



<https://jssr.ui.ac.ir/?lang=en>

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches  
E-ISSN: 2423-8007  
Vol. 39, Issue 1, No. 90, Spring 2023, pp 1-16  
Received: 04.03.2023 Accepted: 24.04.2023

**Research Paper**

**Evaluation of mineralogical changes of sediments affected by Dar-e-Allo copper mine, south of Kerman: application for environmental studies**

**Hoda Bavi**

Ph.D Student at Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
Hoda.Bavi@um.ac.ir

**Reza Moussavi-Harami** 

Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
moussavi@um.ac.ir

**Mohamad Hosein Mahmudy Gharaie**

Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
mhmgharaie@um.ac.ir

**Hamed Zand-Moghadam**

Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran  
zand1883@uk.ac.ir

**Abstract**

The present study has been performed to evaluate the prospective effects of activity mining on the mineralogy of sediments in the Dar-e-Allo copper mine, south of Kerman. Sediments affected by Dar-e-Allo mine are divided into six sedimentary groups including: natural background sediments, sediments of waterways leading to the mine, sediments of the Sarmashk River, sediments under the waste rock dump, sediments containing secondary phases, Fe-Mg oxy-hydroxide sediments, and evaporative sediments. Mineralogical studies of sediments as an indicator to evaluate the environmental effects of mining are classified into five main groups including primary and unaltered, carbonate, clay, sulfate and oxide minerals. Sediments in the operational area of the Dar-e-Allo copper mine are associated with extreme mineralogical diversity. The sulphide minerals are the most important source of acid mine drainage and secondary minerals such as gypsum, starkeyite, copiapite, magnesiocopiapite and natrojarosite are the most important temporary reserves of potentially toxic elements (PTEs) and H<sup>+</sup> ions. The dissolution of the mentioned minerals, especially during the initial flushing events in the wet season, cause a sharp increase in the acidity and concentration of PTEs in the surface runoff.

**Keywords:** Sediments, Mineralogy, Environment, Daralo Copper Mine

**Introduction**

Mining operation and extraction of sulphide ore cause the oxidation of a group of sulphide minerals (pyrite and chalcopyrite) and the production of acid mine drainage (Woo and Choi 2001; Milu et al. 2002; Sinclair 2007). Sediments play an important role in physical, chemical and biological processes resulting from acidic runoff. This research attempt to evaluate the impact of mining activities on the natural sediments of the area by studying the mineralogy of surface sediments. Determining the role of these sediments in the absorption and

release of PTEs from the sediments and entry into the water as a threat has great importance. The Dar-e-Allo Cu mine is one of the largest copper mines in the southeastern part of the Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt (UDMB), about 120km south of Kerman, Iran. The oldest lithologic unit of this region is Eocene in age. The petrology of the area is predominantly composed of igneous and volcanic rocks. The host of Cu ores in the Dar-e-Allo mine is a massive granodiorite (Alimohamadi et al. 2015). The goal of this study is

\*Corresponding author

Bavi H. Mosavi Harami S. R. Mahmudy Gharaie M. H. and Zand-Moghadam H. (2023). Evaluation of mineralogical changes of sediments affected by Dar-e-Allo copper mine, south of Kerman: application for environmental studies. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 39(1):1-16.

2423-8007 / © 2023 University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/jssr.2023.136989.1254>



<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1402.39.1.1.1>

to evaluate the impact of mining activities on the mineralogy of sediments.

### Materials and Methods

Thirty-one sediment samples from five sedimentary systems were collected at the end of the dry season (September 2019), when evaporative phases are formed due to intense evaporation and the supersaturation process. The sampling locations included waste rock drainages, sediments along the natural streams, evaporative deposits, sediments containing ferrous compounds and natural background sediment. After drying, these samples were sieved. XRD (X-Ray Diffraction) analysis were performed on the samples for identification of minerals by the qualitative method at the Zar-Azma laboratory in Tehran.

### Discussion of Results & Conclusions

Mineralogical results confirmed the presence of 19 minerals in the composition of sediments. The identified minerals are classified into five main groups including primary and unaltered, carbonate, clay, sulphide and oxide minerals. Quartz, albite, orthoclase and hornblende are the most important primary minerals of lithogenic origin in sediment samples. Calcite and siderite are the only carbonate minerals identified in the sediment samples. The six minerals include chlorite, muscovite-illite, kaolinite, illite, montmorillonite and clinoptilolite are the important minerals resulting from alteration identified in the sediment samples. Moreover, five minerals including gypsum, copiapite, magnesiocopiapite, starkeyite and natrojarosite are the minerals that have stored sulfate ions in their composition. Oxide minerals include hematite and goethite.

Mineralogical results show that each of the primary and secondary mineralogical compositions will show different environmental effects in the short and long term on the surrounding vital ecosystems. Albite and orthoclase as the major minerals through homogeneous or heterogeneous weathering (consumption of  $H^+$  or the production of  $HCO_3^-$ ) can play an important role in reducing the acidity of weathering solutions and increasing the absorption of PTEs (Lottermoser 2003). Carbonate minerals neutralize the acid by forming  $HCO_3^-$  or  $H_2CO_3$  (Skousen et al. 2000; García-Valero et al. 2020). Clay minerals can remove PTEs from Contaminated drains through cation exchange or surface adsorption (Ren et al. 2023). The consumption of  $H^+$  ions and the acidity of mine drainage decreases as a result of weathering of clay minerals (Elghali et al. 2021). As a result of the evaporation of

sulfated waters, evaporate and secondary minerals with different compositions are deposited (Hammarstrom et al. 2003; Hammarstrom et al. 2005). The presence of copiapite minerals is proof of the acidic conditions of the sedimentation environment (Carbone et al. 2013). Gypsum is another important evaporative mineral in acidic drainage environments (Carbone et al. 2013). The formation of the starkeyite indicates intense evaporative conditions and the presence of Fe sulfide compounds (Sracek et al. 2004). The abundance of  $Na^+$  in the water of the mine area has provided suitable conditions for the natrojarosite formation (Bavi 2021). The  $Na^+$  required for the formation of natrojarosite is released from the weathering of albite, which is a common mineral in intermediate and acidic rocks (Desborough et al. 2010). The active presence of gypsum as a high degree of dissolution mineral in sulphide sediments (S23-S25) and very high to a dangerous degree of pollution (Bavi et al. 2023) are proof the temporary storage of  $H^+$  and PTEs in the mineralogical structure of gypsum. While sulfate salts containing  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , and  $Al^{3+}$  (for example, starkeyite, copiapite, magnesiocopiapite, and natrojarosite) are insoluble (Lottermoser 2003) and are not easily to release  $H^+$  and PTEs to the aquatic system. The presence of these evaporite minerals with high dissolution intensity in acidic conditions (S17, S18, S23, S25) corresponds with a very high degree of contamination (Bavi et al. 2023). Hematite and goethite are stable iron oxides that have an active absorption surface and are capable of absorbing cations and anions from the surrounding environment (Carbone et al. 2013). Therefore, these minerals have a potential application in protecting the environment and absorbing PTEs from water and reducing their concentration in the solution phase.

Sulphide minerals are the most important source of acid mine drainage, which depending on the composition of the host rock or sediments can cause acid production and the release of PTEs over a continuous time. In the studied area, the evaporate sediments have the highest amount of secondary minerals. The formation of these sediments only temporarily causes the storage of PTEs and  $H^+$  ions. Therefore, as a natural cleaning process, they play an important role in preventing the movement and transfer of PTEs into the environment. With the beginning of the wet season, especially during the first flood, water pollution will increase sharply; But with repeated rainfall, the intensity of pollution will decrease. Such a cycle of pollution transfer in the water environment and sediment will be repeated every year.




مقاله پژوهشی

## ارزیابی تغییرات کانی‌شناسی رسوبات متأثر از معدن مس درآلو، جنوب کرمان: کاربردی جهت مطالعات زیست‌محیطی

هدا باوی، دانشجوی دکتری گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

Hoda.Bavi@um.ac.ir

سید رضا موسوی حرمی ، استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

moussavi@um.ac.ir

محمدحسین محمودی قرائی، استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

mhmgharaie@um.ac.ir

حامد زندمقدم، دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

zand1883@uk.ac.ir

### چکیده

مطالعه حاضر به منظور ارزیابی آثار احتمالی معدنکاری بر کانی‌شناسی رسوبات، در محدوده فعالیت معدن مس درآلو انجام شده است. رسوبات متأثر از معدن درآلو به هفت سامانه رسوبی، شامل رسوبات زمینه طبیعی منطقه، رسوبات آبراهه‌ای منتهی به معدن، رسوبات رودخانه سرمشک، رسوبات زیر دامپ سنگ باطله، رسوبات حاوی فازهای ثانویه، رسوبات آهن‌دار و رسوبات تخییری تقسیم می‌شود. کانی‌شناسی رسوبات به عنوان شناسه‌ای برای ارزیابی آثار زیست‌محیطی معدن، در پنج گروه اصلی شامل کانی‌های اولیه و دگرسان‌نشده، کانی‌های کربناته، کانی‌های رسی، کانی‌های سولفاته و کانی‌های اکسیدی رده‌بندی می‌شود. رسوبات در محدوده عملیاتی معدن مس درآلو با تنوع شدید کانی‌شناسی همراه‌اند؛ به طوری که کانی‌های سولفیدی، مهم‌ترین منشأ تولید زهاب اسیدی و کانی‌های ثانویه از جمله ژیپس، استارکیت، کوپاپیت، مگنوکوپاپیت و ناتروژاروسیت مهم‌ترین ذخایر موقتی عناصر بالقوه سمی و یون  $H^+$  هستند. انحلال کانی‌های مذکور، به‌ویژه در ابتدای فصل پرباران، سبب افزایش شدید اسیدیته و غلظت عناصر بالقوه سمی در رواناب‌های سطحی خواهد شد. **واژه‌های کلیدی:** رسوبات، کانی‌شناسی، زیست‌محیطی، معدن مس درآلو.

\*نویسنده مسئول

باوی، ه.؛ موسوی حرمی، ر.؛ محمودی قرائی، م.ح. و زند مقدم، ح. (۱۴۰۲). «ارزیابی تغییرات کانی‌شناسی رسوبات متأثر از معدن مس درآلو، جنوب کرمان: کاربردی جهت مطالعات زیست‌محیطی». پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۳۹(۱): ۱-۱۶.



## مقدمه

با افزایش روزافزون جمعیت جهان، نیاز به تولید و مصرف مواد معدنی نیز افزایش می‌یابد. در این میان، کشورهای در حال توسعه با شتاب بیشتری، برای استفاده از منابع زیرزمینی و معدنی و تولید ثروت از آنها می‌کوشند. بدون شک تولید زهاب اسیدی معدن (Acid Mine Drainage; AMD)، ناهنجارترین مشکل زیست‌محیطی است که در معادن سولفید فلزی به دلیل حجم بالای باطله‌های سولفیدی و ایجاد شرایط مناسب برای اکسایش کانی‌های سولفیدی، ایجاد می‌شود (Akcil and Koldas 2006; Wu et al. 2009; Skousen et al. 2018; Kaur Brar et al. 2022). زهاب اسیدی از طریق اسیدی کردن آب و حمل غلظت‌های بالای عناصر سمی، تعادل ژئوشیمیایی عناصر را در مناطق تحت تأثیر معدنکاری برهم می‌زند و سبب اختلال در اکوسیستم‌های حیاتی و خارج‌شدن آنها از ساختار طبیعی خود می‌شود. معدن مس درآلو نیز که یکی از معادن مهم مس در استان کرمان محسوب می‌شود، از این امر مستثنا نیست. نظر به اینکه رودخانه‌های فصلی و دائمی مختلفی از ارتفاعات موجود در محدوده معدن مس درآلو، سرچشمه گرفته‌اند و این رودها از مهم‌ترین منبع آب مصرفی و نیروی حمل و نقل رسوبات در منطقه به شمار می‌روند، بنابراین در صورت ورود آلاینده‌ها به محیط آبی رودخانه، آنومالی‌های غیرطبیعی هر دو بخش رسوب و آب را تحت تأثیر آلودگی قرار می‌دهند (Houng and Lin 2003; Bavi et al. 2023). رسوب به‌عنوان یک سیستم ژئوشیمیایی گسترده، نقش مهمی در فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی حاصل از زهاب اسیدی دارد. مهم‌ترین تحولات شیمیایی که می‌تواند در بدنه رسوبات رخ دهد، شامل جذب (Absorption)، رهاسازی (Release)، اکسیداسیون (Oxidation) و احیا (Reduction) است. این فرآیندها بر روند انتقال، تحرک و زیست‌دسترس‌پذیری عناصر، تأثیر مستقیم دارند (Tumuklu et al. 2019; Hahn et al. 2007). عملیات معدنکاری و استخراج سنگ معدن سولفیدی، سبب اکسیدشدن مجموعه‌ای از کانی‌های سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) می‌شود (Woo and

2007; Milu et al. 2002; Sinclair 2007); این امر در صورت حضورنداشتن کانی‌های بافرکننده، سبب آزادسازی آب‌های اسیدی حاوی مقادیر بالای سولفات، عناصر بالقوه سمی، شبه‌فلزات و غیرفلزات به سامانه‌های اطراف (سامانه آبی و رسوبات) می‌شود (Lee et al. 2003). با وجود این، بخش رسوبات به دلیل جذب آلاینده‌ها از محیط آب، می‌تواند غلظت آلاینده‌ها، به‌ویژه عناصر بالقوه سمی بیشتری را در ساختار کانیایی خود متمرکز کند؛ به همین علت، بررسی کانی‌شناسی و غلظت عناصر در رسوبات بستر یک رودخانه، بهتر از محیط آب، می‌تواند شدت آلودگی را آشکار کند (Lai et al. 2013). مطالعات بسیاری بر کانی‌شناسی رسوبات و نیز به شواهد تشکیل کانی‌های ثانویه از زهاب‌های اسیدی معادن سولفیدی اشاره دارد که در معرض عوامل اکسایشی قرار دارند (Alpers et al. 1994; Evangelou 1995; Nordstrom and Alpers 1999; Plumlee 1999; Jambor et al. 2000; Verplanck et al. 2019; Khorasanipour and Rashidi 2009). بسیاری از محققان، نقش کانی‌های ثانویه را در آزادسازی اسید و عناصر بالقوه سمی و ارزیابی درجه آلودگی رسوبات را مطالعه کرده‌اند (Cravotta 1994; Jambor et al. 2000; Giere et al. 2003; Bowell and Parshley 2005; Elisa et al. 2006).

این پژوهش، با توجه به احساس نیاز در محدوده معدنکاری معدن مس درآلو، سعی کرده است تا با مطالعه و بررسی کانی‌شناسی رسوبات سطحی محدوده معدنکاری و دره‌های منتهی به معدن درآلو، تأثیر فعالیت‌های معدنکاری را شناسایی و ارزیابی کند که بی‌شک در طول زمان، بر رسوبات طبیعی منطقه تحمیل می‌شود. تعیین نقش این رسوبات در جذب عناصر بالقوه سمی و بررسی پتانسیل و شرایط رهاسازی عناصر از رسوب و ورود آنها به آب، به‌عنوان عامل تهدیدکننده حوضه آبریز، اهمیت بالایی دارد. این امر در توسعه راهبردی حوضه آبریز، با توجه به حفظ کیفیت آب شرب و کشاورزی روستاهای پایین‌دست (سرمشک و گونکاف، چهارطاق و روستاهای اطراف) اهمیت بالایی دارد. درنهایت با استفاده از نتایج به دست آمده از این مطالعه، برنامه‌های مدیریتی لازم در توسعه پایدار و حفظ محیط‌زیست

این حوضه اجرایی خواهد شد.

### روش مطالعه

پس از شناسایی مقدماتی منطقه، سیستم نمونه‌برداری از محیط رسوبی به گونه‌ای انتخاب شد که ضمن در بر گرفتن کلیه اهداف نمونه‌برداری، حداکثر دقت و حداقل خطا را در جمع‌آوری نمونه‌ها داشته باشد. در این پژوهش، عملیات نمونه‌برداری ۳۱ نمونه رسوب (۲۷ نمونه رسوب + ۴ نمونه رسوب تکراری) بر مبنای شرایط میدانی در فصل خشک انجام شده است. نمونه‌های رسوبی از بستر انواع رودخانه‌ها و آبراهه‌های اصلی و فرعی طبیعی منطقه گرفته تا رسوبات آبراهه‌های منتهی به معدن و حتی رسوبات تبخیری حاشیه آبراهه‌ها و پهنه‌های موجود در محدوده معدن برداشت شده‌اند. با توجه به نقش فعال ذرات ریز و کانی‌های رسی در فرآیند جذب و رهاسازی (بازجذب) عناصر سمی، برای آنالیزهای کانی‌شناسی در نمونه‌های رسوب، تنها ذرات با قطر کمتر از ۶۳ میکرون در اندازه سیلت و رس انتخاب شدند. برای نمونه‌برداری از محیط رسوبی، در هر ایستگاه رسوب سطحی (۲۰ cm - ۰) بستر آبراهه‌ها به میزان تقریبی ۵ کیلوگرم جمع‌آوری و مشخصات و محل نمونه‌برداری ثبت شد. نمونه‌های رسوب بعد از نمونه‌برداری به آزمایشگاه دانشگاه شهید باهنر کرمان و گروه زمین‌شناسی منتقل و در دمای اتاق خشک شدند. این نمونه‌ها پس از خشک‌شدن الک و برای انجام آنالیز و شناسایی فازهای کانایی به روش کیفی XRD (X-Ray Diffraction)، به آزمایشگاه زرازا در تهران ارسال شدند.

نمونه‌های رسوب از ۲۷ ایستگاه در قالب ۷ گروه به شرح زیر برداشت شده‌اند:

- ۱- نمونه‌های رسوب طبیعی از حوضه چهارطاق و پایین دست سد رسوب گیر (S1-S5)؛
- ۲- نمونه‌های رسوب آبراهه‌های طبیعی منتهی به معدن (S6-S18)؛
- ۳- رسوبات آبراهه دره سرمشک، قبل و بعد از تلاقی با مسیر آبراهه پایین دست معدن (S19-S20)؛
- ۴- رسوبات دره‌های مجاور دامپ‌های سنگ باطله (S21-S22)؛

### زمین‌شناسی ناحیه مطالعه شده

محدوده کانسار درآلو از نظر ساختاری در بخش جنوب شرقی کمان ماگمایی ارومیه-دختر، در زیر پهنه آتشفشانی-نفوذی دهج-ساردوئیه قرار دارد (شکل ۱). قدیمی‌ترین واحدهای سنگی محدوده مطالعاتی معدن درآلو، سن ائوسن دارند. این واحدها همگی لیتولوژی آذرآوری و آتشفشانی دارند. نتایج مطالعات سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و توده‌های نیمه عمیق واجد کانی‌سازی مس، نشان می‌دهد سنگ‌های آتشفشانی مذکور T ترکیب عمدتاً آندزیتی و داسیت آندزیتی دارند و در سری سنگ‌های کالکوالکالن قرار می‌گیرند؛ این در حالی است که توده‌های نیمه عمیق، عمدتاً ترکیب گرانودیوریتی تا تونالیت دارند (Bavi 2021). واحدهای سنگی ائوسن معمولاً توسط توده‌های گرانودیوریت-داسیتی و دیوریتی به عنوان سنگ میزبان کانی‌سازی، قطع شده‌اند. کانسار مس پورفیری درآلو ویژگی‌های کانسارهای پورفیری حاشیه فعال قاره‌ای نوع آند با ۴ زون آلتراسیون از قبیل فیلیک، پتاسیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک را نشان می‌دهد که در این میان، فیلیکی شدن و بعد از آن رسی شدن از توسعه و گسترش بیشتری برخوردار است (Alimohamadi et al. 2015). کانی‌سازی مس به صورت افشان یا متمرکز در شبکه رگچه‌های سیلیسی در بخش‌های دگرسان شده فیلیک، توده‌های نیمه عمیق و سنگ‌های در بر گیرنده آن ایجاد شده است. جوان‌ترین واحدهای سنگی محدوده معدن درآلو، رسوبات غیر منسجم به سن کواترنری‌اند. این رسوبات به ۳ گروه پادگانه‌ها، رسوبات مخروط افکنه قدیمی و رسوبات واریزه‌ای تفکیک‌شدنی‌اند (Heydarian 2000). سنگ میزبان کانی‌سازی مس در کانسار درآلو، یک توده گرانودیوریتی است. این توده نیمه عمیق کانه‌دار به صورت یک بیضی با قطر بزرگ ۱۰۰۰ متر و قطر کوچک ۳۵۰ تا ۴۰۰ متر در امتداد شمال غرب-جنوب شرق (N60W)، تاقدیس ملایمی را تشکیل داده است که بخش گرانودیوریتی در هسته آن قرار دارد. جایگزینی توده مذکور هم‌زمان با تکتونیک انجام شده است.



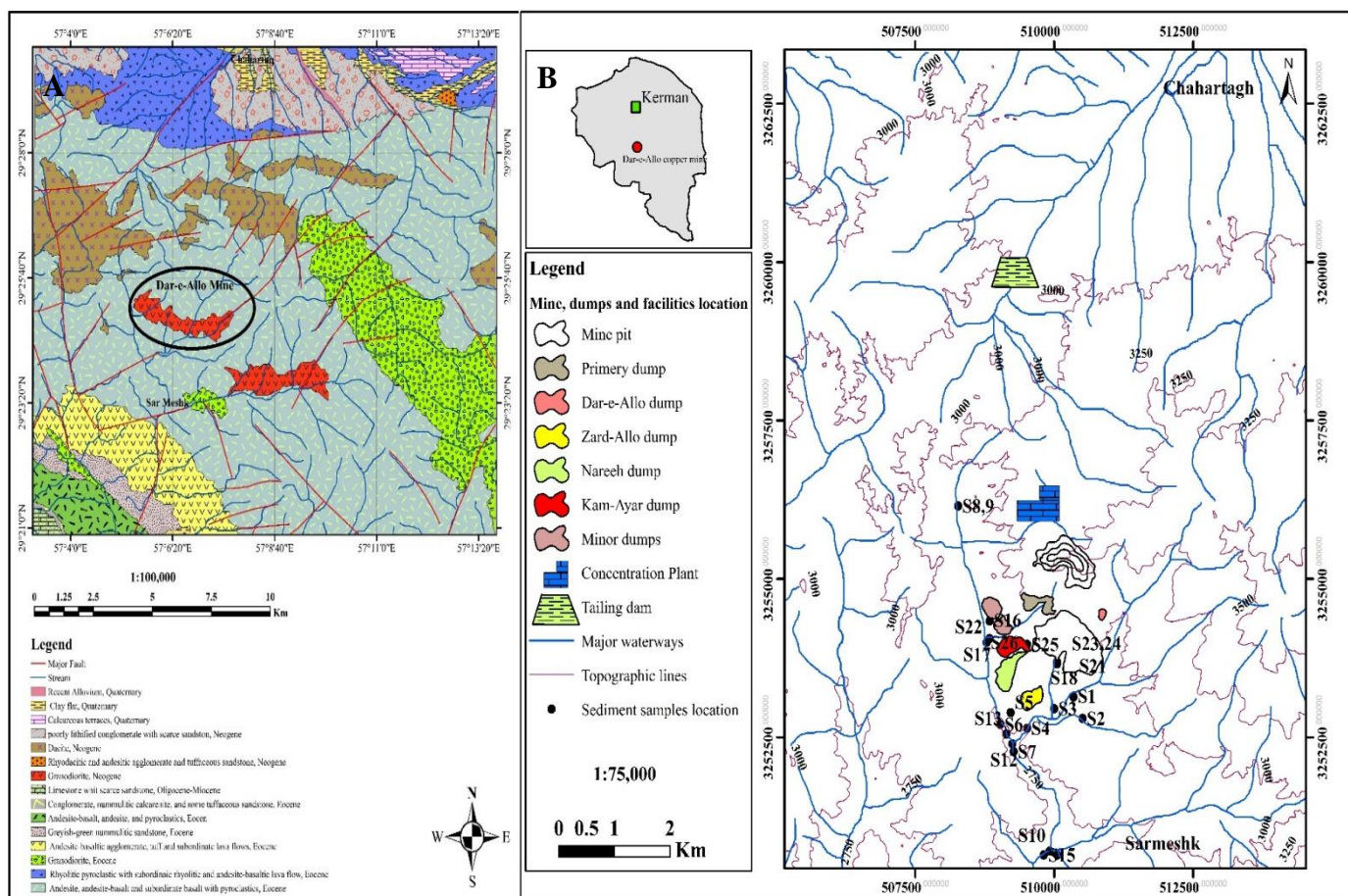
مسیر آبراهه طبیعی در محدوده کانه‌زایی طبیعی در پایین‌دست معدن (S30-S31).

از تعداد ۳۱ نمونه رسوب برداشت شده، ۴ نمونه برای کنترل دقت آنالیزها تکرار شدند. شکل ۱ موقعیت نمونه‌های رسوب برداشت شده از محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.

۵- رسوبات حاوی فازهای کانیاپی ثانویه (سبز-آبی) موجود در خروجی زهاب دامپ سنگ باطله کم‌عیار و آبراهه خروجی از محدوده معدن (S23-S25)؛

۶- نمونه‌های رسوب حاوی اکسیدهای آهن از محدوده معدن و آبراهه‌های حاشیه معدن (S26-S29)؛

۷- نمونه‌های رسوب تبخیری در محدوده پله‌های معدن و



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده (بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ساردوئیه، Zolanj et al. 1972) و موقعیت نمونه برداری از سامانه رسوبی در منطقه مطالعه شده

Fig 1- Geological divisions of the volcanic-sedimentary belt of Dehj-Sarduiyeh in Kerman province (Zolanj et al. 1972) and the sampling location of the sedimentary system in the study area

## نتایج

دیگر، تنوع در منابع آلودگی آب و رسوب (کانه‌زایی‌های طبیعی و آلودگی‌های معدنکاری) نیز سبب حضور طیف وسیعی از کانی‌ها در نمونه‌های رسوب می‌شود. در این پژوهش؛ با استناد بر نتایج مطالعات اخیر در زمینه‌ی درجه‌ی آلودگی رسوبات براساس شاخص‌های مختلف زیست‌محیطی (Bavi et al. 2023) و توجه به ماهیت هریک از ساختارهای کانی‌شناسی و همچنین به‌منظور تسهیل در فرآیند تحلیل نتایج بر مبنای آثار زیست‌محیطی، کانی‌های شناسایی‌شده در پنج گروه اصلی، شامل کانی‌های اولیه و دگرسان‌نشده، کانی‌های کربناته، کانی‌های رسی، کانی‌های سولفاته و کانی‌های اکسیدی رده‌بندی شده‌اند، همچنین حضور آنها در منابع متنوع آلودگی، ارزیابی و سپس نقششان در مطالعات زیست‌محیطی بررسی شده است.

کانی‌شناسی رسوبات، نقش برجسته‌ای در شناسایی پتانسیل پاک‌سازی طبیعی آلودگی‌ها دارد (Song et al. 2011). تعیین ۱۹ کانی در نمونه‌های رسوب برداشت‌شده در فصل خشک، به‌خوبی مؤید تنوع در ترکیب کانی‌شناسی آنهاست. بسیاری از کانی‌های شناسایی‌شده (برای مثال کانی‌های خانواده‌ی کوپاپیت)، جزء کانی‌های کمیاب و مختص مناطق دارای کانه‌زایی سولفیدی‌اند. نکته‌ی مهم‌تر اینکه هریک از کانی‌های شناسایی‌شده، پتانسیل آثار زیست‌محیطی متفاوتی دارند که به شدت از ماهیت منشأ آلودگی تأثیر می‌گیرند. اقلیمی که معدن مس درآلو در آن واقع شده است (خشک تا نیمه‌خشک)، شرایط تشکیل انواع متنوعی از ساختارهای کانی‌شناسی را به‌صورت کانی‌های تبخیری و ثانویه فراهم کرده است؛ از سوی

جدول ۱- نتایج آنالیز کانی‌شناسی نمونه‌های رسوب

Table 1- Results of mineralogical analysis of sediment samples

Samples NO.	Pollution degree (Bavi et al. 2023)	Lithogenic				Carbonate		Clay					Sulfate				Oxide			
		Quartz	Albite	Orthoclase	Hornblende	Calcite	Siderite	Chlorite	Muscovite-Illite	Kaolinite	Illite	Montmorillonite	Clinoptilolite	Gypsum	Magnesiocopiapite	Copiapite	Starkeyite	Natrojarosite	Hematite	Goethite
S1	Natural to low pollution																			
S2	Natural to low pollution																			
S3	Natural to low pollution																			
S4	Natural to low pollution																			
S5	Natural to low pollution																			
S6	Natural to low pollution																			
S7	Natural to low pollution																			
S8	Natural to moderate pollution																			
S9	Natural to low pollution																			
S10	Natural to low pollution																			
S11	Natural to low pollution																			
S12	Natural to low pollution																			
S13	Natural to low pollution																			
S14	Natural to low pollution																			





رسوبات آهن‌دار محدوده معدن برداشت شده است.

### کانی‌های رسی

شش کانی کلریت، موسکوویت-ایلیت، کائولینیت، ایلیت، مونت‌موریونیت و کلینوپتیلولیت (نوعی زئولیت)، مهم‌ترین کانی‌های حاصل از دگرسانی شناسایی شده در نمونه‌های رسوب‌اند. از بین این شش کانی، به ترتیب سه کانی مسکوویت-ایلیت، کلریت و کائولینیت بیشترین فراوانی را دارند. کانی مسکوویت-ایلیت بیشتر به‌عنوان کانی اصلی و کلریت و کائولینیت بیشتر به‌صورت فاز فرعی در رسوبات دیده می‌شوند.

### کانی‌های تبخیری و ثانویه سولفات

در آنالیز کانی‌شناسی رسوبات، انواع متعددی از کانی‌های ثانویه در زون اکسیدی و محیط‌های پیرامون زهاب اسیدی شناسایی شدند. هرچند تشکیل کانی‌های ثانویه قبل از فرآیند معدنکاری و در اثر هوازدگی طبیعی سنگ‌های سولفیدی نیز رخ می‌دهد (Hammarstrom et al. 2003; Hammarstrom et al. 2005)، به نظر می‌رسد که تشکیل این کانی‌ها بعد از فرآیند معدنکاری شدت می‌یابد (Hammarstrom et al. 2003). حضور انواع فازهای کانی‌شناسی ثانویه در اطراف زهکش‌های اسیدی به‌صورت رسوبات با تنوع رنگی بالا، شاهد خوبی بر وقوع کانی‌های ثانویه است. با توجه به شرایط اقلیمی معدن درآلو، تشکیل این کانی‌ها پاسخی به غلیظ شدن آب‌های معدنی در اثر فرآیند تبخیر است؛ زیرا سبب غلیظ شدن کاتیون‌ها و آنیون‌ها در آب تا رسیدن آنها به حد اشباع و تشکیل کانی‌های ثانویه می‌شود.

پنج کانی ژپس ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , Gypsum)، کوپاپیت ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$ , Copiapite)، مگنزیوکوپاپیت ( $\text{MgFe}^{3+}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$ , Magnesiocopiapite)، استارکیت ( $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , Starkeyite) و ناتروژاروسیت ( $\text{NaFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ , Natrojarosite) از جمله کانی‌هایی‌اند که در ترکیب خود یون سولفات ذخیره کرده‌اند. از بین این پنج کانی، ژپس

و استارکیت تنها کانی‌های ثانویه با منشأ تبخیری در نمونه‌های رسوب‌اند. کانی ژپس در گروه‌های مختلف رسوبات (رسوبات طبیعی تا رسوبات متأثر از فعالیت‌های معدنکاری) شناسایی شده است. این کانی به‌صورت فاز اصلی (در رسوبات آبراهه‌ها و پهنه‌های تبخیری محدوده معدن) تا کانی فرعی و کمیاب (در رسوبات طبیعی و رسوبات محدوده معدن) دیده می‌شود؛ دیگر کانی‌های سولفات با منشأ ثانویه، تنها در نمونه‌های رسوبات تبخیری برداشت‌شده از حاشیه آبراهه‌های خروجی از معدن و پهنه‌های تبخیری محدوده معدن شناسایی شده‌اند. کانی استارکیت، در گروه کانی‌های تبخیری با منشأ ثانویه قرار می‌گیرد و از تبخیر آب‌های سطحی حاصل می‌شود (Hammarstrom et al. 2003; Sracek et al. 2004).

کانی‌های گروه کوپاپیت از معدود کانی‌های سولفات آهن آبدارند که در شرایط به‌شدت اسیدی تشکیل می‌شوند (Nordstrom and Alpers 1999)؛ بنابراین حضور این کانی‌ها به‌عنوان فاز اصلی در پهنه‌های محدوده معدن با pH اسیدی، کاملاً توجیه‌پذیر است (Carbone et al. 2013). کانی مگنزیوکوپاپیت در صورت از دست دادن یون‌های منیزیم و هیدروکسید به کوپاپیت تبدیل می‌شود (Nordstrom and Alpers 1999).

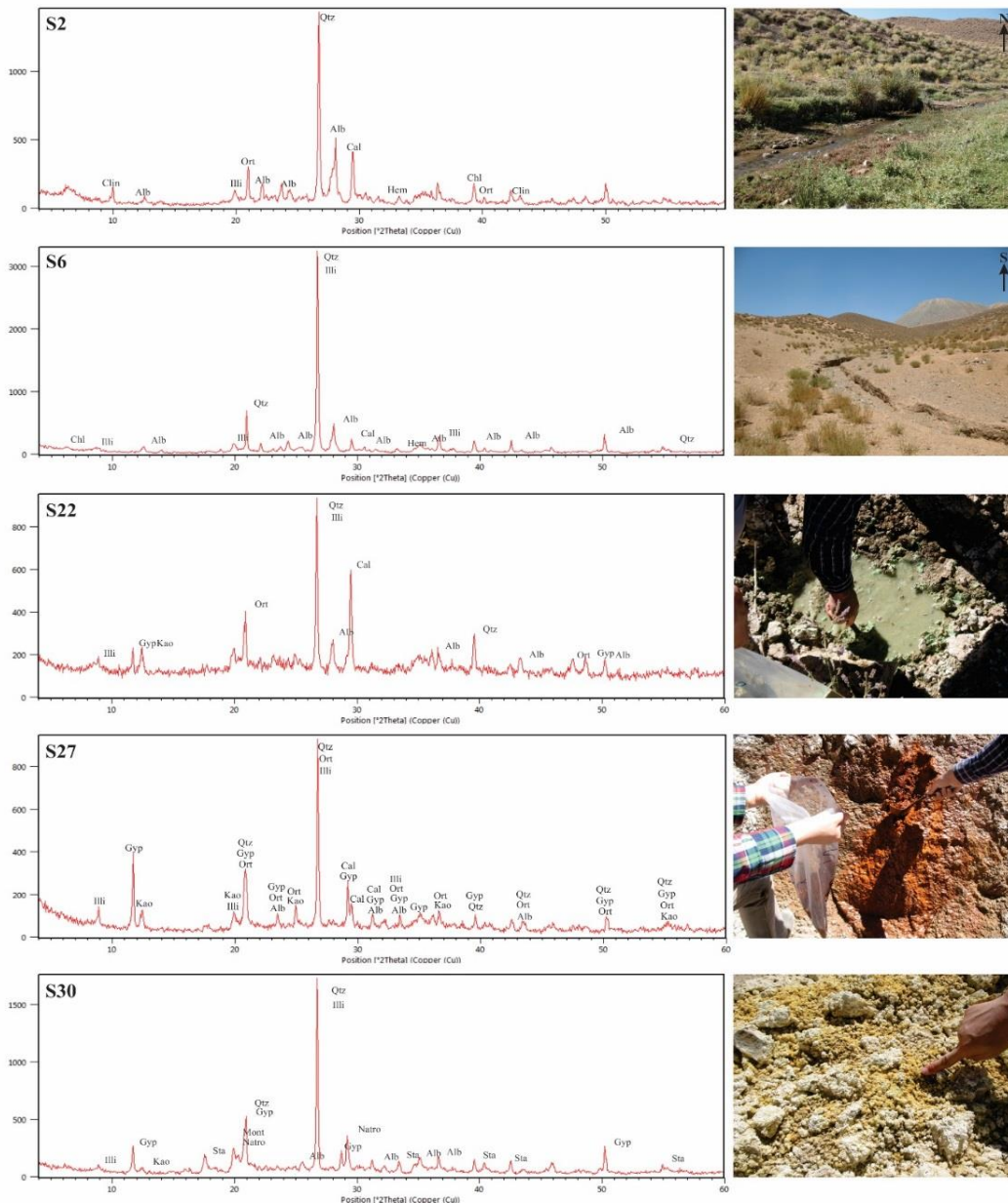
ناتروژاروسیت تنها در یک نمونه از رسوبات تبخیری محدوده معدن (S30) به‌عنوان کانی کمیاب شناسایی شده است؛ حضور این کانی نشان‌دهنده شرایط تشکیل در اسیدیت نسبتاً بالای زهاب‌های خروجی محدوده معدن است (Desborough et al. 2010).

### کانی‌های ثانویه اکسیدی

این گروه شامل دو کانی هماتیت ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Hematite) و گوتیت ( $\text{FeO}(\text{OH})$ , Goethite) است. کانی هماتیت در تمام نمونه‌های رسوب برداشت‌شده از حوضه چهارطاق و نمونه‌های طبیعی دره‌های اطراف معدن به‌صورت کانی فرعی دیده می‌شود. از سوی دیگر، کانی گوتیت تنها در سه نمونه رسوب متأثر از فعالیت‌های معدنکاری، به‌عنوان کانی فرعی

آهن‌دار محدوده معدن (S20) هستند. شکل ۲ نمونه‌هایی از نمودارهای XRD مربوط به رسوبات برداشت‌شده از محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.

معرفی شده است. این نمونه‌ها به ترتیب شامل رسوبات ریزدانه زیر دامپ باطله کم‌عیار (S22)، رسوبات ژله‌ای سبز-آبی در کنار چاه پیژومتر محدوده معدن (S23) و رسوبات



شکل ۲- نمونه‌هایی از نمودارهای XRD مربوط به رسوبات برداشت‌شده از محدوده مطالعاتی (Qtz، کوارتز؛ Alb، آلbite؛ Ort، orthoclase؛ Cal، calcite؛ Chl، chlorite؛ Hem، hematite؛ Illi، illite؛ Clin، clinoptilolite؛ Gyp، gypsum؛ Sta، starkite؛ Illi، illite؛ Kao، kaolinite؛ Mon، montmorionite؛ Natro، natrojarosite؛ Cop-Mag، copiapite-magnesiocopiapite) مگنزیکوپیاپیت

**Fig 2-** Examples of XRD graphs to sediments collected from the study area. (Qtz, quartz; Alb, albite; Ort, orthoclase; Cal, calcite; Chl, chlorite; Hem, hematite; Illi, illite; Clin, clinoptilolite; Gyp, gypsum; Sta, starkite; Illi, illite; Kao, kaolinite; Mon, montmorionite; Natro, natrojarosite; Cop-Mag, copiapite-magnesiocopiapite)

## بحث

موجود در معدن است (Shahabpour and Doorandish 2008). کانی‌های خانواده کوارتز (کوارتز، کلسدونی و اوپال) در طی فرآیند هوازگی، توانایی مصرف یون‌های هیدروژن را ندارند و تنها اسید سیلیسیک تولید می‌کنند (Lottermoser 2003). حضور کانی‌های کربناته از جمله کلسیت در کنار کانه‌زایی سولفیدی در رسوبات محدوده معدن مس درآلو (رسوبات برداشت‌شده از زیر دامپ باطله کم‌عیار، بعد از کانال آهکی احداث‌شده برای تصفیه زهاب اسیدی، S21)، عامل مؤثری در خنثی‌سازی زهاب حاصل از اکسایش کانی‌های سولفیدی خواهد بود. این شواهد نشان می‌دهد احداث کانال‌های آهکی در مسیر زهاب‌های اسیدی خارج‌شده از دامپ‌های سنگی، سبب کاهش شدید اسیدیته محیط می‌شود و از گسترش آثار نامطلوب کانی‌سازی سولفات در فصل خشک جلوگیری می‌کند. این کانی مهم‌ترین کانی خنثی‌کننده اسید است که در کاهش درجه اسیدیته آب بین روزه‌ای رسوبات، که به‌دنبال اکسایش کانی‌های سولفیدی موجود در آنها به وجود آمده است، نقش مؤثری دارد و برای افزایش قدرت جذب عناصر بالقوه سمی توسط رسوبات، شرایط محیطی را آماده می‌کند (Skousen et al. 2000; García-Valero et al. 2020). در محدوده معدنکاری معدن مس درآلو، کانی کلسیت از طریق انحلال و تشکیل کمپلکس با یون  $H^+$  (آزادشده از اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی) به صورت بیکربنات ( $HCO_3^-$ ) و یا اسید کربنیک ( $H_2CO_3$ )، سبب خنثی‌سازی اسید می‌شود (Blowes and Stumm and Morgan 1995; Ptacek 1994). بسته به pH محلول‌های هوازگی، یون  $H^+$  یا از راه تشکیل بیکربنات در محیط‌های اندکی اسیدی تا قلیایی و یا از راه تشکیل اسید کربنیک در محیط‌های به‌شدت اسیدی مصرف می‌شود (Brookins 1988). کانی سیدریت همانند کلسیت به‌عنوان کانی اصلاح‌کننده در خنثی‌سازی اسید ناشی از اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی، در نهشته‌های آهن‌دار (S28 و S29) شناخته شده است. کانی‌های رسی به‌ویژه محدوده فعالیت‌های معدنی، یکی از منابع خنثی‌سازی زهاب اسیدی‌اند که از طریق تبادل کاتیونی و یا جذب سطحی (بارهای منفی موجود در

از رسوبات (به‌عنوان یک شناساگر زیست‌محیطی)، به‌طور گسترده‌ای در شناسایی و مهار آلودگی‌های زیست‌محیطی استفاده می‌شود (Korfali and Davies 2003; Bavi et al. 2023; Jarvie et al. 1997). با توجه به نتایج کانی‌شناسی، مشخص شد رسوبات مختلف با کانی‌شناسی متفاوت، شدت آثار زیست‌محیطی متفاوتی نیز خواهند داشت. هریک از ساختارهای کانی‌شناسی اولیه و ثانویه در کوتاه‌مدت و بلندمدت، آثار زیست‌محیطی متفاوتی بر اکوسیستم‌های حیاتی اطراف نشان خواهند داد؛ برای مثال حضور کانی‌های سیلیکاتی مانند آلپیت و ارتوکلاز به‌عنوان کانی‌های اصلی در ترکیب رسوبات زمینه طبیعی و آبراهه‌های منتهی به معدن، از دیدگاه زیست‌محیطی حائز اهمیت و نشان‌دهنده درجه پایین هوازگی شیمیایی، به‌ویژه در حوضه آبریز چهارطاق است؛ از این رو بر محیط رسوب‌گذاری رودخانه‌ها و آبراهه‌های منطقه، شرایط پایداری طبیعی حاکم است که با تشدید شرایط هوازگی، فلدسپات‌ها شروع به هوازگی شیمیایی می‌کنند و به کانی‌های رسی تجزیه می‌شوند. آلپیت و ارتوکلاز به‌عنوان ترکیباتی که بخش مهمی از پوسته زمین را تشکیل داده‌اند، یکی از مخازن مهم ظرفیت بافری در محیط‌زیست، به‌ویژه در مناطق معدنی به‌شمار می‌آیند (Korfali and Davies 2003). این کانی‌ها از طریق هوازگی متجانس و یا نامتجانس، با مصرف یون‌های  $H^+$  و یا تولید یون‌های بیکربنات، نقش مهمی در کاهش اسیدیته محلول‌های هوازگی و افزایش قدرت جذب عناصر بالقوه سمی دارند (Lottermoser 2003). رخنمون‌های زون پتاسیک در منطقه، با داشتن کانی‌های فلدسپار پتاسیم، می‌تواند نقش مؤثری در مصرف بخشی از اسید زهاب معدن و یا دامپ‌های سنگ باطله داشته باشد (Shahabpour and Doorandish 2008). نکته دیگر اینکه برخی محصولات هوازگی کانی‌های آلپیت و ارتوکلاز، مانند کانی‌های رسی نیز ممکن است هوازگی بیشتری را متحمل شوند و با انحلال خود، یون‌های  $H^+$  بیشتری مصرف کنند (Lottermoser 2003). منشأ کانی کوارتز در رسوبات، زون دگرسانی کوارتز-سریستی

زهاب اسیدی محسوب می‌شود (Carbone et al. 2013). تشکیل کانی استارکیت نشان‌دهنده شرایط شدید تبخیری و حضور ترکیبات سولفیدی آهن دار است (Sracek et al. 2004)؛ از این رو حضور این کانی در نمونه‌های رسوب تبخیری برداشت شده از آبراهه‌ها و پهنه‌های محدوده معدن، امری طبیعی به شمار می‌آید. با توجه به اینکه عنصر آهن به دلیل تحرک پذیری پایین، بیشتر در نهشته‌های تبخیری هوازده رسوب می‌کند (Carbone et al. 2013)، این شرایط سبب شده است که کانی ناتروژاروسیت بیشتر در بخش هوازده رسوبات تبخیری تشکیل شود (Desborough et al. 2010; Carbone et al. 2013). وفور یون  $\text{Na}^+$  در منابع آب محدوده معدن، شرایط مناسبی را برای تشکیل کانی ناتروژاروسیت فراهم آورده است (Bavi 2021). سدیم مورد نیاز برای تشکیل این کانی، به احتمال زیاد از هوازدگی کانی آلیت آزاد می‌شود که یک کانی معمول در سنگ‌های حد واسط و اسیدی، نظیر توده‌های نفوذی مرتبط با کانه‌زایی مس پورفیری محسوب می‌شود (Desborough et al. 2010). حضور کانی‌های ناتروژاروسیت و گویت در فازهای ثانویه رسوبات، معرف کانسازسازی پیریت-کالکوپیریت است (Mombeini 2015). کانی‌های ثانویه موجود در نمونه‌ها، از نظر پایداری و به‌ویژه انحلال‌پذیری، تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند؛ از این رو، در ارزیابی آثار زیست‌محیطی کانی‌های سولفات، باید به این نکته نیز توجه داشت که برخی کانی‌های سولفات ساده‌آبدار (Simple hydrous metal sulfates)، مانند ژپس با درجه انحلال بالا، به راحتی در آب حل می‌شوند و عناصر بالقوه سمی را که با خود حمل کرده‌اند، آزاد و وارد بخش محلول می‌کنند (Lottermoser 2003)؛ این امر سبب انتشار آلودگی به وسیله آب‌ها می‌شود. حضور فعال کانی ژپس در رسوبات ژله‌ای سبز-آبی برداشت شده از محدوده معدن (S23-S25) و درجه آلودگی بسیار بالا تا خطرناک (Bavi et al. 2023) این رسوبات، گواهی بر ذخیره موقت  $\text{H}^+$  و عناصر بالقوه سمی در ساختار کانی‌شناسی ژپس است؛ در حالی که بسیاری از فازهای کانیایی ثانویه با درجه انحلال پایین، مانند نمک‌های سولفات

سطح آنها)، قادر به خارج کردن عناصر بالقوه سمی از زهاب‌های آلوده‌اند (Ren et al. 2023). از طرفی در اثر هوازدگی، کانی‌های رسی موجود یون‌های  $\text{H}^+$  مصرف می‌شود و اسیدیته زهاب معدن کاهش می‌یابد (Elghali et al. 2021). با توجه به اینکه در نمونه‌برداری از رسوبات منطقه مطالعه شده، توجه ویژه‌ای به بخش تبخیری، هوازده و فازهای ثانویه شد، طیف وسیعی از کانی‌های ثانویه و تبخیری در آنالیز XRD نمونه‌ها شناسایی شدند. بسیاری از این کانی‌ها، جزء کانی‌های بسیار کمیاب و نادرند که با توجه به شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه، در بخش خشک‌شده آبراهه‌ها و پهنه‌های محدوده معدن تشکیل شده‌اند. این کانی‌ها در روند تغییرات هیدروژئوشیمیایی منابع آب مرتبط با این آبراهه‌ها و پهنه‌های تبخیری نقش بسزایی داشتند و باعث ایجاد شرایط به شدت اسیدی در مواقع بارندگی و سیلابی در فصل زمستان شدند. نهشته‌های تبخیری محدوده معدن و ته‌نشست‌های نمکی حاشیه آبراهه‌های منتهی به معدن که به صورت پهنه‌های وسیعی گسترش یافته‌اند، بیشترین درصد کانی‌های ثانویه (از جمله ژپس، استارکیت، کوپاپیت، مگنزوکوپاپیت و ناتروژاروسیت) را دارند. به عبارت دیگر حدود ۶۷ درصد ترکیب کانی‌شناسی این رسوبات، از کانی‌های ثانویه تشکیل شده است؛ این امر نشان‌دهنده ترکیب سولفات آب‌هایی است که در محدوده معدن جاری شده است. در اثر تبخیر این آب‌های سولفات، کانی‌های تبخیری و ثانویه با ترکیبات مختلف نهشت پیدا می‌کنند (Hammarstrom et al. 2005; Hammarstrom et al. 2003). این رسوبات با تنوع رنگی بسیار بالا، از شیری‌رنگ تا زردرنگ و بعضاً به رنگ سبز تا قهوه‌ای کم‌رنگ مشاهده می‌شوند که نشان‌دهنده حضور فازهای ثانویه با ترکیبات متفاوت در این رسوبات است. وسعت و حجم گسترش این نهشته‌ها در فصل خشک، به دلیل تبخیر زیاد در منطقه، بسیار بالاست. حضور کانی‌های گروه کوپاپیت، گواه بر شرایط اسیدی حاکم بر محیط رسوب‌گذاری این کانی‌هاست (Carbone et al. 2013). سولفات کلسیم آبدار (ژپس) یکی دیگر از کانی‌های تبخیری شاخص در محیط‌های

ثانویه سولفاتی، اکسیدی، هیدروکسیدی، کربناته و سیلیکاته در رسوبات طبیعی و متأثر از فعالیت‌های معدنکاری شناسایی شدند. از این نظر، رسوبات تبخیری حاشیه زهاب اسیدی پله‌های معدن، بیشترین مقدار کانی‌های ثانویه را به خود اختصاص داده‌اند؛ بنابراین به نظر می‌رسد در طی فصول گرم سال، هم‌زمان با کاهش شدید نزولات جوی و افزایش سطح تبخیر بسیاری از املاح موجود در آب، به سطح اشباع خود برای تشکیل انواع کانی‌های ثانویه می‌رسند. تشکیل این رسوبات تنها به‌طور موقتی سبب ذخیره عناصر سمی و یون  $H^+$  می‌شود؛ بنابراین به‌عنوان یک فرآیند پاک‌سازی و مسمومیت‌زدایی طبیعی، در جلوگیری از تحرک و انتقال عناصر بالقوه سمی به محیط‌زیست، نقش مهمی دارند. از طرفی با شروع فصل بارش، به‌ویژه در اولین بارندگی سیلابی آلودگی، آب به‌شدت افزایش خواهد یافت؛ اما با تکرار بارندگی در ادامه فصل پرباب، از شدت آلودگی کاسته خواهد شد. چنین چرخه‌ای از انتقال آلودگی در محیط آب و رسوب، در هر سال آبی تکرار خواهد شد.

### تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر بخشی از رساله دکتری نویسنده اول است؛ از این رو از تمام همکاری‌های علمی و حمایت‌های معنوی و مادی گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد، از طریق کمک هزینه شماره ۳/۵۰۳۱۱ تشکر و قدردانی می‌شود. بی‌شک این تحقیق بدون حمایت‌های بخش تحقیق و توسعه صنایع مس سرچشمه، قابلیت اجرایی پیدا نمی‌کرد؛ از این رو از مدیریت و کارشناسان محترم مجتمع مس سرچشمه، به‌ویژه آقای دکتر حسن صحرایی و خانم مهندس عصمت اسماعیل‌زاده و از مدیریت و کارشناسان محترم معدن مس درآلو، برای همکاری در نمونه‌برداری‌ها کمال تشکر را داریم. در پایان از گروه‌های زمین‌شناسی و شیمی دانشگاه شهید باهنر کرمان، برای حمایت‌های علمی و فراهم‌آوردن شرایط ویژه برای نمونه‌برداری و آماده‌کردن نمونه‌ها تشکر می‌کنیم.

حاوی  $Fe^{2+}$ ،  $Mn^{2+}$ ،  $Fe^{3+}$  و  $Al^{3+}$  (برای مثال کانی استارکیت، کوپاپیت، مگزیوکوپاپیت و ناتروژاروسیت) تقریباً نامحلول‌اند (Lottermoser 2003) و به‌راحتی قادر به آزادکردن  $H^+$  و عناصر بالقوه سمی به سامانه آبی نیستند. حضور این کانی‌های با شدت انحلال کمتر در رسوبات تبخیری برداشت‌شده از مسیر آبراهه‌های طبیعی منتهی به معدن (S17 و S18) و پهنه‌های تبخیری در پله‌های معدن (S23-S25)، با درجه آلودگی بسیار بالای این رسوبات مطابقت دارد (Bavi et al. 2023)؛ مطالعات قبلی، مشابه یافته‌های کانی‌شناسی و اثر آنها در درجه آلودگی رسوبات را تأیید می‌کند (Cravotta 1994; Plumlee 1999; Nordstrom and Alpers 1999; Lottermoser 2003; Khorasanipour and Rashidi 2019).

هماتیت و گوتیت از اکسیدهای پایدار آهن به شمار می‌آیند که سطح جذب فعالی دارند و در نهشته‌های گوسان، پله‌های معدن و زیر نهشته‌های تبخیری گسترده در محدوده معدن مشاهده و برداشت شده‌اند. این نهشته‌ها به رنگ قرمز تا قهوه‌ای تیره دیده می‌شوند که نشان‌دهنده حضور درصد بالای ترکیبات هیدروکسیدی آهن‌دار است. کانی‌های آهن‌دار موجود در این رسوبات، قابلیت جذب بالای کاتیون‌ها و آنیون‌ها را از محیط پیرامون دارند (Carbone et al. 2013)؛ از این رو، این کانی‌ها در حفاظت از محیط‌زیست، جذب عناصر بالقوه سمی از محیط‌های آبی و آبراهه‌های منتهی به معدن و کاهش غلظت آنها در فاز محلول، کاربرد بالقوه‌ای دارند؛ همچنین نشان‌دهنده هوازدهی شیمیایی طبیعی منطقه‌اند و جایی دیده می‌شوند که هنوز فعالیت‌های معدنکاری، تأثیر چشمگیری ندارد.

### نتیجه

کانی‌های سولفیدی مهم‌ترین منشأ تولید زهاب اسیدی‌اند که بسته به ترکیب سنگ و یا رسوبات میزبان این کانی‌ها، به‌ویژه از نظر حضور کانی‌های خنثی‌کننده اسید و همچنین شرایط هوازدهی و اکسایش محیط، می‌توانند در یک دوره زمانی مداوم، سبب تولید اسید و آزادسازی عناصر بالقوه سمی شوند. در منطقه مطالعه‌شده، طیف وسیعی از کانی‌های تبخیری و



## References

- Akcil A. and Koldas K. 2006. Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14: 1139-1145.
- Alimohammadi M. Alirezaei S. Qadri M. and Kontak D. 2015. Geochemistry, lithology and geo-structural location of volcanic and intrusive rocks around the porphyry copper deposits in Dar-e-Allo and Sarmeshk, south of the copper belt of Kerman, Iran. *Earth Sciences*, 98: 159-170.
- Alpers C.N. Blowes D.W. Nordstrom D.K. and Jambor J.L. 1994. Secondary minerals and acid-mine water chemistry. In: Jambor, J.L., Blowes, D.W. (Eds.), *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine Wastes*, Waterloo, Ontario, May 1994. Mineralogical Association of Canada, pp. 247–270.
- Bavi H. 2021. Assessment of Drainage basin affected by Copper Mine Dar-e-Allo, (South Kerman) Sedimentology, Environmental Geochemistry and Hydrogeochemistry. Internal Report of Research and Development Division, 328p, In Persian.
- Bavi H. Mahmudy Gharai M.H. Moussavi-Harami R. Zand-Moghadam H. Mahboubi A. and Tohidi M.R. 2023. Spatial dispersion hot spots of contamination and human health risk assessments of PTEs in surface sediments of streams around porphyry copper mine, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, doi: org/10.1007/s10653-022-01471-x.
- Bowell R.J. and Parshley J.V. 2005. Control of pit-lake water chemistry by secondary minerals, Summer Camp pit, Getchell mine. Nevada. *Chem. Geol.* 215: 373–385.
- Blowes D.W. and Ptacek C.J. 1994. Acid-Neutralization mechanisms in inactive mine tailings. In: Jambor, J.L. Blowes D.W (Eds.), the environmental geochemistry of sulfide mine-wastes. Mineralogical Association of Canada, Nepean, Short course handbook, 22: 271- 292.
- Brookings G. 1988. *Eh-pH Diagrams of Geochemistry*, Springer-Verlag Berlin Aeidelberg, 175p.
- Carbone C. Dinelli E. Marescotti P. Gasparotto G. and Lucchetti G. 2013. The role of AMD secondary minerals in controlling environmental pollution: Indications from bulk leaching tests. *Geochemical Exploration*, 132: 188-200.
- Cravotta C.A. 1994. Secondary iron-sulfate minerals as sources of sulfate and acidity. In: Alpers, C.N., Blowes, D.W. (Eds.), *Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation*. Journal of the American Chemical Society, 550: 345–364.
- Desborough G.A. Smith K.S. Lowers H.A. Swayze G.A. Hammarstrom J.M. Diehl Sh.F. Leinz R.W. and Driscoll R.L. 2010. Mineralogical and chemical characteristics of some natural jarosites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 1041-1056.
- Elghali A. Benzaazoua M. Bouzahzah H. Abdelmoula M. Dynes J. and Jamieson H.E. 2021. Role of secondary minerals in the acid generating potential of weathered mine tailings: Crystal-chemistry characterization and closed mine site management involvement. *Science of the Total Environment*, 784. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147105.
- Elisa M. Gomes P. and Favas P.J.M. 2006. Mineralogical controls on mine drainage of the abandoned Ervedosa tin mine in north-eastern Portugal. *Applied Geochemistry*, 21: 1322–1334.
- Evangelou V.P. 1995. *Pyrite Oxidation and its Control: Solution Chemistry, Surface Chemistry, Acid Mine Drainage (AMD), Molecular Oxidation Mechanisms, Microbial Role, Kinetics, Control, Ameliorates and Limitations, Micro Encapsulation*. CRC Press, Boca Raton, FL, 293p.
- García-Valero A. Martínez-Martínez S. Faz A. Rivera J. and Acosta J.A. 2020. Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Use of natural alkaline material. *Journal of Water Water Process Engineering*, 33: 101064.
- Giere R. Sidenko N.V. and Lazareva E.V. 2003. The role of secondary minerals in controlling the migration of arsenic and metals from high-sulfide wastes, Berikul gold mine, Siberia. *Applied Geochemistry*, 18: 1347–1359.
- Hahn J. Mann B. Bange U. and Kimmel M. 2019. Horizon-specific effects of heavy metal mobility on nitrogen binding forms in forest soils near a historic smelter (Germany). *Geoderma* 355, 113895. doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113895.
- Hammarstrom J.M. Seal II R.R. Meier A.L. and Kornfeld J.M. 2005. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments. *Chemical Geology*, 215: 407–431.
- Hammarstrom J.M. Seal II R.R. Meier A.L. and Jackson J.C. 2003. Weathering of sulfidic shale and copper mine waste: secondary minerals and metal cycling in Great Smoky Mountains National Park, Tennessee, and North Carolina, USA. *Environmental Geology*, 45: 35–57.
- Heydarian F. 2000. Investigation of geology and mineral potential of Dar-e-Allo porphyry copper deposit. Master's thesis in the field of geology, Shahid Bahonar University, Kerman, 181p, In Persian.
- Houng K.M. and Lin S. 2003. Consequences and implication of heavy metal spatial variations in sediments of Keelung River drainage basin, Taiwan. *Chemosphere*, 53: 1113-1121.
- Jambor J.L. Nordstrom D.K. and Alpers C.N. 2000. Metal sulfate salts from sulfide mineral oxidation.





- In: Alpers C.N. Jambor J.L. Nordstrom, D.K., (Eds.), *Sulfate Minerals Crystallography, Geochemistry, and Environmental Significance. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 40: 303–350.
- Jarvie H.P. Neal C. Leach D.V. Ryland G.P. House W.A. and Robson A.J. 1997. Major ion concentrations and the inorganic carbon chemistry of Humber Rivers. *Science of the Total Environment*, 194/195: 285-302.
- Kaur Brar K., Etteieb S. Magdoui S. Calugaru L. and Kaur Brar S. 2022. Novel approach for the management of acid mine drainage (AMD) for the recovery of heavy metals along with lipid production by *Chlorella vulgaris*. *Management*, 308: 114507.
- Khorasanipour M. and Rashidi S. 2019. Geochemical fractionation pattern and environmental behavior of rare earth elements (REEs) in mine wastes and mining contaminated sediments; Sarcheshmeh mine, SE of Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 210:106450. doi:org/10.1016/j.gexplo.2019.106450.
- Korfali S.I. and Davies B.E. 2003. A comparison of metals in sediments and water in the river Nahr-Ibrahim, Lebanon: 1996 and 1999. *Environmental Geochemistry and Health*, 25: 41-50.
- Lai T.M. Lee W. Hur J. Kim Y. Huh I.A. Shin H.S. Kim C.K. and Lee J.H. 2013. Influence of sediment grain size and land use on the distribution of heavy metals in sediments of the Han River basin in Korea and assessment of anthropogenic pollution. *Water, Air and Soil Pollution*, 224: 12-1609.
- Lee S. Moon J.W. and Moon HS. 2003. Heavy metals in the bed and suspended sediments of Anyang River. Korea: Implications for water quality. *Environmental Geochemistry and Health*, 25: 433-452.
- Lottermoser B.G. 2003. *Mine Waste: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Berlin Springer, Press, 277p.
- Milu V. Leroy J. and Peiffert C. 2002. Water contamination downstream from a copper mine in the Apuseni Mountains, Romania. *Environmental Geology*, 42: 773–782.
- Mombeini S. 2015. Investigation of hydrogeochemistry and chemical separation of potentially polluting elements in water and sediment of Taft copper mines and determination of bioavailability of elements in the affected environment. Master's thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, 262p, In Persian.
- Nordstrom D.K. and Alpers C.N. 1999. Negative pH, efflorescence mineralogy, and consequences for environmental restoration at the Iron Mountain Superfund site, California. *Proceeding of the National Academy of sciences*, 96: 3455-3462.
- Plumlee G.S. Smith K.S. Montour M.R. Fichlin W.H. and Mosier E.L. 1999. Geologic control on the composition of natural waters and mine waters drainage diverse minerals-deposit types. In: Filipek, L.H., Plumlee, G.S. (Eds.), *Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Part B: Case Studies and Research Topics. Reviews in Economic Geology* 6B: 373–432.
- Ren Y. Cao X. Wu P. Li I. 2023. Experimental insights into the formation of secondary minerals in acid mine drainage-polluted karst rivers and their effects on element migration. *Science of the Total Environment*, 858, Part 3, 160076. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.160076.
- Shahabpour J. and Doorandish M. 2008. Mine drainage water from the Sar-Cheshmeh porphyry copper mine, Kerman, IR Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 141: 105–120.
- Sinclair W.D. 2007. *Porphyry Deposits. Natural Resources, Canada, Special Publication*, 5: 223-243.
- Skousen J. Ziemkiewicz P.F. and McDonald L.M. 2018. *Acid Mine Drainage Formation, Control and Treatment: Approaches and Strategies*. *Extractive Industries and Society*, 6(1): 241-249.
- Skousen J.G. Sexstone A. and Ziemkiewicz P.F. 2000. *Acid Mine Drainage Control and Treatment. Reclamation of Drastically Disturbed Lands* American Society of Agronomy and American Society for Surface Mining and Reclamation. *Agronomy* 41, Chapter 6.
- Song Y. Ji J. Yang Z. Yuan X. Mao C. Frost R.L. and Ayoko G.A. 2011. Geochemical behavior assessment and apportionment of heavy metal contaminats in the bottom sediemnts of lower reach of Changjiang River. *Catena*, 85: 73-81.
- Sracek O. Choquette M. Gélinas R. Lefebvre R. and Nicholson V. 2004. Geochemical characterization of acid mine drainage from a waste rock pile, Mine Doyon, Québec, Canada. *Contaminant Hydrology*, 69: 45-71.
- Stumm W. and Morgan J.J. 1995. *Aquatic chemistry* (3rd end). Wiley, New York, 1022p.
- Tumuklu A. Yalcin M. G. and Sonmez M. 2007. Detection of heavy metal concentrations in soil caused by Nigde City Garbage Dump. *Polish Journal Environmental Studies*, 16: 651–658.
- Verplanck P.L. Nordstrom D.K. Bove D.J. Plumlee G.S. and Runkel R.B. 2009. Naturally acidic surface and ground waters draining porphyry-related mineralized areas of the Southern Rocky Mountains, Colorado and New Mexico. *Appl. Geochem.*, 24: 255–267.
- Woo N.C. and Choi M.J. 2001. Arsenic and metal contamination of water resources from mining

- wastes in Korea. *Environmental Geology*, 40: 305–311.
- Wu A. Yin Sh. Wang H. Qin W. and Qiu G. 2009. Technological assessment of a mining-waste dump at the Dexing copper mine, China, for possible conversion to an in situ bioleaching operation. *Bioresource Technology*, 100: 1931–1936.
- Zolanj S. Dimitrijevic M.N. Cvetic S. and Dimitrijevic M.N. 1972. Geological Map of Sarduiyeh, 1:100,000 Series Sheet 7448. Ministry of Economy, Geological Survey of Iran.

