محیطی باطله‌ها ضروری است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

واژه‌های کلیدی

عناصر سمی
زهاب اسیدی
باطله
معدن تخت
البرز شرقی

نویسنده مسئول

گیتی فرقانی تهرانی

forghani@shahroodut.ac.ir 

استناد به این مقاله

یدالهی‌زاده، آرین و فرقانی تهرانی، گیتی، ۱۴۰۲. زمین‌شیمی و کانی‌شناسی باطله‌های استخراج زغال‌سنگ: بررسی موردی معدن تخت، استان گلستان. زمین‌شناسی

اقتصادی، ۱۵(۴): ۳۱-۵۳. <https://doi.org/10.22067/econg.2023.82856.1080>

مقدمه

زغال‌سنگ یکی از مهم‌ترین سوخت‌های فسیلی است که به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصربه‌فرد از دیرباز مورد استفاده بشر قرار گرفته است. با این وجود، بهره‌برداری از معادن زغال‌سنگ با مشکلات زیست‌محیطی بسیار متعددی مانند تخریب زمین، ریزش معدن، انفجار معدن، فرونشست زمین، آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی، آلودگی خاک و هوا، و تولید زهاب اسیدی معدن همراه است. زهاب اسیدی معدن در اثر اکسایش سولفیدهای فلزی (به ویژه پیریت) موجود در توده‌های سنگ باطله، باطله‌های فراوری، تونل‌های معادن زیرزمینی و گودال‌های معادن رویاز (که علاوه بر آب‌های زیرزمینی، آب‌های ناشی از بارندگی و سیلاب‌ها نیز می‌توانند در آن نفوذ کنند) تولید می‌شود. اکسیژن هوا، رطوبت، و آهن فریک ناشی از اکسایش سولفیدهای آهن‌دار (به ویژه پیریت) مهم‌ترین عوامل اکسایش سولفیدها هستند (Munksgaard et al., 2012; Abfertawan et al., 2020). زهاب اسیدی معدن، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مشکلات زیست‌محیطی صنعت معدن‌کاری، و یکی از دلایل اصلی آلودگی محیط‌زیست به ویژه آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی در سراسر دنیا شناخته شده است (Mohanty et al., 2018; Rezaie and Anderson, 2020)؛ زیرا علاوه بر کاهش pH و افزایش هدایت الکتریکی آب، باعث انتشار عناصر اصلی و جزئی سمی (به ویژه مس، روی، آرسنیک، منگنز، کبالت، نیکل، سرب، کادمیم، باریوم و جیوه) به محیط‌زیست می‌شود و به این طریق کیفیت محیط، حتی در فاصله‌های چند کیلومتری معدن را به شکل جدی تحت تأثیر قرار می‌دهد (Pan et al., 2021; Kavehei et al., 2021). همچنین اثرات مخرب زهاب اسیدی می‌تواند برای دهه‌ها و قرن‌ها پس از بسته شدن معدن باقی بماند. احتمال تشکیل زهاب اسیدی در معادن سولفید فلزی، فسفات‌های آذرین و زغال‌سنگ بیشتر از سایر معادن است (Tang et al., 2021). با توجه به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تشکیل زهاب اسیدی معدن، پیش‌بینی تولید زهاب به ویژه در معادن زغال‌سنگ که در

آنها حجم بسیار زیاد باطله معدنی در طی استخراج و فراوری ماده معدنی تولید می‌شود، بسیار ضروری است (Acharya and Kharel, 2020; Zwahlen et al., 2023). این پیش‌بینی به مدیریت صحیح باطله‌ها و انجام اقداماتی که مانع از تشکیل زهاب اسیدی می‌شوند و یا تشکیل زهاب را به تأخیر می‌اندازند، کمک می‌کند. جلوگیری از تشکیل زهاب اسیدی تقریباً غیرممکن بوده، و خنثی کردن زهاب اسیدی نیز فرایندی بسیار پرهزینه است (Elghali et al., 2023). بنابراین پیش‌بینی تولید زهاب اسیدی به عنوان اولین و مهم‌ترین گام در مدیریت تشکیل زهاب اسیدی، از اهمیت زیادی برخوردار است (Kavehei et al., 2021; Çelebi and Ribeiro, 2023; Moyo et al., 2023).

روش‌های مختلفی برای ارزیابی و پیش‌بینی پتانسیل تولید زهاب اسیدی معدن وجود دارد که آزمون‌های استاتیک و سینتیک از رایج‌ترین و معتبرترین این روش‌ها به شمار می‌روند. در آزمون‌های استاتیک، پتانسیل تولید زهاب اسیدی با استفاده از محاسبه نرمالیه و حجم اسید و باز مورد نیاز (به ترتیب برای انحلال کانی‌های کربناتی و خنثی کردن اسید) از طریق تیتراسیون، مشخص می‌شود. آزمون‌های سینتیک تکمیل‌کننده آزمایش‌های استاتیک هستند و در ارزیابی و پیش‌بینی تولید زهاب اسیدی نقشی مهم ایفا می‌کنند. در روش‌های سینتیک از آزمایش‌های مختلفی مانند سلول مرطوب، آزمایش ستونی و آزمایش صحرایی استفاده می‌شود (Lottemoser, 2010; Albert et al., 2022).

هدف از انجام این پژوهش، بررسی پتانسیل تولید زهاب اسیدی توسط باطله‌های حاصل از استخراج معدن زغال‌سنگ تخت، واقع در شهرستان مینودشت استان گلستان توسط روش‌های استاتیک است. همچنین پتانسیل باطله‌های زغال‌سنگ معدن تخت از نظر حضور عناصر اصلی و جزئی، مورد بررسی قرار گرفته است و ترکیب کانی‌شناسی باطله‌های معدنی با استفاده از بررسی‌های میکروسکوپی، آنالیز پراش پرتو ایکس، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس بررسی شده است.

زمین‌شناسی منطقه

منطقه تخت جزئی از مناطق زغال‌خیز البرز است و در دامنه شمالی رشته‌کوه‌های البرز شرقی واقع شده است. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی را نشان می‌دهد.

قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه متعلق به کامبرین است که شامل ماسه‌سنگ و کوارتز-آرنایت متوسط تا ضخیم لایه با چین‌بندی به رنگ قرمز تیره (سازند لالون) است. واحدهای جوان‌تر (سازند میلا متشکل از دولومیت متبلور ضخیم لایه، شیل و اسلیت) به صورت ناهمساز روی سازند لالون قرار گرفته‌اند و در جنوب مینودشت و آزادشهر این نهشته‌ها رخنمون دارند. سنگ‌های آذرین با ترکیب آندزیت و بازالت-آندزیت به رنگ قرمز تیره و به سن سیلورین در جنوب مینودشت با همبری بالایی و زیرین ناهمساز رخنمون دارند (نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور).

روش مطالعه

نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

در مجموع ۶ نمونه معرف از باطله‌های انبار شده در مجاورت تونل‌های استخراجی و سد باطله معدن زغال‌سنگ تخت برداشت شد. برای به دست آوردن نمونه معرف در هر ایستگاه، حداقل ۳۰ جزء نمونه برداشت و با یکدیگر مخلوط شد (Lottermoser, 2010). وزن هر جزء نمونه حدود ۳ کیلوگرم در نظر گرفته شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا هر نمونه تا ابعاد ۱ سانتی‌متر خرد شد و سپس به مدت ۲ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد (Lawrence and Wang, 1996). پس از آن نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های استاتیک و آنالیزهای XRD، XRF و SEM توسط الک‌های مناسب، غربال شدند.

بررسی‌های کانی‌شناسی

برای تشخیص کانی‌های موجود در نمونه‌ها، از بررسی مقاطع صیقلی، آنالیز پراش پرتو ایکس توسط دستگاه XRD فیلپس

تاکنون بررسی جامعی بر روی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی و پتانسیل تولید اسید در این منطقه انجام نشده است. با توجه به این که استخراج زغال‌سنگ باعث تولید انبوهی از مواد باطله می‌شود که معمولاً در اطراف تونل‌های معدن دپو می‌شوند و با در نظر گرفتن این موضوع که باطله‌های زغال‌سنگ از مهم‌ترین عوامل تولید زهاب اسیدی هستند، بررسی پتانسیل تولید زهاب اسیدی در این محدوده اهمیت زیادی دارد.

موقعیت جغرافیایی و آب‌وهوایی منطقه

منطقه تخت در فاصله ۱۲ کیلومتری جنوب‌شرقی شهرستان مینودشت، در طول جغرافیایی بین ۵۵ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۲ دقیقه شمالی واقع شده است. میانگین ارتفاع منطقه از سطح دریا ۸۷۰ متر بوده و بالاترین نقطه ارتفاعی مربوط به بلندی‌های کوه الرگاه (۱۵۸۹ متر) و پست‌ترین نقطه مربوط به مینودشت (۱۵۰ متر) است. منطقه تخت دارای تابستان‌های گرم و مرطوب و زمستان‌های پربارش است و بیشتر نزولات به صورت برف در ارتفاعات رخ می‌دهد. بر اساس داده‌های آماری هواشناسی، مقدار متوسط بارندگی سالانه در منطقه حدود ۷۸۷/۳ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۹/۳ درجه سانتی‌گراد است (اداره کل هواشناسی استان گلستان، ۱۳۹۹). بر اساس داده‌های دما و بارش، مقدار ضریب خشکی منطقه (معادله ۱) برابر با ۲۶/۹ است:

معادله ۱:

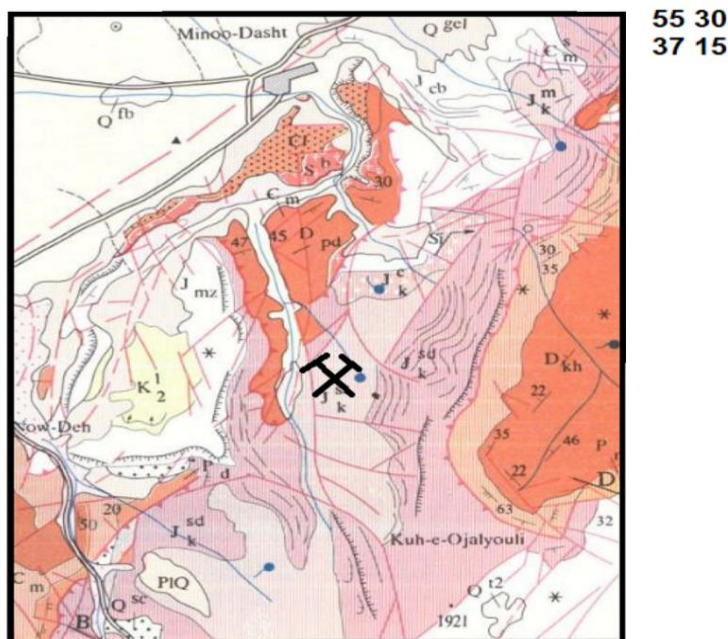
$$I = \frac{P}{T+10}$$

در این رابطه I برابر با ضریب خشکی، P برابر با مقدار بارش (برحسب میلی‌متر) و T درجه حرارت (برحسب درجه سانتی‌گراد) است.

با توجه به مقدار I برای منطقه (۲۶/۹) و بر اساس رده‌بندی دمارتن، منطقه مورد بررسی دارای اقلیم نیمه مرطوب (ضریب خشکی بین ۲۴ تا ۲۷/۹) است.

توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی مدل
Sigma 300- HV دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شد.

مدل D8- Advance Bruker Cu K α ($\lambda=0.15406$ nm)
دانشگاه دامغان و بررسی های میکروسکوپ الکترونی روبشی



55 15
37 00

Q ^{fb}	flood basin and depression fill deposits
Q ^{gcl}	glacial colian deposits (low land loess)
PIQ	unconsolidated sandstone and conglomerate
K ^I ₂	limestone, marly limestone and shale
J ^{mz}	cherty limestone (Mozduran Formation)
J ^{cb}	cherty limestone (Chamanbid Formation)
J ^{sd} _k	sandstone and coal seams (Kashafrud Formation)
J ^m _k	coaly marl with interbedded sandstone
J ^{ss} _k	shale and sandstone
J ^c _k	quartzose conglomerate
C ^m	limestone with shale (Mobarak Formation)
D ^{kh}	limestone with shale (Khoshyeilagh Formation)
D ^{pd}	quartzose sandstone (PADEHA Formation)
S ^b	basaltic andesite-andesite
C ^s _m	micaceous shale and slate (Mila Formation)

شکل ۱. نقشه زمین شناسی معدن تخت (بر گرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ گنبد کاووس)

Fig. 1. The geological map of the Takht Mine (from 1:250000 geological map of Gonbad-e- Kavus)

تجزیه شیمیایی نمونه‌ها

برای تشخیص درصد گوگرد و اکسیدهای اصلی از دستگاه فلورسانس پرتو ایکس مدل Shimadzu-1800 دانشگاه صنعتی شاهرود و برای اندازه‌گیری غلظت عناصر اصلی و جزئی در نمونه‌ها از دستگاه ICP-OES مدل Scheme ME-02 شرکت زرآزما استفاده شد.

حد آشکارسازی دستگاه ICP-OES برای عناصر Pb, V, Zn, Li, La, Cu, Cr, Co, و Ce برابر با ۱ mg/kg، برای عناصر Na, Mg, K, Fe, Ca, و Al برابر با ۱۰۰ mg/kg، برای عناصر Y, Th, Sc, Sb, Mo, و As برابر با ۰/۵ mg/kg، برای عناصر Cd و Ag برابر با ۰/۱ mg/kg، برای عناصر Yb و Be برابر با ۵ mg/kg، برای عناصر Mn, Zr, و Ba برابر با ۵۰ mg/kg، برای عنصر S برابر با ۵۰ mg/kg و برای عنصر Ti برابر با ۱۰ mg/kg است.

محاسبه ضریب غنی‌شدگی

ضریب غنی‌شدگی یکی از مهم‌ترین روش‌های تشخیص شدت آلودگی نمونه‌های جامد زیست‌محیطی به عناصر بالقوه سمی است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

معادله ۲:

$$EF = (M_1/C_1) / (M_2/C_2)$$

در این رابطه M_1 و C_1 به ترتیب نشان‌دهنده غلظت عنصر مورد بررسی و غلظت عنصر مرجع (Al) در نمونه مورد بررسی و M_2 و C_2 به ترتیب نشان‌دهنده غلظت عنصر مورد بررسی و غلظت عنصر مرجع (Al) در نمونه مرجع (ترکیب میانگین پوسته زمین) هستند. با استفاده از مقادیر ضریب غنی‌شدگی می‌توان شدت غنی‌شدگی نمونه باطله را رده‌بندی کرد: کمتر از ۱ (بدون غنی‌شدگی)، بین ۱ تا ۳ (غنی‌شدگی اندک)، بین ۳ تا ۵ (غنی‌شدگی متوسط)، بین ۵ تا ۱۰ (غنی‌شدگی شدید)، بین ۱۰ تا ۲۵ (غنی‌شدگی خیلی شدید) و بیشتر از ۵۰ (غنی‌شدگی بسیار شدید) (Chen et al., 2007).

بررسی پتانسیل تولید زهاب اسیدی توسط روش‌های

استاتیک

در آزمایش‌های استاتیک، از توازن بین فرایندهای تولید اسید (اکسایش کانی‌های سولفیدی) و فرایندهای خنثی‌سازی اسید (انحلال کربنات‌ها و هوازگی سیلیکات‌ها) برای پیش‌بینی اولیه تولید اسید توسط باطله‌های معدنی استفاده می‌شود (Nugraha et al., 2009; Banerjee, 2013). در این آزمون‌ها، احتمال تولید یا مصرف اسید بدون در نظر گرفتن مؤلفه زمان محاسبه می‌شود. روش‌های تجربی متعددی برای آزمایش‌های استاتیک پیشنهاد شده‌اند. در این پژوهش، از ۳ روش استاتیکی برای بررسی پتانسیل تولید اسید باطله‌های معدن زغال‌سنگ تخت استفاده شد که عبارتند از:

الف) اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی گل اشباع:

۱۰ گرم باطله پودر شده (عبور کرده از الک ۶۰ مش) با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شده و گل اشباع تهیه شد. پس از گذشت ۱۲ ساعت مقدار pH و هدایت الکتریکی توسط الکتروود pH و EC اندازه‌گیری شد (Lawrence and Wang, 1996).

ب) آزمایش‌های استاتیکی محاسبه اسید-باز (تصحیح‌شده): آزمون‌های ABA شامل سه مرحله است و در آنها توازن بین فرایندهای تولید و خنثی‌شدن اسید (به ترتیب توسط اکسایش کانی‌های سولفیدی و انحلال کربنات‌ها و سیلیکات‌ها) برآورد می‌شود. در مرحله اول، بیشینه پتانسیل تولید اسید، با در نظر گرفتن مقدار گوگرد کل نمونه و تبدیل آن به کیلوگرم اسید سولفوریک در هر تن باطله محاسبه می‌شود و یا درصد وزنی گوگرد به مقدار کربنات کلسیم موجود در هر تن باطله که برای خنثی کردن اسید لازم است، تبدیل می‌شود تا مقدار پتانسیل تولید اسید، AP به دست آید:

$$\text{MPA} = \text{wt.} \% S \times 30.625 \quad \text{معادله ۳:}$$

$$\text{AP} = \text{wt.} \% S \times 31.25 \quad \text{معادله ۴:}$$

در مرحله دوم، مقدار اسیدی که نمونه می‌تواند خنثی کند، توسط تیتراسیون برگشتی محاسبه می‌شود. به این منظور، آزمایش ظرفیت

در این رابطه، V برابر با حجم اسید سولفوریک (برحسب میلی‌لیتر) و W برابر با وزن نمونه (برحسب گرم) است. اگر نسبت ANC/MPA کمتر از یک باشد، ظرفیت تولید اسید بیشتر از خنثی‌سازی اسید خواهد بود و باطله زهاب اسیدی تولید می‌کند و یا احتمال تولید زهاب اسیدی زیاد است؛ اما اگر نسبت ANC/MPA بیشتر از یک باشد، باطله هیچ‌گونه زهاب اسیدی را تولید نمی‌کند (Lawrence and Wang, 1996).

پیش از انجام آزمون NP، ابتدا آزمون فیز (جدول ۱) انجام شد تا حجم (V) و نرمالیت (N) اسید و باز مورد استفاده در آزمایش مشخص شود. فیز صدایی است که در اثر اضافه کردن اسید به نمونه شنیده می‌شود.

خنثی‌سازی اسید و آزمایش پتانسیل خنثی‌سازی انجام می‌شود. برای انجام آزمون ظرفیت خنثی‌سازی اسید، به ۱۰ گرم نمونه عبور کرده از الک ۴۰۰ مش، ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد و نمونه به مدت ۱۵ دقیقه روی شیکر قرارداداده شد و سپس pH ثبت شد. سپس نمونه با اسیدسولفوریک ۱ نرمال تیترا شد تا به pH به ۳/۵ برسد. ظرفیت خنثی‌سازی از معادله ۵ به دست می‌آید و واحد آن کیلوگرم سولفوریک به ازای یک تن باطله است. در این تخمین مقدار اسیدی که توسط نمونه می‌تواند خنثی یا مصرف شود، به دست می‌آید (Lawrence and Wang, 1996):

$$\text{ANC (Kg } H_2SO_4 t^{-1}) = \frac{V(ml) \times 0.049 \times 1000}{W(g)}$$

معادله ۵:

جدول ۱. حجم و نرمالیت اسید کلریدریک مورد استفاده بر اساس آزمایش فیز (Banerjee, 2013) در نمونه‌های باطله معدن تخت

Table 1. The volume and normality of applied hydrochloric acid based on the Fizz test (Banerjee, 2013) in spoil samples of the Takht Mine

Volume (ml)	Normality	Fizz test result
20	0.2	No
40	0.2	Slight
40	0.5	Moderate
80	0.5	Strong

رسید، آن را تکان داده تا واکنش کامل شود (هیچ جبابی از آن خارج نشود). سپس ۱۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر به نمونه اضافه شد و به مدت یک دقیقه محلول جوشانده شد. پس از آن اجازه داده شد تا نمونه به اندازه دمای اتاق سرد شود. در این حالت درب نمونه‌ها باید بسته باشد. در مرحله بعد، نمونه با هیدروکسید سدیم مطابق با نرمالیت اسید مصرف‌شده تیترا شد تا pH به ۷ برسد و برای دست کم ۳۰ ثانیه ثابت بماند. اگر هیدروکسید سدیم استفاده شده برای رسیدن pH به ۷ کمتر از ۳ میلی‌لیتر باشد، اسید اضافه شده در مرحله قبلی کافی نبوده و آزمایش با استفاده از آزمایش فیز تکرار می‌شود. پتانسیل خنثی‌سازی (NP) از معادله زیر به دست می‌آید و

برای انجام این آزمایش، ۰/۵ گرم نمونه عبور کرده از الک ۱۸ مش در بشر ۱۰۰ میلی‌لیتری ریخته‌شد و چند قطره اسید کلریدریک ۲۵ درصد به آن اضافه شد. بر اساس صدایی که شنیده می‌شود، نتیجه آزمایش نیز به هیچ، ضعیف، متوسط و قوی (جدول ۱) تقسیم می‌شود (Hajizadeh Namaghi and Li, 2016) و بر این اساس حجم و نرمالیت اسید و نرمالیت باز مورد استفاده در آزمایش تعیین می‌شود. پس از انجام آزمایش فیز، ۲ گرم نمونه عبور کرده از الک ۶۰ مش در یک ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته‌شد و در ابتدا ۲۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال به آن اضافه‌شد. سپس ارلن را روی هیترا گذاشته وقتی به نقطه جوش

واحد آن کیلوگرم کربنات کلسیم به ازای یک تن باطله است:

معادله ۶:

$$NP \text{ (Kg CaCO}_3\text{t}^{-1}) = [(N \times V \text{ (ml) of HCl)} - (N \times V \text{ (ml) of NaOH})] \times 50 / W \text{ (g)}$$

در این رابطه، N برابر با نرمالیه اسید یا باز، V برابر با حجم نمونه (برحسب میلی‌لیتر) و W برابر با وزن نمونه (برحسب گرم) است. در این تخمین، مقدار کربنات کلسیمی که برای خنثی کردن اسید لازم است، به دست می‌آید.

در مرحله سوم، با استفاده از داده‌های مرحله‌های اول و دوم، پتانسیل تولید اسید خالص و یا پتانسیل خنثی‌سازی خالص محاسبه می‌شود:

معادله ۷:

$$NNP \text{ (Kg CaCO}_3\text{t}^{-1}) = NP \text{ (Kg CaCO}_3\text{t}^{-1}) - AP \text{ (Kg CaCO}_3\text{t}^{-1})$$

معادله ۸:

$$NAPP \text{ (Kg H}_2\text{SO}_4\text{t}^{-1}) = MPA \text{ (Kg H}_2\text{SO}_4\text{t}^{-1}) - ANC \text{ (Kg H}_2\text{SO}_4\text{t}^{-1})$$

با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان $20 \pm$ ، NNP بیشتر از $20+$ نشان‌دهنده عدم احتمال تولید اسید و NNP کمتر از $20-$ نشان‌دهنده احتمال تولید اسید است. مقادیر بین $20-$ و $20+$ عدم قطعیت در تولید اسید را نشان می‌دهد. همچنین نسبت $NP/AP > 1$ عدم احتمال تولید اسید، و $NP/AP < 1$ احتمال تولید اسید را نشان می‌دهد. اگر NAPP مثبت به دست آید (به عبارت دیگر، $ANC/MPA < 1$)، نمونه دارای پتانسیل تولید اسید است؛ اما اگر NAPP منفی باشد (به عبارت دیگر $ANC/MPA > 1$)، نمونه فاقد پتانسیل تولید اسید است.

ج) آزمایش تشکیل اسید خالص و آزمایش پتانسیل اسید خالص:

از این آزمون‌ها برای ارزیابی پتانسیل تولید اسید یک نمونه استفاده می‌شود. در این آزمایش‌ها، نمونه با پراکسید هیدروژن واکنش داده می‌شود. در زمان انجام آزمایش تشکیل اسید خالص، واکنش تولید اسید و خنثی‌سازی اسید می‌تواند به‌طور هم‌زمان رخ دهد. بنابراین، نتیجه نهایی نشان‌دهنده مقدار اسید خالص تولید شده

توسط نمونه است. برای انجام آزمون تشکیل اسید خالص، $2/5$ گرم نمونه عبور کرده از الک 200 مش در بشر 500 میلی‌لیتری ریخته‌شد و 250 میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن 15 درصد به نمونه اضافه و در بشر پوشانده شد. پس از 24 ساعت، نمونه‌ها به مدت 2 ساعت در داخل حمام آب در دمای 70 درجه قرار گرفتند. پس از سرد شدن نمونه‌ها در دمای اتاق، 250 میلی‌لیتر آب مقطر به نمونه‌ها اضافه شد و pH اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها فیلتر شدند و محلول به دست آمده با سدیم هیدروکسید تیترا شد تا pH آن به 7 برسد. اگر pH اولیه کمتر از $2/5$ باشد، نمونه با سدیم هیدروکسید $0/5$ مولار و اگر بیشتر باشد با سدیم هیدروکسید $0/1$ مولار تیترا می‌شود. ماده جامد به دست آمده از فیلتراسیون پس از خشک شدن وزن می‌شود. $pH \geq 4.5$ NAG و NAPP منفی نشان‌دهنده عدم تشکیل اسید توسط نمونه است. نمونه‌ای دارای پتانسیل تشکیل اسید است که پتانسیل تولید اسید آن بیشتر از خنثی‌سازی اسید باشد. در صورتی که NAPP مثبت و $pH > 4.5$ NAG و یا وقتی که NAPP منفی و $pH < 4.5$ NAG باشد، نمونه در رده نامشخص قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

غلظت عناصر اصلی و جزئی در نمونه‌های باطله

حضور عناصر اصلی و جزئی در باطله‌های زغال‌سنگ، یکی از عوامل مهمی است که به بروز اثرهای زیست‌محیطی منفی استخراج زغال‌سنگ منجر می‌شود و از این رو، بررسی غلظت و شدت غنی‌شدگی این عناصر در باطله‌ها اهمیت زیادی دارد. در جدول ۲، نتایج آنالیز XRF بر روی نمونه‌های برداشت‌شده از باطله‌های معدن زغال‌سنگ تخت ارائه شده است. با توجه به جدول ۲، اکسیدهای سیلیسیم (SiO_2) و آلومینیم (Al_2O_3) به ترتیب با میانگین $36/1$ و $11/9$ درصد، دارای بیشترین غلظت در نمونه‌ها هستند. غلظت اکسیدهای اصلی در نمونه‌های مورد بررسی به شکل زیر کاهش می‌یابد (مقادیر برحسب درصد):

ترکیب متوسط پوسته قاره‌ای (Mason and Moore, 1982) نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، عناصر Sb, Pb, As, Cu, Mo, Zn نسبت به مقادیر متوسط پوسته‌ای (کلارک) غنی‌شدگی نشان می‌دهند. غنی‌شدگی زغال‌سنگ و باطله‌های ناشی از استخراج آن از عناصر جزئی سمی، احتمالاً به دلیل وجود کانی‌های سولفاتی، سولفیدی (به ویژه کالکوپیریت، پیریت، گالن، و اسفالریت)، کربناتی، و سیلیکاتی (مانند رس‌ها) است (Lottermoser, 2010).

$SiO_2 (36/1) > Al_2O_3 (11/9) > Fe_2O_3 (5/9) > K_2O (3/7) > MgO (1/5) > TiO_2 (1) > CaO (0/9) > S (0/4) > P_2O_5 (0/2) > Na_2O (0/1)$
عناصر Si و Al در کانی‌هایی نظیر کوارتز، مسکویت و کانی‌های رسی حضور دارند. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار گوگرد نمونه‌ها بین 0/2 درصد (در نمونه 6) تا 0/8 درصد (در نمونه 1) متغیر است. جدول 3، غلظت عناصر جزئی را در نمونه‌های باطله معدن زغال‌سنگ تخت در مقایسه با مقادیر متوسط عناصر در

جدول 2. غلظت اکسیدهای اصلی و گوگرد (بر حسب درصد) در نمونه‌های باطله معدن تخت

Table 2. The concentration of major oxides and sulfur (%) in the spoil samples of the Thakt Mine

Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	L.O.I
1	49.2	1.2	15.4	8.1	2.3	0.9	0.1	5.5	0.1	0.8	15.9
2	28.1	0.9	8.7	5.1	1.0	0.9	0.1	2.9	0.2	0.7	48.9
3	26.5	1.0	11.4	4.7	1.0	0.9	0.1	3.7	0.4	0.3	47.6
4	42.6	1.0	14.8	5.6	1.9	0.7	0.1	4.3	0.3	0.5	27.0
5	39.0	0.9	9.5	4.4	1.0	0.8	0.1	2.7	0.1	0.4	39.2
6	30.6	0.9	11.3	7.3	1.8	1.4	0.1	3.4	0.2	0.2	41.1
Min	26.5	0.9	8.7	4.4	1.0	0.7	0.1	2.7	0.1	0.2	15.9
Max	49.2	1.2	15.4	8.1	2.3	1.4	0.1	5.5	0.4	0.8	48.9
Average	36	1.0	11.9	5.9	1.5	0.9	0.1	3.7	0.2	0.4	36.6

جدول 3. غلظت عناصر اصلی و جزئی در نمونه‌های باطله معدن تخت در مقایسه با متوسط غلظت عناصر در پوسته زمین (مقادیر بر حسب mg/kg)

Table 3. The concentration of major and trace elements in the spoil samples of Takht Mine in comparison with the average concentration of elements in the Earth's crust (values in mg/kg)

Sample	Fe	Mn	Ni	Zn	Sb	Pb	Mo	Cu	Cd	As
1	28326	486	77	78	1.1	17	3.6	59	0.2	27.4
2	28616	290	80	122	1.1	33	4.0	102	0.2	18.8
3	28579	347	80	109	0.9	16	2.2	64	0.3	13.3
4	22954	402	50	53	1.0	424	6.7	235	0.2	21.3
5	38728	687	72	92	1.0	15	2.2	59	0.2	10.1
6	36552	624	70	105	1.0	21	0.6	63	0.2	12.8
Average	30361	472.6	71.5	93.1	1.0	87.6	3.2	97	0.2	17.2
Clark (Mason and Moore, 1982)	50000	950	75	70	0.2	15	1.5	55	0.2	1.5

زیرا این عناصر می‌توانند در ساختار کانی‌های سولفیدی بیان‌شده، به صورت جایگزینی یونی حضور داشته باشند (Lottermoser, 2010). نتایج بررسی میکروسکوپی و آنالیز FESEM، درستی این موضوع را تأیید می‌کند. با توجه به غلظت زیاد عناصر جزئی در نمونه‌های باطله، در صورت تولید زهاب اسیدی توسط باطله‌های معدن تخت، این عناصر وارد منابع آب سطحی، زیرزمینی و خاک منطقه شده و باعث آلودگی محیط زیست می‌شوند.

در جدول ۴، مقادیر ضریب غنی‌شدگی عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های باطله معدن تخت ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، باطله‌های معدن تخت نسبت به عناصر Mn، Fe، Ni، Zn بدون غنی‌شدگی، نسبت به عناصر Cu و Cd دارای غنی‌شدگی اندک، نسبت به Mo دارای غنی‌شدگی متوسط، نسبت به Pb و Sb دارای غنی‌شدگی نسبتاً شدید و نسبت به عنصر As دارای غنی‌شدگی شدید هستند. دلیل غنی‌شدگی باطله‌ها نسبت به عناصر Mo، Pb، Sb، As حضور کانی‌های پیریت، آرسنوپیریت، کالکوپیریت، مارکازیت، اسفالریت و گالن است؛

جدول ۴. ضریب غنی‌شدگی عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های باطله معدن تخت

Table 4. Enrichment factor of potentially toxic elements in spoil samples of the Takht Mine

Sample	Zn	Sb	Pb	Ni	Mo	Mn	Fe	Cu	Cd	As
1	0.2	6.7	1.5	1.1	4.1	0.5	0.6	1.2	1.6	31.5
2	0.2	4.7	2.0	0.8	3.2	0.2	0.4	1.5	1.2	15.4
3	0.1	5.0	1.2	1.1	2.2	0.3	0.5	1.1	1.5	13.5
4	0.6	7.2	45.7	0.9	9.3	0.6	0.6	5.9	1.6	29.8
5	0.1	5.2	1.1	0.9	2.1	0.5	0.7	1.0	1.0	9.8
6	0.2	4.6	1.4	0.8	0.5	0.5	0.6	1.0	1.2	11.6
Average	0.2	5.6	8.8	0.9	3.6	0.4	0.6	2.0	1.3	18.6

بررسی‌های بافتی و کانی‌شناسی

کانی‌های سولفیدی اصلی تشخیص داده شده توسط بررسی مقاطع صیقلی با میکروسکوپ نوری انعکاسی، شامل پیریت و کالکوپیریت است (شکل ۲-A تا D). در نمونه‌های مورد بررسی، پیریت به صورت فرامبوئیدی و همچنین ذرات نیمه‌شکل‌دار و بی‌شکل مشاهده می‌شود. اندازه ذرات پیریت و شکل‌های مختلف آن بر نرخ واکنش‌پذیری و اکسایش این کانی تأثیر بسیار مهمی دارد. هرچه ذرات پیریت کوچک‌تر باشند، مساحت سطحی بیشتری داشته و در نتیجه، واکنش‌پذیری و شدت اکسایش آنها افزایش می‌یابد. پیریت‌های فرامبوئیدی شامل بلورهای ریزدانه با اندازه کمتر از یک میکرومتر بوده که کنار یکدیگر تشکیل یک

همچنین نسبت NAG/NAPP کمتر از ۰/۵ نشان‌دهنده حضور گوگرد غیر سولفیدی (سولفات‌های اولیه، گوگرد آلی، گوگرد عنصری) در نمونه و کم‌بودن احتمال تولید زهاب اسیدی است. آزمایش پتانسیل اسید خالص شبیه به آزمایش تشکیل اسید خالص است؛ با این تفاوت که در این آزمایش از پراکسید هیدروژن غلیظ استفاده می‌شود و سپس محلول تیترو می‌شود:

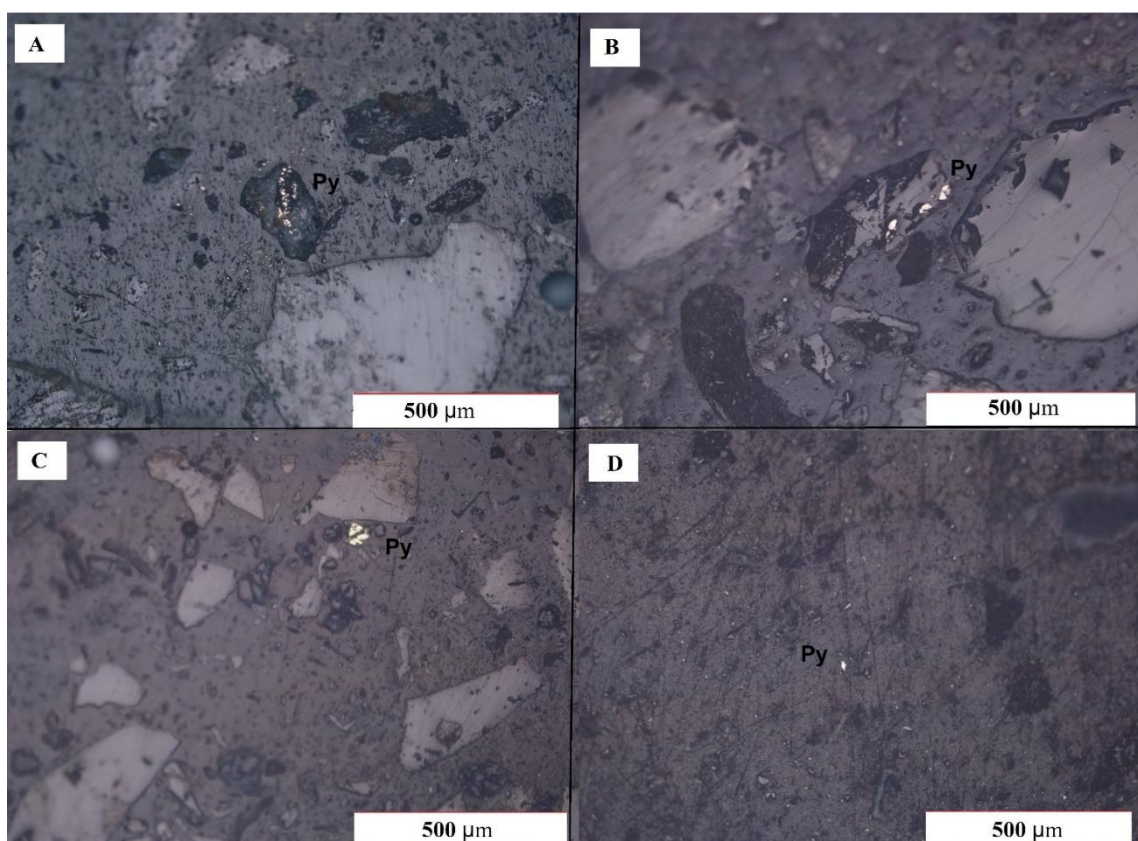
معادله ۹:

$$\text{NAP} (\text{KgCaCO}_3\text{t}^{-1}) = \frac{50ab}{c}$$

در این رابطه، a برابر با نرمالیت سدیم هیدروکسید، b برابر با حجم سدیم هیدروکسید بر حسب میلی‌لیتر و c برابر وزن نمونه بر حسب گرم است.

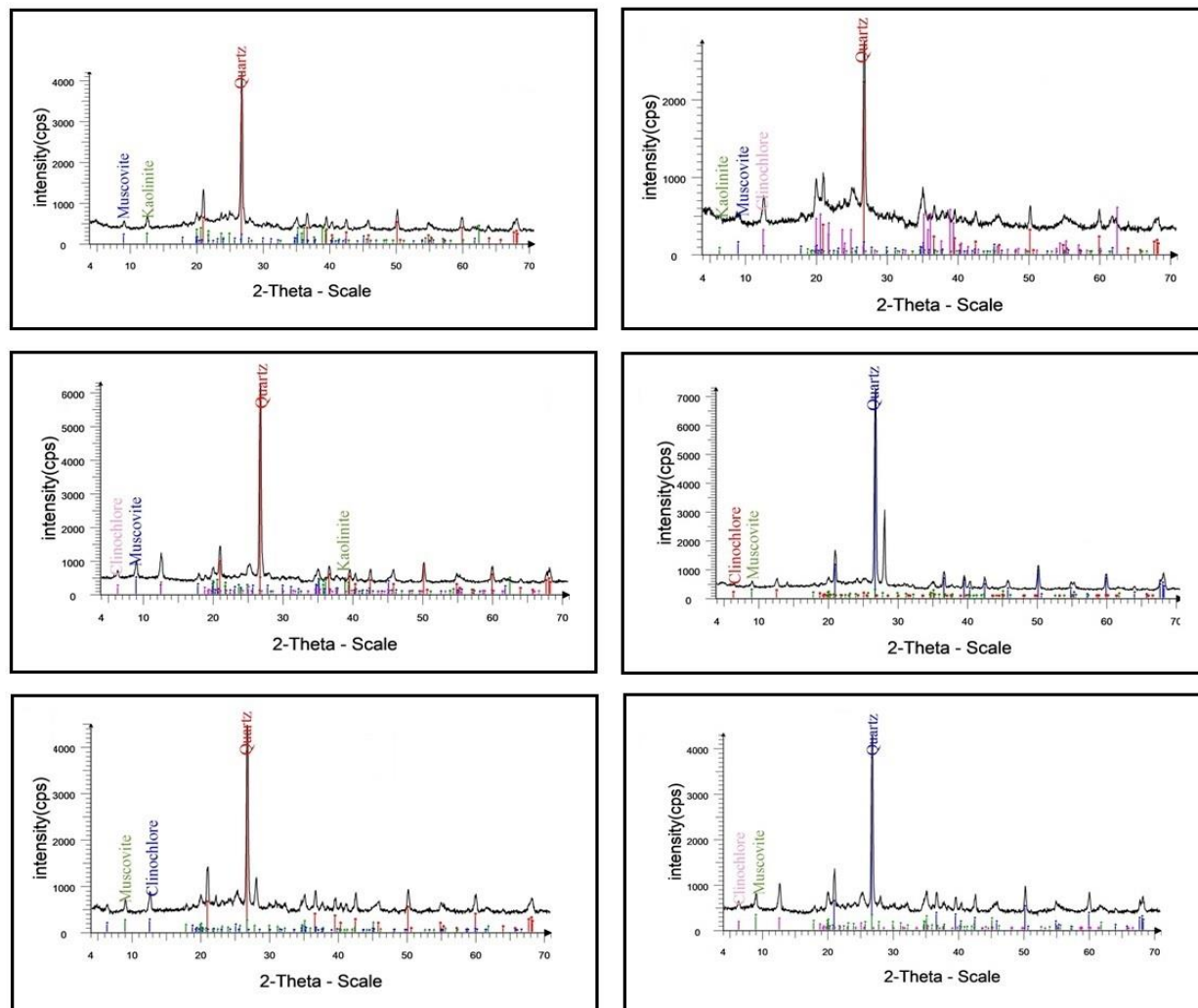
بر اساس نتایج XRD (شکل ۳)، کانی‌های موجود در ۶ نمونه باطله معدن تخت شامل کوارتز (SiO_2)، مسکویت ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$)، کائولینیت ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) و کلینوکلر ($(\text{Mg}_5\text{Al})(\text{Si}_2\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{10}$) است. به طور کلی، کانی‌های سیلیکاتی (در درازمدت) می‌توانند در خنثی‌سازی اسیدهای تولید شده در اثر اکسایش پیریت نقش داشته باشند؛ زیرا هوازگی شیمیایی کانی‌های سیلیکاتی با مصرف یون‌های هیدروژن و یا تولید بی‌کربنات‌ها همراه است (Lottermoser, 2010). برای مثال، کائولینیت یک کانی رسی ثانویه است و احتمالاً از هوازگی پتاسیم فلدسپار ناشی می‌شود.

توده کروی شکل را می‌دهند که اندازه آن گاهی تا چند ده میکرون می‌رسد. پیریت‌های فرامبوئیدی به دلیل مورفولوژی خاص خود از دیگر شکل‌های پیریت (شکل دار، درشت‌دانه، بی‌شکل) واکنش‌پذیرترند؛ زیرا مساحت سطحی این ذرات زیاد است و همچنین وجود تخلخل بین آنها سرعت اکسایش را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، حضور عناصر جزئی مانند آرسنیک در کانی‌های سولفیدی به ویژه پیریت، نرخ تولید زهاب اسیدی را افزایش می‌دهد؛ زیرا وجود ناخالصی‌های عنصری در ساختار سولفیدها، باعث کاهش مقاومت این کانی‌ها در برابر اکسایش می‌شود (Lottermoser, 2010).



شکل ۲. تصویرهای مقاطع میکروسکوپی صیقلی پیریت‌های موجود در نمونه‌های باطله معدن تخت. A: پیریت نیمه‌شکل دار نمونه ۲، B: پیریت فرامبوئیدی نمونه ۱، C: پیریت نیمه‌شکل دار نمونه ۶ و D: پیریت نیمه‌شکل دار نمونه ۵

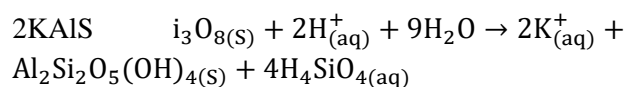
Fig. 2. The microphotographs of polished sections of pyrites in spoil samples of the Takht Mine. A: semi-idiomorphic pyrite in sample 2, B: framboidal pyrite in sample 1, C: semi-idiomorphic pyrite in sample 6, and D: semi-idiomorphic pyrite in sample 5.



شکل ۳. تصویرهای پراش پرتو ایکس در ۶ نمونه باطله معرف معدن تخت

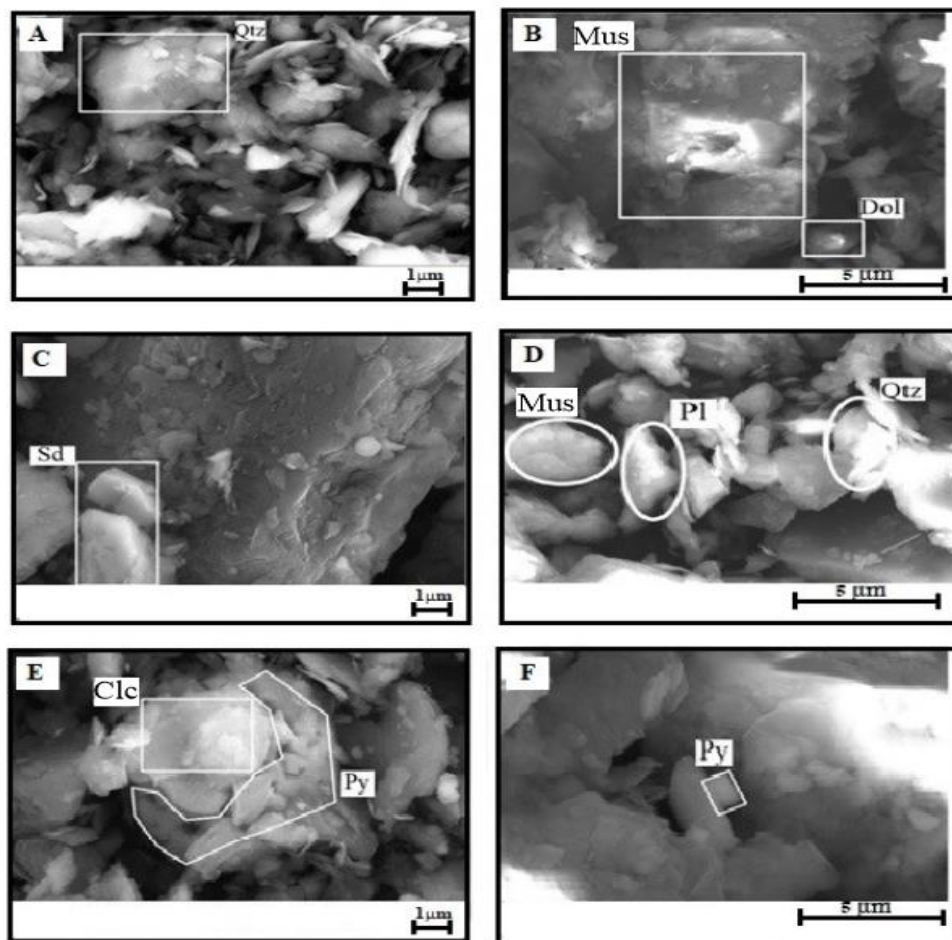
Fig. 3. The X-ray diffraction images of 6 representative spoil samples of the Takht Mine

معادله ۱۰:



(شکل ۴-ب)، کانی های کربناتی (دولومیت و سیدریت) (شکل ۴-ع)، پلاژیوکلاز (شکل ۴-د) و سولفیدها (پیریت) (شکل ۴-ا) و (F) است. کانی دولومیت یکی از کانی های کربناتی است که توانایی خنثی سازی اسید را در نمونه ها دارد Y زیرا واکنش این کانی با یون های هیدروژن باعث تولید یون های بی کربنات شده و از این طریق از تشکیل اسید جلوگیری می شود (Lottermoser, 2010).

نتایج حاصل از آنالیز SEM و آنالیز EDX نمونه های باطله معدن زغال سنگ تخت بر روی ۶ نمونه معرف به ترتیب در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است. بررسی تصویرهای SEM و نمودارهای EDX نشان می دهد که نمونه های مورد بررسی شامل کانی های کوارتز (شکل ۴-ا)، فیلسیلیکات ها (مسکویت)



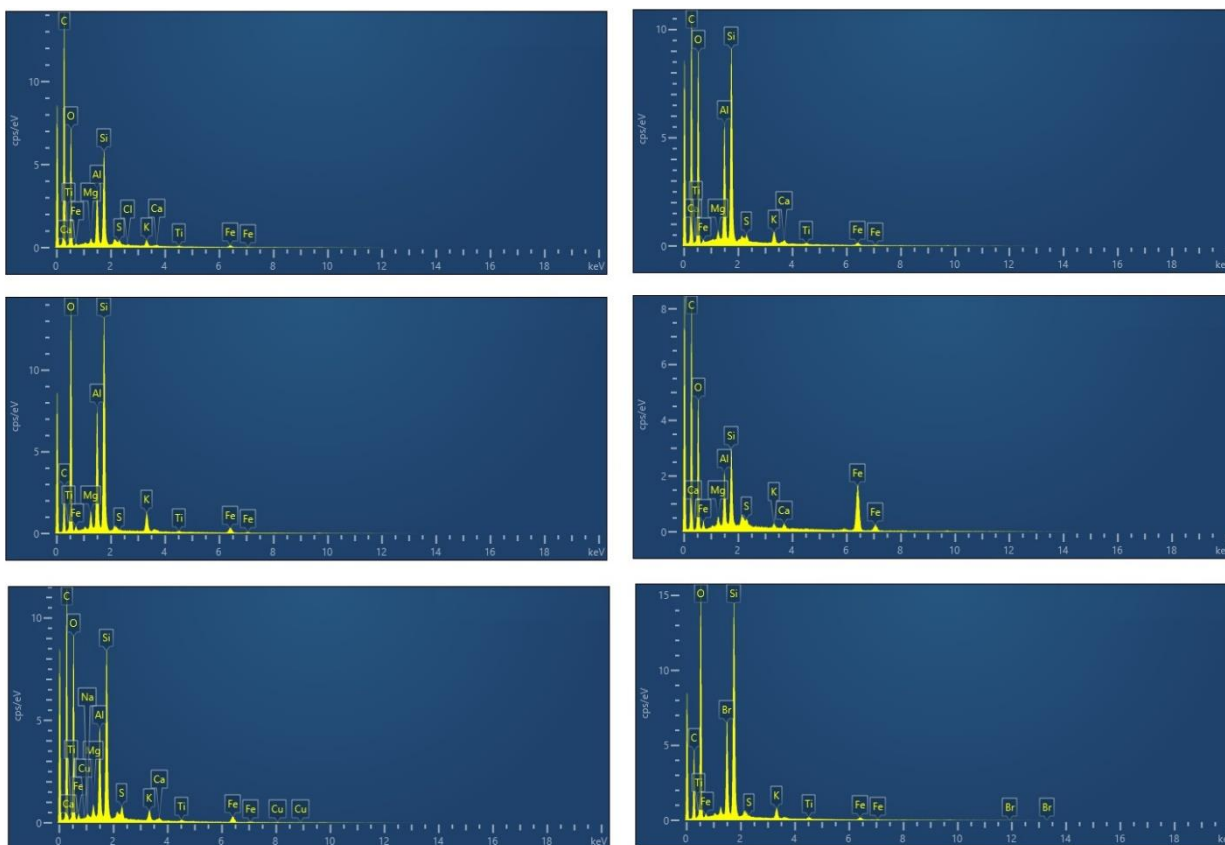
شکل ۴. تصاویرهای SEM از کانی‌های موجود در نمونه‌های باطله معدن تخت. A: کوارتز در نمونه شماره ۶، B: مسکویت و دولومیت در نمونه شماره ۵، C: سیدریت در نمونه شماره ۴، D: پلاژیوکلاز، مسکویت، و کوارتز در نمونه شماره ۱، E: پیریت در نمونه شماره ۵ و F: پیریت و کلینوکلر در نمونه شماره ۲. علائم اختصاری از ویتهی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qtz: کوارتز، Mus: مسکویت، Dol: دولومیت، Sd: سیدریت، Pl: پلاژیوکلاز، Clc: کلینوکلر، Py: پیریت).

Fig. 4. The SEM images of minerals present in Takht Mine spoils. A: Quartz in sample No. 6, B: Muscovite and dolomite in sample No. 5, C: Siderite in sample No. 4, D: Plagioclase, muscovite, and quartz in sample No. 1, E: Pyrite in sample No. 5, and F: Pyrite and clinoclchlore in sample No. 2. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Qtz: quartz, Mus: muscovite, Dol: dolomite, Sd: siderite, Pl: plagioclase, Clc: clinoclchlore, Py: pyrite).

است، در اثر کاهش pH افزایش می‌یابد (Balci and Demirel, 2018). نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری pH و EC گل اشباع در جدول ۵ آمده است. همه نمونه‌های مورد بررسی دارای pH کمتر از ۵/۵ هستند و هدایت الکتریکی آنها کمتر از $2000 \mu\text{s}/\text{cm}$ است. بنابراین بر مبنای آزمایش pH و EC گل

ارزیابی پتانسیل تولید اسید توسط روش‌های استاتیک بررسی پتانسیل تولید زهاب اسیدی باطله‌ها با استفاده از pH و EC گل اشباع کمتر بودن pH گل اشباع کمتر از ۵/۵، نخستین علامت برای احتمال تشکیل زهاب اسیدی است. هدایت الکتریکی نمونه‌ها که تحت تأثیر حضور کاتیون‌ها و آنیون‌ها و فرایند انحلال و شست‌وشو

اشباع، نمونه ها مشکوک به تولید زهاب هستند. با انجام سایر آزمون های استاتیک، احتمال یا عدم احتمال تشکیل اسید به صورت قطعی تر مشخص می شود.



شکل ۵. طیف های EDX نمونه های باطله معدن تخت

Fig. 5. The EDX spectra of the Takht Mine spoils

جدول ۵. pH و هدایت الکتریکی (EC) گل اشباع در نمونه های باطله معدن تخت

Table 5. pH and electrical conductivity (EC) of saturated paste extracts of spoil samples of the Takht Mine

Sample	pH	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
1	4.9	1623
2	5.2	1786
3	4.8	1736
4	5.1	1618
5	5.4	1713
6	5.2	1592

بر اساس نتایج آزمون ABA اصلاح شده (جدول ۶ و جدول ۷)، مقدار NAPP همه نمونه ها مثبت و مقدار NNP همه نمونه ها کمتر از ۲۰- است. بنابراین تمامی نمونه های مورد بررسی دارای پتانسیل تولید اسید هستند.

جدول ۶. نتایج ارزیابی MPA، ANC و NAPP در نمونه های باطله معدن تخت

Table 6. The results of MPA, ANC, and NAPP evaluations in spoil samples of the Takht Mine

Sample	NAPP (Kg H ₂ SO ₄ t ⁻¹)	ANC (Kg H ₂ SO ₄ t ⁻¹)	MPA (Kg H ₂ SO ₄ t ⁻¹)
1	21.9	2.4	24.4
2	19.9	1.4	21.4
3	8.1	0.9	9.1
4	12.8	2.4	15.3
5	10.2	1.9	12.2
6	4.6	1.4	6.1

نتایج به دست آمده از محاسبه NP و AP (جدول ۷) نشان می دهد که نسبت NP/AP (که با نسبت پتانسیل خنثی سازی نشان داده می شود) در تمام نمونه ها کمتر از یک است، در نتیجه تمامی نمونه ها پتانسیل تولید اسید را دارند. بیشترین پتانسیل تولید اسید متعلق به نمونه شماره ۱ (۲۵) است. این نمونه بیشترین مقدار گوگرد را در بین نمونه ها دارد. همچنین کمترین مقدار NP پتانسیل خنثی سازی مربوط به نمونه شماره ۲ (۵۵/۵) است.

جدول ۷. نتایج آزمایش های استاتیکی ABA باطله های معدن تخت

Table 7. The results of ABA static tests of the Takht Mine spoils

Sample	NP (kgCaCO ₃ t ⁻¹)	NNP (kgCaCO ₃ t ⁻¹)	AP (kgCaCO ₃ t ⁻¹)	NPR= NP/AP	ANC/MPA
1	-45.5	-70.5	25.0	-1.8	0.1
2	-55.5	-77.3	21.8	-2.5	0.1
3	-54.2	-63.5	9.3	-5.8	0.1
4	-40.5	-56.1	15.6	-2.5	0.1
5	-35.5	-48.0	12.5	-2.8	0.1
6	-24.5	-30.4	6.2	-3.9	0.1

نتایج آزمایش NAG (جدول ۸) نشان می دهد که در باطله های شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ که NAPP مثبت دارند، pH < 4.5 NAG و NAG > 5 است. به همین دلیل این باطله ها در رده PAF-HC (تولید کننده بالقوه اسید و ظرفیت بالا) قرار می گیرند. به عبارت

دیگر، ظرفیت تولید اسید این باطله‌ها بیشتر از ظرفیت خنثی سازی اسید آنهاسست و بنابراین این نمونه‌ها، دارای پتانسیل تولید اسید هستند. در نمونه‌های شماره ۵ و ۶ NAPP مثبت و NAG $\text{pH} \geq 4.5$ است و این نمونه‌ها در رده نامشخص قرار می‌گیرند. چنان‌که بیان شد، نمونه ۱ بیشترین درصد گوگرد را بین سایر نمونه‌ها دارد. حضور شکل‌های دانه‌ریز و فرامبوئیدی پیریت در این نمونه و حضور عناصر جزئی مانند آرسنیک در آن، باعث افزایش سرعت واکنش پذیری آن می‌شود.

جدول ۸. نتایج آزمون تشکیل اسید خالص (NAG) توسط باطله‌های معدن تخت

Table 8. The results of the Net Acid Generation (NAG) test by the Takht Mine spoils

sample	NAG pH	Molarity Base	Volume Base (ml)	NAG (Kg $\text{H}_2\text{SO}_4\text{t}^{-1}$)	NAG/NAPP
1	3.6	0.1	7.5	14.7	0.7
2	3.0	0.1	23.5	46.0	2.3
3	3.2	0.1	12.5	24.5	3.2
4	3.3	0.1	12.0	23.5	1.8
5	5.6	0.1	3.0	5.8	0.6
6	4.8	0.1	3.3	6.4	1.3

اساس جدول ۹، باطله‌های شماره ۲ و ۵ دارای بیشترین NAP هستند. احتمالاً این نمونه‌ها ظرفیت خنثی سازی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند که ناشی از حضور کانی‌های کربناتی در آنهاست.

با توجه به جدول ۸، در تمام نمونه‌ها نسبت NAG/NAPP بیشتر از ۰/۵ است، بنابراین احتمال تولید زهاب اسیدی در این نمونه‌ها وجود دارد. به طور کلی، نتایج آزمون NAG با نتایج آزمون ABA تطابق دارد: آزمون ABA نشان داد که مقدار NNP نمونه‌ها کمتر از ۲۰- و نسبت NPR(NP/AP) کمتر از یک است. بر

جدول ۹. نتایج آزمون تشکیل اسید خالص (NAP) توسط باطله‌های معدن تخت

Table 9. The results of the Net Acid Potential (NAP) test by the Takht Mine spoils

Sample	NAP pH	Volume Base (ml)	Molarity Base	NAP (kg $\text{CaCO}_3\text{t}^{-1}$)
1	3.3	22.4	0.1	22.4
2	2.8	26.3	0.1	26.3
3	3.5	21.5	0.1	21.5
4	2.9	22.2	0.1	22.2
5	3.7	23.6	0.1	23.6
6	3.4	21.7	0.1	21.7

NAG pH در مقابل NPR نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۶-د، نمونه‌های ۵ و ۶ در رده نامشخص قرار دارند؛ زیرا NAG pH آنها بیشتر از ۴/۵ و NPR آنها منفی است. نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در رده تشکیل اسید قرار دارند؛ زیرا در این نمونه‌ها NAG pH کمتر از ۴/۵ است و از سوی دیگر NPR آنها نیز منفی است.

نمودار درصد کل گوگرد و ظرفیت خنثی‌سازی اسید (ANC)

در شکل ۶-ع، NAP مثبت از NAPP منفی جدا می‌شود. از نسبت ANC/MPA به عنوان راهی برای ارزیابی احتمال خطر تولید اسید توسط باطله‌های معدنی استفاده می‌شود. NAPP منفی معادل با نسبت ANC/MPA بزرگ‌تر از یک است و نشان می‌دهد که زهاب اسیدی تولید نمی‌شود.

اگر NAPP مثبت و ANC/MPA کمتر از یک باشد، نمونه‌ها دارای پتانسیل تولید زهاب اسیدی هستند. NAPP صفر معادل با نسبت ANC/MPA برابر یک است. این نسبت معمولاً بین ۱ تا ۳ متغیر است. بر اساس یک قاعده کلی، اگر نسبت ANC/MPA از ۲ بیشتر باشد، به این معناست که به احتمال زیاد، مواد در pH خنثی باقی خواهند ماند (Sanliyuksel Yusel and Baba, 2016).

بر اساس شکل ۶-ع، تمام نمونه‌ها دارای ANC/MPA کمتر از یک و NAPP مثبت هستند. بنابراین تمام نمونه‌ها دارای پتانسیل تولید اسید هستند.

pH گل اشباع و تشکیل اسید خالص (NAG pH)

بر اساس شکل ۶-ف، نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در محدوده تولید اسید متوسط قرار می‌گیرند؛ زیرا NAG pH این نمونه‌ها کمتر از ۴/۵ است. تولید اسید توسط نمونه‌های ۵ و ۶ به دلیل اینکه NAG pH آنها بیشتر از ۴/۵ است، نامشخص است که این نتیجه‌گیری با دیگر نمودارها تطابق دارد.

بررسی پتانسیل تولید زهاب اسیدی با استفاده از نمودارهای زمین‌شیمیایی

نمودار pH گل اشباع و پتانسیل خنثی‌سازی خالص (NNP) بر اساس شکل ۶-ا، NNP نمونه‌های مورد بررسی منفی است؛ اما با توجه به pH گل اشباع، نمونه‌ها در رده نامشخص از لحاظ تولید اسید قرار می‌گیرند. چنان‌که بیان شد، pH گل اشباع فقط یک گام اولیه برای مشخص شدن احتمال تولید اسید است.

نمودار پتانسیل خنثی‌سازی خالص (NNP) و تشکیل اسید خالص (NAG pH)

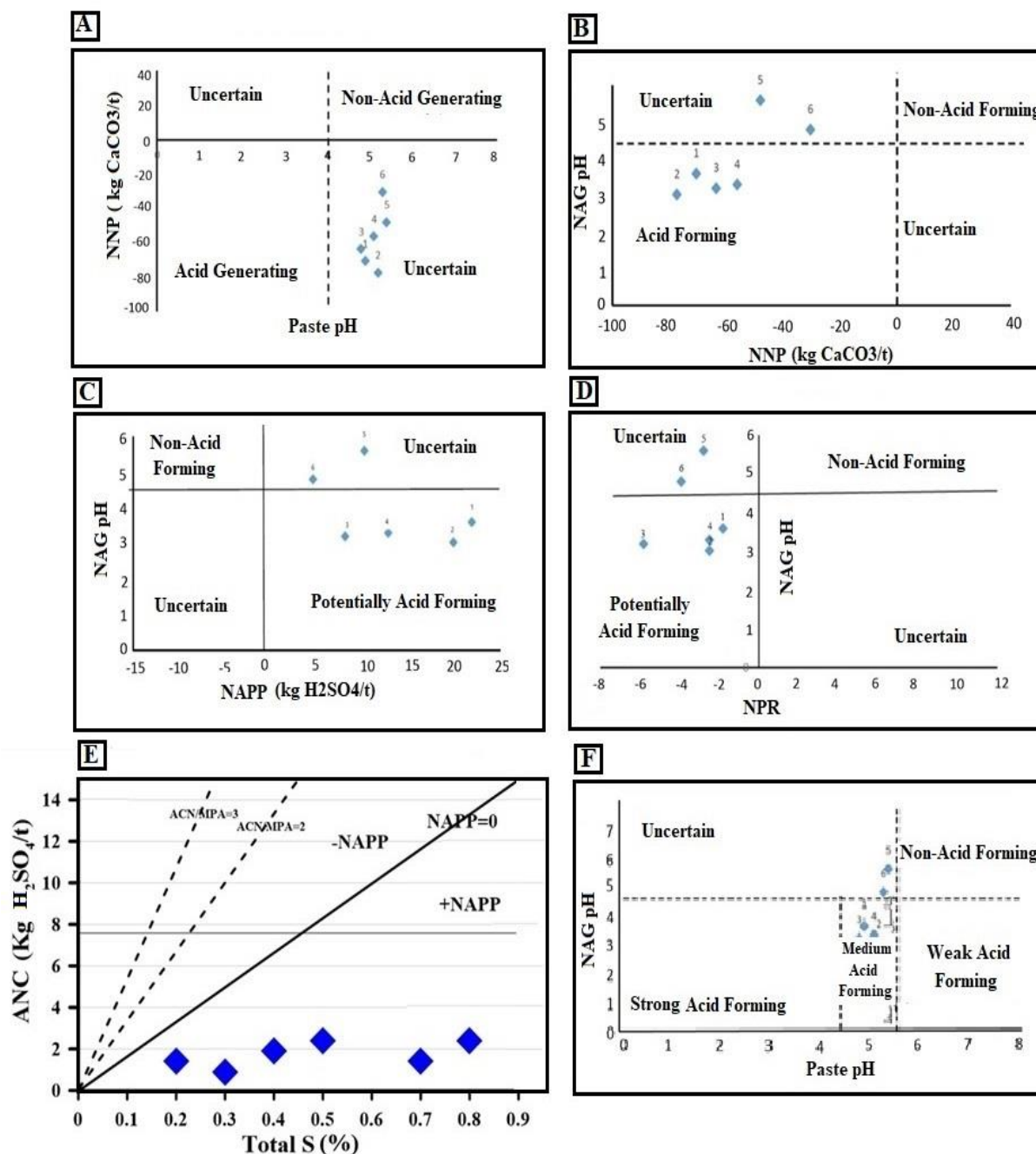
به طور کلی، احتمال تولید اسید در نمونه‌هایی با NNP بیشتر از ۳۰ و NAG pH بیشتر از ۴/۵ کم است؛ اما اگر NAG pH کمتر از ۴/۵ و NNP کمتر از ۲۰- باشد، خطر تولید اسید وجود دارد (Hajizadeh Namaghi and Li, 2016). شکل ۶-ب نشان می‌دهد که نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ دارای $NAG\ pH \leq 4/5$ بوده و NNP آنها کمتر از ۲۰- است. بنابراین این نمونه‌ها دارای پتانسیل تولید اسید هستند. در حالی که نمونه‌های ۵ و ۶ با وجود اینکه NNP آنها کمتر از ۲۰- است؛ اما $NAG\ pH \geq 4/5$ داشته و بنابراین، احتمال تولید اسید در این نمونه‌ها قطعی نیست.

نمودار تولید اسید خالص (NAPP) و تشکیل اسید خالص (NAG-pH)

بر اساس نمودار NAPP در مقابل NAG pH، باطله‌ها در یکی از چند گروه عدم تولید اسید (NAF)، تولید اسید (PAF) و نامشخص (UC) قرار می‌گیرند (Hajizadeh Namaghi and Li, 2016). بر اساس شکل ۶-ج نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در رده PAF (احتمال تشکیل اسید بالقوه) و نمونه‌های ۵ و ۶ در رده UC (نامشخص) قرار می‌گیرند.

نمودار نسبت NPR (NPR=NP/AP) و NAG pH

در شکل ۶-د، موقعیت نمونه‌ها در رده‌بندی زمین‌شیمیایی



شکل ۶. رده‌بندی نمونه‌های باطله معدن تخت بر اساس A: NNP و NAG pH، B: NNP و NAG pH، C: NAPP و NAG pH و NAF: (عدم تشکیل اسید) PAF: (تولید اسید) و UC: (نامشخص یا مشکوک، D: بر اساس نسبت NPR و NAG pH، E: بر اساس درصد کل گوگرد و ANC و F: بر اساس pH گل اشباع و NAG pH (Hajizadeh Namaghi and Li, 2016; Sanliyuksel Yusel and Baba, 2016)

Fig. 6. Classification of the Takht Mine spoil samples based on (A) NNP and NAG pH, (B) NNP and, (C) NAPP and NAG pH, NAF: (No Acid Formation) PAF: (Acid Formation) and UC: (Unknown or Suspect), (D) NPR and NAG pH Ratio, (E) Total Sulfur value and ANC, (F) pH of saturated paste and NAG pH (Hajizadeh Namaghi and Li, 2016; Sanliyuksel Yusel and Baba, 2016)

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که مقدار pH نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در آزمایش تشکیل اسید خالص (NAG pH) کمتر از ۴/۵ است. از سوی دیگر، این نمونه‌ها دارای NAPP مثبت و NPR منفی هستند. در نمونه‌های دستی در تمامی این نمونه‌ها پیریت به صورت دانه‌ریز و دانه‌پراکنده حضور دارد. همچنین با توجه به بررسی میکروسکوپی مقاطع صیقلی در نمونه‌های بیان‌شده کانی پیریت به صورت دانه پراکنده و تجمع‌های فرامبوئیدی مشاهده می‌شود که جزو مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی است که باعث تولید زهاب اسیدی می‌شود. از سوی دیگر، در نمونه‌های شماره ۵ و ۶، NAG pH بیشتر از ۴/۵ است. همچنین pH گل اشباع این نمونه‌ها نزدیک به خنثی است. نمونه شماره ۵ دارای کمترین مقدار گوگرد در بین تمامی نمونه‌هاست. از سوی دیگر، در نمونه‌های شماره ۵ و ۶، در آنالیز پراش پرتو ایکس کانی‌های مسکویت و کوارتز مشاهده شد که وجود آنها در درازمدت می‌تواند مانع تولید اسید و با خنثی کردن اسید تولیدشده شود. نتایج آزمون‌های استاتیک نشان داد که این نمونه‌ها با وجود داشتن منفی و NAPP مثبت، دارای NAG pH بیشتر از ۴/۵ هستند. بنابراین

احتمال تولید اسید در این باطله‌ها نامشخص است. با توجه به غلظت زیاد عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های باطله معدن زغال‌سنگ تخت، در صورت تشکیل زهاب اسیدی، منابع آب سطحی، زیرزمینی و خاک منطقه تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. برای کاهش اثرهای زیست‌محیطی باطله‌های معدن تخت، می‌توان اقداماتی نظیر افزودن آهک به باطله‌ها جهت قلیایی کردن محیط دپوی باطله‌ها، افزودن خاک اره به باطله‌ها، ایجاد کانال‌های زهکشی در زیر بستر دپوها برای انتقال زهاب به حوضچه‌های حاوی مواد آهکی و دپو کردن باطله‌ها دور از مسیر آب‌های سطحی را مدنظر قرار داد.

تعارض و منافع

هیچگونه تعارض منافی توسی نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود به سبب فراهم آوردن امکان انجام این پژوهش ابراز می‌نمایند.

1. Acid Mine Drainage, AMD
2. X-Ray Diffraction, XRD
3. Scanning Electron Microscopy, SEM
4. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX
5. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)
6. X-ray fluorescence, XRF
7. Enrichment Factor, EF
8. Electrical Conductivity, EC
9. Acid-Base Accounting, ABA
10. Maximum Potential Acidity, MPA
11. Acid Potential, AP
12. Acid Neutralizing Capacity, ANC
13. Neutralization Potential, NP
14. Net Acid Producing Potential, NAPP
15. Net Neutralization Potential, NNP
16. Net Acid Generation
17. Net Acid Potential
18. Not Acid Forming
19. Potentially Acid Forming
20. Uncertain
21. Neutralization Potential Ratio, NPR

References

- Abfertiawan, M.S., Palinggi, Y., Handajani, M., Pranoto, K. and Atmaja, A., 2020. Evaluation of Non-Acid-Forming material layering for the prevention of acid mine drainage of pyrite and jarosite. *Heliyon*, 6(11): e05590. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05590>
- Acharya, B.S. and Kharel, G., 2020. Acid Mine Drainage from Coal Mining in the United States – An Overview. *Journal of Hydrology*, 588: 125061. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125061>
- Albert, R.P., Pinto, L.F.S., Miguel, P., Stumpf, L. and Leidemer, J.D., 2022. Acidification potential of geological materials in a coal mining area in southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 120: 104103. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104103>
- Balci, N. and Demirel, C., 2018. Prediction of Acid Mine Drainage (AMD) and Metal Release Sources at the Küre Copper Mine Site, Kastamonu, NW Turkey. *Mine Water and the Environment*, 37: 56-74. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0470-4>
- Banerjee, D., 2013. Acid drainage potential from coal mine wastes environmental assessment through static and kinetic tests. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11: 1365–1378. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0292-2>
- Çelebi, E.E. and Ribeiro, J., 2023. Prediction of acid production potential of self-combusted coal mining wastes from Douro Coalfield (Portugal) with integration of mineralogical and chemical data. *International Journal of Coal Geology*, 265: 104152. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.104152>
- Chen, C.W., Kao, C.M., Chen, C.F. and Dong, C.D., 2007. Distribution and accumulation of heavy metal in the sediments of Kaohsiung. *Chemosphere*, 66 (8): 1431–1440. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.030>
- Elghali, A., Benzaazoua, M., Taha, Y., Amar, H., Ait-khouia, Y. Bouzahzah, H. and Hakkou. R., 2023. Prediction of acid mine drainage: Where we are. *Earth-Science Reviews*, 241: 104421. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104421>
- Hajizadeh Namaghi H. and Li Sh., 2016. Acid-Generating and Leaching Potential of Soils in a Coal Waste Rock Pile in Northeastern China. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 25 (7): 776-791. <https://doi.org/10.1080/15320383.2016.1213701>
- Kavehei, A., Hose, G.C. and Gore, D.B., 2021. History of environmental contamination at Sunny Corner Ag Pb Zn mine, eastern Australia: A meta-analysis approach. *Environmental Pollution*, 273: 115752. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115742>
- Lawrence, R.W. and Wang, Y., 1996. Determination of neutralizing potential for acid rock drainage prediction. Canadian Centre for Mineral and Energy Technology, Ottawa, Canada. MEND/NEDEM Report 1.16.3. Retrived August 20, 2023 from <https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/1.16.3.pdf>
- Lottermoser, B.G., 2010. *Mine Wastes: Characterization, treatment and environmental impacts*, (Third Edition). Springer Heidelberg Dordrecht London New York. 410 pp. Retrived August 28, 2023 from https://www.usb.ac.ir/FileStaff/1623_2019-6-10-1-6-29.pdf
- Mason, B. and Moore, C.B., 1982. *Principles of Geochemistry* (4th ed., 344 p.). New York, John Wiley and Sons. Retrived August 20, 2023 from [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qIt3d2q\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2789297](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qIt3d2q))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2789297)
- Mohanty, A., Lingaswamy, M., Rao, G. and Sankaran, S., 2018. Impact of acid mine drainage and hydrogeochemical studies in a part of Rajrappa coal mining area of Ramgarh District, Jharkhand State of India. *Groundwater for Sustainable Development*, 7: 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.05.005>
- Moyo, A., Parbhakar-Fox, A., Meffre, S. and Cooke, D.R., 2023. Alkaline industrial wastes – Characteristics, environmental risks, and potential for mine waste management. *Environmental Pollution*, 323: 121292. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121292>
- Munksgaard, N.C., Lottermoser, B.G. and Blake, K., 2012. Prolonged testing of metal mobility in mining-impacted soils amended with phosphate fertilisers. *Water, Air, and Soil Pollution*, 223(5): 2237-2255. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-1019-y>

- Nugraha, C., Shimada, H., Sasaoka, T., Ichinose, M., Matsui, K. and Manege, I., 2009. Waste rock characteristics at tropical coal mine area: a case study of PT. Kaltim Prima Coal, Indonesia. *International Journal of JCRM*, 5(2): 77–82. <https://doi.org/10.11187/ijjcrm.5.77>
- Pan, Y., Ye. H., Li, X., Yi, X., Wen, Z., Wang, H., Lu, G. and Dang, G., 2021. Spatial distribution characteristics of the microbial community and multi-phase distribution of toxic metals in the geochemical gradients caused by acid mine drainage, South China. *Science of The Total Environment*, 774: 145660. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145660>
- Rezaie, B. and Anderson, A., 2020. Sustainable resolutions for environmental threat of the acid mine drainage. *Science of The Total Environment*, 717: 137211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137211>
- Sanliyüksel Yucel, D. and Baba A., 2016. Prediction of acid mine drainage generation potential of various lithologies using static tests: Etili coal mine (NW Turkey) as a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188: 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5462-5>
- Tang, H., Lou, J.Zh., Zheng, L., Liu, Ch.Y., Li, H.H., Wu, G.N., Zeng, M.L. and Bai, X.S., 2021. Characteristics of pores in coals exposed to acid mine drainage. *Energy Reports*, 7: 8772–8783. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.055>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. [http://0003-004X/10/0001-185\\$05.00/DOI:10.2138/am.2010.3371](http://0003-004X/10/0001-185$05.00/DOI:10.2138/am.2010.3371)
- Zwahlen, C., Rehn, A., Aiglsperger, Th. and Dold, B., 2023. Geochemical and mineralogical aspects of acid mine drainage associated with 100 years of coal mining in the arctic, Svalbard (78°N). *Journal of Geochemical Exploration*, 252: 107266. <https://doi.org/10.1016/j.jexplo.2023.107266>