



مقاله پژوهشی

پراکندگی و توزیع ژئوشیمیایی عناصر کمیاب و کانساری در کانسار رگه‌ای چاه‌مسی، شمال شهر بابک

سارا درگاهی*، مریم سروری‌زاده و محسن آروین

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

دریافت مقاله: 1397/01/02، پذیرش: 1398/08/19

چکیده

کانسار رگه‌ای چندفلزی چاه‌مسی در کمربند مس کرمان و مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر واقع شده است. در این محدوده، سنگ‌های میزبان شامل سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری است که به شدت تحت تأثیر دگرسانی گرمایی پروپلیتیک با چیرگی کربنات-کلریت قرار گرفته‌اند. کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت، سولفیدهای اصلی در ذخیره چاه‌مسی هستند که با دگرسانی سیلیسی و رسی همراه می‌شوند. همچنین در بخش سوپرژن و زون اکسیدان، کالکوسیت، مالاکیت، کوولیت، آزوریت و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن دیده می‌شود. در بررسی ضرایب همبستگی عناصر به روش پیرسون، بیشترین میزان ضریب همبستگی مربوط به عناصر Ag-Au و Pb-Zn با میزان بیشتر از 0/7 است و در درجه بعدی اهمیت زوج عناصر Cu-Ag، Cu-Fe، Cu-Au و Fe-Ag با میزان ضریب همبستگی بیشتر از 0/6 قرار می‌گیرند؛ در حالی که همبستگی عنصر Mo با دیگر عناصر ضعیف است. تحلیل خوشه‌ای نیز نتایج مشابهی به دست می‌دهد. به نظر می‌رسد، فراوانی رگه‌های حاوی کانه‌زایی عناصر فلزی سرب، روی و طلا اغلب در ترازهای سطحی تر رخ داده است؛ در حالی که رگه‌های حاوی کانه‌زایی مس و نقره، علاوه بر ترازهای سطحی، در ترازهای عمقی تر نیز دارای تمرکزهای قابل توجهی هستند. این یافته‌ها بیانگر احتمال وجود عیارهای قابل قبول در عمق بیشتر کانسار چاه‌مسی و در نتیجه الزام ادامه عملیات حفاری است. عیار بالای عنصر مولیبدن در ترازهای سطحی به نظر می‌تواند به علت هم‌پوشانی هاله‌های ژئوشیمیایی اولیه رگه‌های مختلف و یا تأثیر میزان پیریت، درجه pH و درجه قلیائیت سیال بوده باشد.

واژه‌های کلیدی: ضریب همبستگی، منطقه‌بندی، کانسار رگه‌ای، چندفلزی، چاه‌مسی، کمان ماگمایی ارومیه - دختر

مقدمه

قرارگرفت، نظریه منطقه‌بندی هاله‌های ژئوشیمیایی اولیه بود (Gong et al., 2016). این نظریه که کاربردهای بسیار مهمی در اکتشاف مناطق دارای پتانسیل معدنی دارد (Li et al., 1995; Shao, 1997; Harraz and Hamdi, 2015)

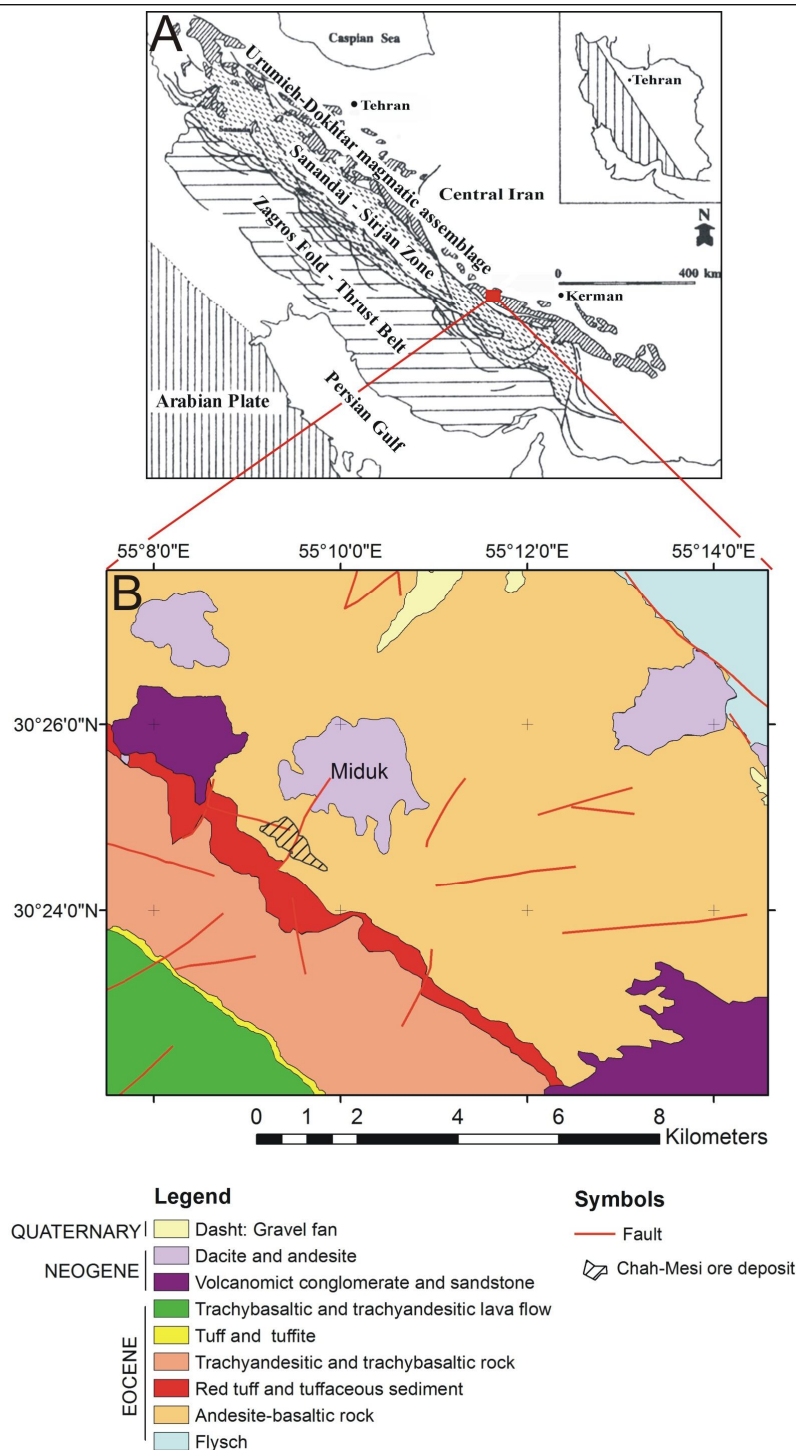
بررسی توزیع و تغییرات عیار عناصر در کانسارهای گرمایی از دیرباز مورد توجه بوده است (Harraz, 1995)؛ به طوری که یکی از مهم‌ترین مباحثی که در این زمینه مطرح شد و مورد توجه

Sojdehee et al., 2017; Alirezaei et al., 2008) و درآلو (Karimpour and Sadeghi, 2015) تشکیل شده‌اند (2019). اعتقاد بر این است که توسعه این کانسارها، اغلب در یک دوره زمانی خاص (اغلب الیگومیوسن) و در مکان‌های ویژه‌ای بوده است (Aghazadeh et al., 2015; Golestani et al., 2019; Karimpour and Sadeghi, 2019). از جمله به نظر می‌رسد که کانسارها به‌طور ویژه در ارتباط با کنترل‌کننده‌های ساختاری به‌خصوص گسل‌های امتداد لغز بزرگ و گسل‌های ثانویه مرتبط با آنها توسعه یافته‌اند (Zarasvandi et al., 2015; Mirzababaei et al., 2016). کانسار رگه‌ای چندفلزی چاه‌مسی در استان کرمان، در فاصله 40 کیلومتری شمال شهر بابک و 1/5 کیلومتری جنوب غرب معدن مس میدوک واقع است. این کانسار بخشی از مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر و متعلق به کمربند مس کرمان است (شکل 1-A و B). کانسار چاه‌مسی همراه با کانسارهای پرکام (Alirezaei et al., 2017; Mohammaddoost et al., 2017; Boomeri et al., 2019) و ایجو (Golestani et al., 2017) جزو کانسارهایی هستند که همگی در اطراف کانسار مس میدوک قرار گرفته‌اند و در قیاس با معدن مس میدوک، از ذخیره پایین‌تری برخوردار هستند. این کانسارها، اغلب در مرحله اکتشاف و یا باطله‌برداری هستند. در محدوده کانسار چاه‌مسی، وجود بقایای کارهای قدیمی معدن‌کاری، نشان از رونق فعالیت‌های معدنی از گذشته‌های بسیار دور دارد. شکل 2، نقشه زمین‌شناسی منطقه چاه‌مسی را نشان می‌دهد.

بررسی‌های اکتشافی متعددی برای ارزیابی کانسار چندفلزی چاه‌مسی انجام شده است که شامل بررسی‌ها در طی سال‌های 1350 تا 1351 توسط گروه کارشناسی یوگسلاوی و ادامه آن در طی سال‌های 1385 تا 1387 با هدایت شرکت ملی صنایع مس ایران به انجام رسیده است. آخرین بررسی اکتشافی انجام شده در منطقه، در سال 1393 توسط شرکت مهندسی پارس‌اولنگ و بر پایه اطلاعات حفاری 27 گمانه اکتشافی جدید و 8 گمانه قدیمی برای تخمین ذخیره کانسار انجام شده است.

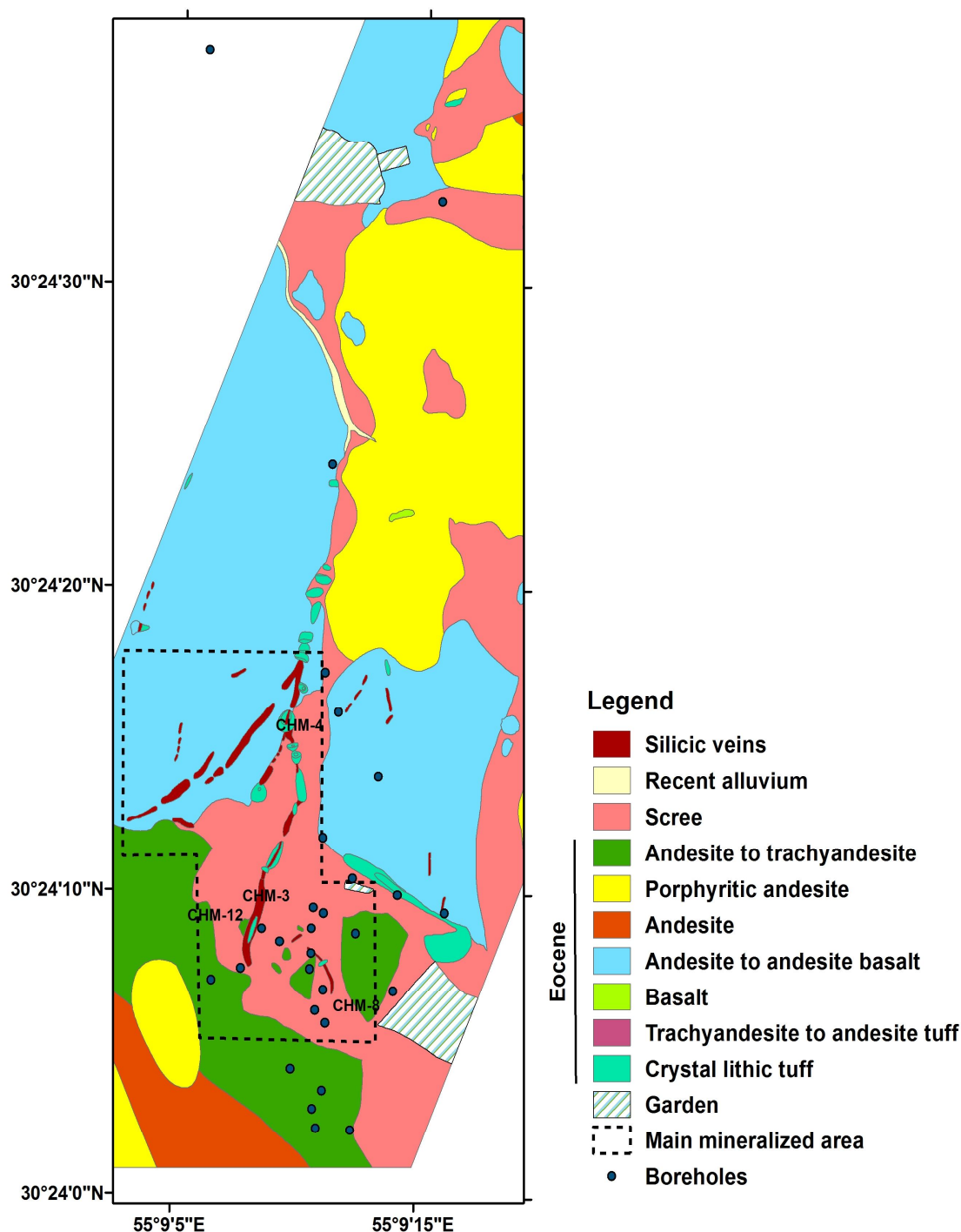
می‌تواند برای پیش‌بینی احتمال وجود و همچنین میزان نزدیکی به ماده معدنی مورد استفاده قرار گیرد (Chen et al., 2016; Gong et al., 2016; Hosseini-Dinani and Aftabi, 2016). از نخستین افرادی که بحث منطقه‌بندی افقی و قائم عناصر یا کانی‌ها را در هاله‌های ژئوشیمیایی اولیه کانسارها مطرح کردند، می‌توان به برودریک (Broderick, 1929) اشاره کرد و سپس در سال‌های بعد این نظریه توسط افراد دیگر نظیر براون (Brown, 1935) و گروس (Gross, 1956) دنبال شد تا سرانجام در دهه 1970، این موضوع به عنوان یکی از مباحث مهم در علم ژئوشیمی کانسارها تبدیل شد؛ به‌طوری‌که بشوس و گریگوریان (Beus and Grigorian, 1977)، شاخص‌هایی را برای محاسبه منطقه‌بندی عناصر در هاله‌های ژئوشیمیایی اولیه ارائه کردند (Harraz, 1995; Gong et al., 2016). از آن به بعد تاکنون پژوهش‌های متعددی در ارتباط با منطقه‌بندی عناصر در کانسارهای گرمابی در جهان (Li et al., 1995; Harraz, 1995; Yongqing and Pengda, 1998; Wang et al., 2013; Gong et al., 2016) و ایران (Atapour, 2017; Parsapoor et al., 2017; Talesh, 2018) انجام شده است.

در ایران، اغلب کانسارهای مس پورفیری شناخته شده، طی ترشیری و در ارتباط با فروورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی در طی کوه‌زایی آلپین شکل گرفته‌اند (Berberian and King, 1981; Hezarkhani, 2002; Hezarkhani, 2006; Shahabpour, 2007). در نتیجه این فروورانش، کانسارهای متعددی در مناطق مختلف ایران به‌ویژه در مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر (Alavi, 1994, 2004) شکل گرفته است که از آن جمله می‌توان به کانسارهای مس پورفیری تشکیل شده در کمربند مس پورفیری کرمان اشاره کرد. کمربند مس پورفیری کرمان، مهم‌ترین زون کانی‌سازی فلزی در ایران است که در بخش جنوبی ارومیه دختر واقع شده است و در آن کانسارهای بسیار ارزشمندی همچون سرچشمه (Shahabpour and Kramers, 1987; Hezarkhani, 2006) به‌همراه میدوک (Taghipour et al.,



شکل 1. A: موقعیت کنسار چاهمسی بر روی نقشه ساده‌شده تقسیمات ساختاری ایران، نقل با تغییرات از محجل و همکاران (Mohajjel et al., 2003) و B: نقشه زمین‌شناسی کلی منطقه مورد بررسی، نقل با تغییرات از دیمتریویچ و همکاران (Dimitrijevic et al., 1971)

Fig. 1. A: Simplified structural map of Iran showing the location of Chah-Mesi ore deposit (after Mohajjel et al., 2003), and B: General geological map of the study area (after Dimitrijevic et al., 1971).



شکل 2. چهارگوش کلیه نقشه‌های هم‌عیار ترسیم‌شده در کانسار چاه‌مسی که بر روی آن موقعیت گمانه‌های حفاری‌شده و محدوده اصلی کانه‌زایی نشان داده شده است. واحدهای سنگی بر اساس شرکت مهندسين مشاور کان‌ایران (Kan Iran Consulting Engineers, 2006) است.

Fig. 2. The quadrangle of all drawn isoconcentration maps, showing the location of drilled boreholes and the main mineralization zones in the Chah-Mesi ore deposit. The rock units are based on Kan Iran Consulting Engineers, 2006.

شده‌اند (شکل A-3). طول رگ‌ها از 100 تا 400 متر و ضخامت آنها از کمتر از 0/5 تا 10 متر متغیر است و رگ‌ها آشکارا ساختار باز و بسته¹ به نمایش می‌گذارند؛ به‌طوری‌که ضخامت رگ‌ها در امتداد طول و شیب تغییر می‌کند (Modrek, 2009). بر اساس پژوهش غیاثی فتح‌آباد (Ghyasi Fathabad, 2012)، جای‌گیری کانسار چاه‌مسی به‌شدت تابع عوامل ساختاری مرتبط با گسل‌های نرمال با مؤلفه امتداد لغزی و با الگوی مزدوج نامتقارن است.

دگرسانی گرمابی در کانسار چاه‌مسی، اغلب در امتداد رگ‌های اصلی مشاهده می‌شود و با دور شدن از رگ‌ها، شدت آن به‌طور بارزی کاهش می‌یابد. دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک (رسی) در ارتباط با تشکیل کانسنگ است و تا فاصله کمی از رگ‌ها گسترش یافته است و همراه با آن آزوریت، مالاکیت، کالکوسیت و اکسیدهای آهن دیده می‌شود. گسترش زون‌های گسلی و به تبع آن رگ‌ها و دگرسانی گرمابی در پله‌های جنوبی پیت اصلی معدن بیشتر است؛ درحالی‌که در پله‌های شمالی پیت، بیشتر دگرسانی در ارتباط با سنگ‌های میزبان دیده می‌شود (شکل B-3). دگرسانی عمده در سنگ‌های میزبان رگ‌ها از نوع پروپیلیتیک، با کانی‌شناسی کلسیت-کلریت است که تمام سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار داده است؛ اما ارتباط آشکاری با کانی‌سازی ندارد. رگ‌های دارای میزان کانه بیشتر، دگرسانی شدیدتری را متحمل شده‌اند؛ درحالی‌که رگ‌های با محتوای سیلیس بیشتر و کانه‌زایی ضعیف‌تر، با توپوگرافی برجسته‌تر به‌خوبی حفظ شده‌اند. رگ‌ها به‌صورت متعدد و متوالی تزیق شده و همدیگر را قطع کرده‌اند (شکل C-3). لیمونیتی‌شدن به‌علت حضور سولفیدها در رگ‌های کوارتز بسیار معمول است و همراه با آن، کانی مالاکیت و آزوریت نیز دیده می‌شود (شکل D-3).

پتروگرافی و کانه‌نگاری

بررسی‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های کانسار چاه‌مسی نشان می‌دهد که سنگ‌های میزبان موجود در منطقه شامل سنگ‌های

هدف از این پژوهش، بررسی فراوانی و نحوه توزیع عناصر فلزی مس، مولیبدن، آهن، سرب، روی، طلا و نقره موجود در کانسار چاه‌مسی است. با بررسی دقیق ژئوشیمیایی توزیع این عناصر در کانسار چاه‌مسی می‌توان به تفاوت‌های موجود در عیار عناصر در بخش‌های مختلف کانسار پی‌برد که در این صورت می‌تواند از نظر اقتصادی ارزشمند باشد. از اهداف دیگر این پژوهش، بررسی ارتباط بین عناصر مس، مولیبدن، آهن، سرب، روی، طلا و نقره در کانسار چندفلزی چاه‌مسی است.

روش مطالعه

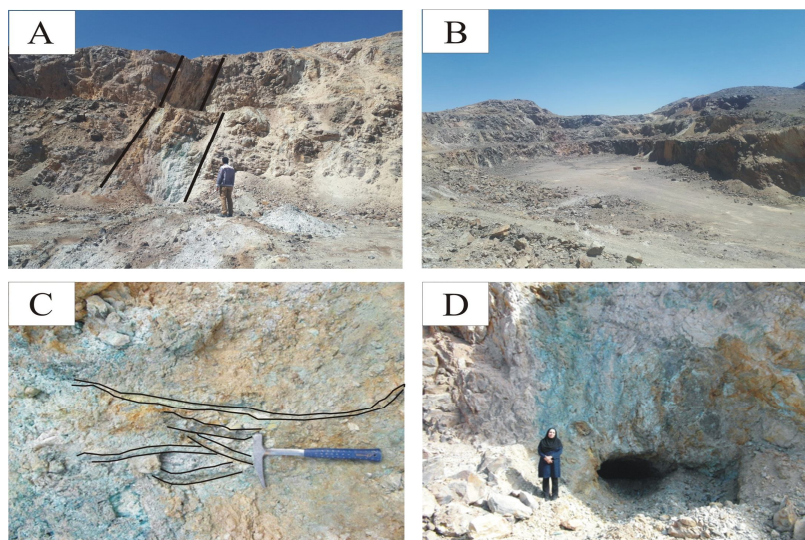
برای رسیدن به اهداف موردنظر، پس از انجام بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری سطحی از منطقه، تعداد 30 عدد مقطع نازک و 10 عدد مقطع صیقلی از نمونه‌هایی با جنس و دگرسانی متنوع تهیه شد و توسط میکروسکوپ پلاریزان المپوس مدل BH-2 در آزمایشگاه سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری دانشگاه شهید باهنر کرمان مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام بررسی‌های ژئوشیمیایی و بررسی توزیع آماری و همین‌طور توزیع مکانی و نحوه پراکندگی عناصر نیز از بیش از 980 داده تجزیه شیمیایی مربوط به 35 مورد گمانه حفاری متعلق به شرکت ملی صنایع مس ایران استفاده شد. سپس تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی توسط نرم‌افزارهای (Excel 2010)، (SPSS 19)، (Surfer10) و (Datamine Studio3.22.84.0) (2011) انجام شد.

بررسی‌های صحرایی

کانسار چاه‌مسی متشکل از چهار رگه اصلی سیلیسی چندفلزی به‌همراه تعدادی رگه فرعی با روند تقریبی شمال‌شرق-جنوب‌غرب و شمالی-جنوبی با شیب تقریبی 65-80 درجه است که درون توالی‌های گدازه و مواد آذرآواری ائوسن نفوذ کرده‌اند و کانی‌سازی اغلب در امتداد رگ‌های سیلیسی رخ داده است (شکل 2). این رگ‌ها در امتداد زون‌های گسلی واقع

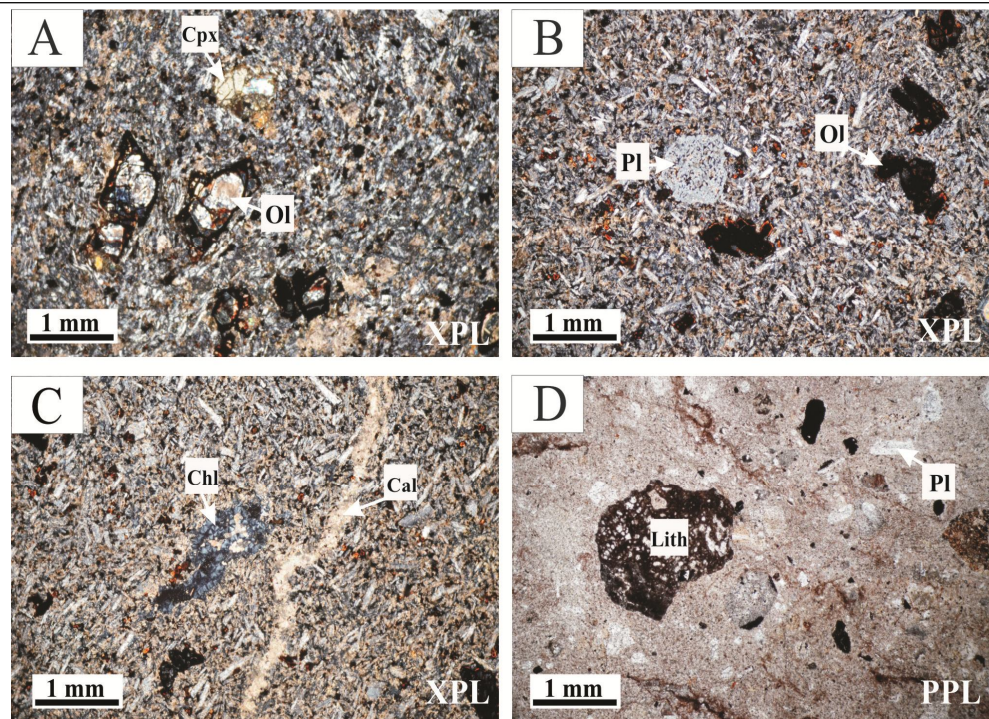
در متن سنگ حضور دارند (شکل C-4). وجود بافت بادامکی در سنگ‌های آتشفشانی بیانگر گازدار بودن ماگمای تشکیل‌دهنده آنهاست (Mohammadi et al., 2019). واحد سنگی توف به علت وجود اکسیدهای آهن در رخنمون‌های سطحی به رنگ قرمز دیده می‌شود. بر اساس بررسی‌های پتروگرافی، این واحد حاوی قطعات خرده‌سنگی فراوان از جنس سنگ‌های آتشفشانی بازیک تا حدواسط همراه با خرده‌های بلوری زاویه‌دار با ترکیب کانی‌شناسی اغلب پلاژیوکلاز هستند (شکل D-4). با توجه به درصد حضور قطعات سنگی و بلورها می‌توان آنها را در دو گروه توف بلورین-سنگی و توف سنگی-بلورین گروه‌بندی کرد. با توجه به بافت غیرمنسجم این سنگ‌ها در مقایسه با گدازه‌های آتشفشانی، شدت دگرسانی در این سنگ‌ها به مراتب بسیار بیشتر است.

آتشفشانی از نوع بازالت و آندزیت به ازالتی و سنگ‌های آذرآواری از نوع توف است که در این میان، حجم بازالت از بقیه سنگ‌ها بیشتر است. واحدهای میزان بازالت و آندزیت بازالتی دارای رنگ رخنمون خاکستری متوسط تا تیره و بافت پورفیری تا گلوپورفیری در زمینه‌ای ریزدانه متشکل از میکرولیت‌های پلاژیوکلاز همراه یا بدون شیشه آتشفشانی دیده می‌شوند. فنوکریست‌های موجود در این واحد، شامل الیوین و کلینوپروکسن همراه با مقادیر کمتری پلاژیوکلاز است که در آنها الیوین به شدت دگرسان شده است و نشانه این امر در منطقه تبدیل بخشی تا کامل الیوین‌ها به اکسید آهن در قالب فرایند ایدینگزیتی شدن است (شکل A-4 و B). فنوکریست‌های پلاژیوکلاز نیز گاهی بافت غربالی نشان می‌دهند (شکل B-4). واحدهای آندزیت بازالتی مشابه واحدهای بازالتی هستند؛ با این تفاوت که در آنها الیوین مشاهده نمی‌شود. کلسیت و کلریت نیز چه به صورت رگه‌ای و یا پرکننده حفره‌ها و یا به صورت پراکنده



شکل 3. عوارض صحرایی مشاهده‌شده در کانسار چاه‌مسی، A: تصویری از یکی از زون‌های گسله اصلی در پله‌های جنوبی پیت معدن که دگرسانی شدید همراه با کانسارسازی نشان می‌دهد. B: نمایی از پله‌های بخش شمال‌غربی که دارای دگرسانی و کانه‌زایی کمتر در قیاس با پله‌های جنوبی است، C: رگه‌های سیلیسی متعدد که یکدیگر را قطع کرده‌اند و کانسارسازی اغلب در ارتباط با همین رگه‌ها رخ داده است و D: دهانه ورودی تونل اکتشافی موجود در منطقه و وجود کانی‌های آزوریت، مالاکیت، کالکوسیت و انواع اکسیدهای آهن

Fig. 3. Field phenomena observed in the Chah-Mesi ore deposit, A: One of the main fault zones in the southern steps of the pit, showing intense alteration together with mineralization, B: A view of the steps in the northwestern part with minor alteration and mineralization in comparison to the southern steps, C: Prominent cross-cutting quartz veins. The mineralization is mainly associated with these veins, and D: The entrance of the exploratory tunnel in the study area with azurite, malachite, chalcocite and various iron oxides

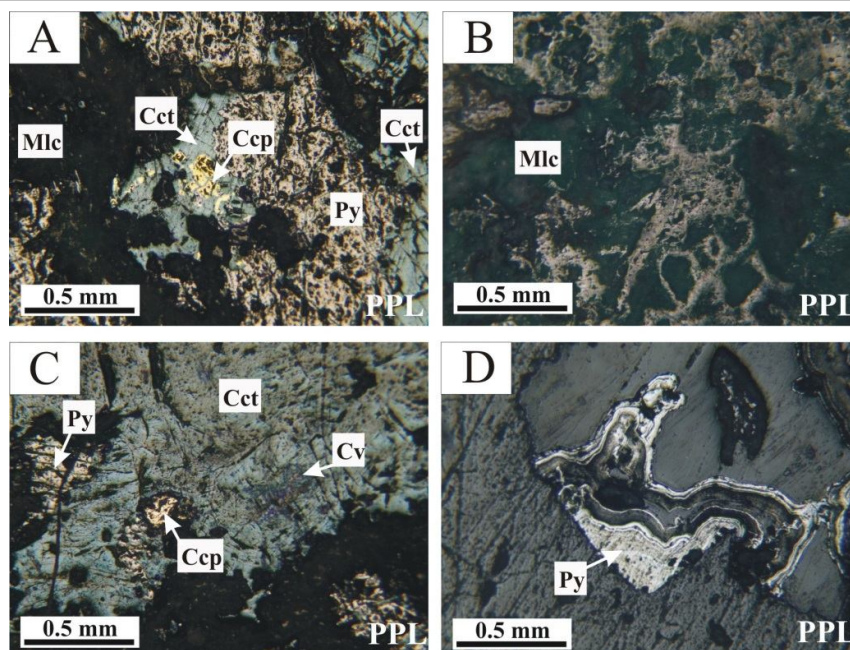


شکل 4. تصاویر میکروسکوپی نور عبوری سنگ‌های میزبان کانسار چاه‌مسی، A: واحد بازالت پورفیری حاوی فنوکریست‌های الیوین و کلینوپروکسن در زمینه‌ای متشکل از میکرولیت‌های پلاژیوکلاز نسبتاً جریان‌یافته همراه با کانی‌های کوچک کدر و الیوین و پیروکسن. دگرسانی ایدینگزیتی و کربناتی نسبتاً شدید در نمونه گسترش‌یافته است، B: بلورهای ایدینگزیتی‌شده الیوین همراه با پلاژیوکلاز با بافت غربالی در زمینه با بافت اینترگرانولار در سنگ‌های بازالتی، C: وجود کلسیت به‌عنوان کانی دگرسانی غالب همراه با کلریت در یک سنگ آتشفشانی و D: واحد توف بلورین-سنگی دارای قطعات خرده‌سنگ همراه با قطعات بلورهای پلاژیوکلاز. علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است: Ol: الیوین، Cpx: کلینوپروکسن، Pl: پلاژیوکلاز، Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Lith: خرده‌سنگ، PPL: نور قطبی. صفحه‌ای، XPL: نور قطبی).

Fig. 4. Transmitted-light microphotographs of the Chah-Mesi ore deposit host rocks, A: Porphyritic basalts composed of olivine and clinopyroxene phenocrysts in a groundmass containing plagioclase microliths (defining a flow texture), small grains of opaque, olivine and pyroxene. The Iddingsitization and carbonatization strongly developed in the sample, B: Intergranular texture in basalt which consists of iddingsitized olivine crystals and sieve texture plagioclase, C: Calcite with chlorite as the dominant alteration products in a volcanic rock, and D: Crystal lithic tuff comprised of lithic fragments and plagioclase crystals. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ol: Olivine, Cpx: Clinopyroxene, Pl: Plagioclase, Cal: Calcite, Chl: Chlorite, Lith: Lithic fragment, PPL: Plane polarized light, XPL: Cross polarized light).

اغلب با هیدروکسیدهای آهن نظیر لیمونیت و گوتیت همراه هستند (شکل A-5، B و C). همچنین، بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، کانی‌های سولفیدی اغلب به‌صورت بی‌شکل بوده و اغلب در کنار هم به‌صورت تجمعی و گاه به‌صورت مجزا رشد کرده‌اند. در برخی مقاطع، پیریت به‌صورت کلوفرم نیز دیده می‌شود (شکل D-5).

بررسی کانه‌نگاری نشان می‌دهد که در محدوده چاه‌مسی کانی‌های پیریت و کالکوپیریت، سولفیدهای اصلی هستند (شکل A-5) و گالن و اسفالریت در مقادیر کمتری حضور دارند. همچنین در رخنمون‌های سطحی به‌علت عملکرد فرایندهای هوازدگی، مقادیر قابل توجهی کالکوسیت و ملاکیت همراه با مقادیر کمتری کوولیت و آزوریت دیده می‌شود که



شکل 5. تصاویر میکروسکوپی نور انعکاسی نمونه‌های سطحی کانسار چاه‌مسی، A: کالکوپیریت و پیریت که از حاشیه تبدیل به کالکوسیت شده‌اند. علاوه بر این، مالاکیت نیز همراه با اکسید آهن دیده می‌شود، B: توسعه مالاکیت به علت عملکرد فرایندهای هوازدگی، C: توسعه کالکوسیت و کوولیت در حاشیه پیریت و کالکوپیریت در زون سوپرژن و D: پیریت کلوفرم در نمونه‌ها. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ccp: کالکوپیریت، Py: پیریت، Cct: کالکوسیت، Mlc: مالاکیت، Cv: کوولیت، PPL: نور قطبی صفحه‌ای).

Fig. 5. Reflected-light microphotographs of surface samples from the Chah-Mesi ore deposit, A: Chalcopyrite and pyrite, converted to chalcocite on the margins. Malachite and iron oxide are also occurred, B: Development of malachite due to weathering processes, C: Growth of Chalcocite and covellite on the margins of pyrite and chalcopyrite in the supergene zone, D: Colloform pyrite in the samples. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ccp: Chalcopyrite, Py: Pyrite, Cct: Chalcocite, Mlc: Malachite, Cv: Covellite, PPL: Plane polarized light).

ژئوشیمی

همان‌طور که در گذشته نیز بیان شد، برای انجام تحلیل‌های آماری و بررسی توزیع مکانی عناصر، داده 984 تجزیه شیمیایی مربوط به 35 مورد گمانه حفاری متعلق به شرکت ملی صنایع مس ایران که هر کدام شامل آنالیز 7 عنصر فلزی می‌شد، مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس گزارش‌های موجود، برای انجام آنالیزها، مغزه‌های حفاری به طول میانگین 2 متر، به دو نیم شده و بعد از خردایش، همگن‌سازی و نرمایش، نمونه‌های معرف انتخاب شده و برای انجام آنالیز به روش ICP-ES به آزمایشگاه زرآرما ماهان ارسال شده‌اند. شکل 2، موقعیت گمانه‌های حفاری شده در محدوده چاه‌مسی را نشان می‌دهد.

پردازش‌های آماری

ماتریس همبستگی

در این پژوهش، در ابتدا برای بررسی همبستگی بین عناصر مختلف، ضرایب همبستگی بر اساس روش پیرسون محاسبه شد که با توجه به تعداد بالای تجزیه‌های شیمیایی انجام شده (984 نمونه)، استفاده از این روش، محاسبه ضریب همبستگی، مانعی ندارد (جدول 1). با بررسی ضرایب همبستگی عناصر Cu، Mo، Ag، Au، Zn، Pb و Fe در منطقه چاه‌مسی، مشخص می‌شود که بیشترین میزان ضریب همبستگی مربوط به عناصر Pb-Zn و Ag-Au با میزان بیشتر از 0/7 است که مقادیر قابل توجهی هستند. این مسئله با توجه به تشابهات ژئوشیمیایی عناصر یادشده

از منشأ مشترک آنها دارد؛ درحالی‌که عنصر مس با زوج عناصر Pb-Zn و عنصر Mo همبستگی ضعیفی نشان می‌دهد که به‌خوبی بیانگر نقش فرایندهای مختلف در توزیع این عناصر است؛ به‌طوری‌که به‌نظر می‌رسد پراکندگی ژئوشیمیایی مجموعه عناصر Cu-Fe-Au-Ag باید تحت عوامل ژئوشیمیایی متفاوتی از زوج عناصر Pb-Zn و عنصر Mo بوده باشد.

کاملاً مورد انتظار است. در درجه بعدی اهمیت زوج عناصر Cu-Au، Cu-Fe، Cu-Ag و Fe-Ag با میزان ضریب همبستگی بیشتر از 0/6 قرار می‌گیرند. ضریب همبستگی بالای مس و آهن با توجه به حضور کانی کالکوپیریت به‌عنوان یکی از کانه‌های اصلی موجود در معدن چاه‌مسی، کاملاً مورد انتظار است. ضریب همبستگی بالای عناصر Au و Ag با مس نیز نشان

جدول 1. ماتریس همبستگی بین عناصر کمیاب و کانساری مختلف در کانسار چاه‌مسی

Table 1. Correlation matrix of different trace and ore elements in the Chah-Mesi ore deposit

	Ag(ppm)	Fe%	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Au (ppm)	Mo (ppm)	Cu%
Cu%	.676**	.625**	.081*	.093**	.609**	.350**	1
Mo (ppm)	.331**	.289**	.240**	.247**	.364**	1	
Au (ppm)	.736**	.570**	.087*	.157**	1		
Pb (ppm)	.430**	.086**	.775**	1			
Zn (ppm)	.321**	.147**	1				
Fe%	.627**	1					
Ag(ppm)	1						

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

تحلیل، به‌خوبی با نتایج حاصل از محاسبه ضرایب همبستگی همخوانی دارد.

بررسی تغییرات عمودی عناصر فلزی مختلف در گمانه‌های انتخابی

برای بررسی تغییرات عمودی ژئوشیمیایی عناصر فلزی در کانسار چاه‌مسی، تعداد چهار گمانه که متعلق به قسمت‌های مختلف کانسار هستند و در عین حال در آنها آنالیزهای عناصر کمیاب کانساری کامل‌تر انجام شده است، مورد بررسی قرار گرفت (شکل 2). بدین صورت که داده‌های مربوط به این گمانه‌های انتخابی، پس از انجام تصحیحات عمقی در نرم‌افزار Datamine، به محیط Excel وارد و نمودار توزیع عمقی عناصر فلزی ترسیم شد (شکل‌های 7 و 8).

نمودارهای آماری چند متغیره (تحلیل خوشه‌ای)

بر اساس تحلیل خوشه‌ای نمونه‌های کانسار چاه‌مسی، خط برش در مقیاس 10 واحد بر مبنای بیشترین فاصله، چهار خوشه اصلی فراهم می‌آورد که عناصر Pb و Zn در خوشه اول، Mo در خوشه دوم، Cu، Fe و Ag در خوشه سوم و در نهایت Au در خوشه چهارم قرار می‌گیرد (شکل 6). با وجودی که عناصر Mo و Au هر کدام به‌صورت جداگانه خوشه‌های مجزایی را تشکیل داده‌اند؛ اما Au هنوز نزدیکی‌هایی را با خوشه سوم که شامل عناصر Cu، Fe و Ag است، نشان می‌دهد که این مسئله می‌تواند بیانگر ارتباط پارازنتیکی این عناصر باشد. اما عنصر Mo در خوشه دوم بیشترین عدم تشابه را با خوشه‌های دیگر نشان می‌دهد که بیانگر آن است که عوامل کنترل‌کننده عیار این عنصر با دیگر عناصر متفاوت بوده است. نتایج حاصل از این

آهن همراه است؛ اما در عمق 180 متری، افزایش سرب و روی فزاینده‌تر از دیگر عناصر فلزی است (شکل 8).

گمانه CHM-08 فقط در ترازهای سطحی افزایش جزئی عیار مس و دیگر عناصر فلزی را نشان می‌دهد و به طرف عمق، عیار اغلب عناصر کاهش یافته است و در حد زمینه می‌شود. به نظر می‌رسد این گمانه از لحاظ مس چندان ارزشمند نیست؛ اما در قسمت‌های سطحی به علت فراوانی رگه‌های حاوی کانه‌زایی دیگر عناصر فلزی و به‌ویژه سرب، روی و نقره، عیارهای قابل توجهی از عناصر یادشده دیده می‌شود (شکل 8).

در گمانه CHM-12 بیشترین عیار مس در اعماق 80–100، 260–285 و 320 و 370 متری دیده می‌شود. با توجه به آنکه میزان طلا و نقره برای بخش‌های زیادی از این گمانه اندازه‌گیری نشده است، امکان قضاوت درباره این دو عنصر به‌ویژه در بخش‌های عمقی‌تر گمانه وجود ندارد (شکل 7).

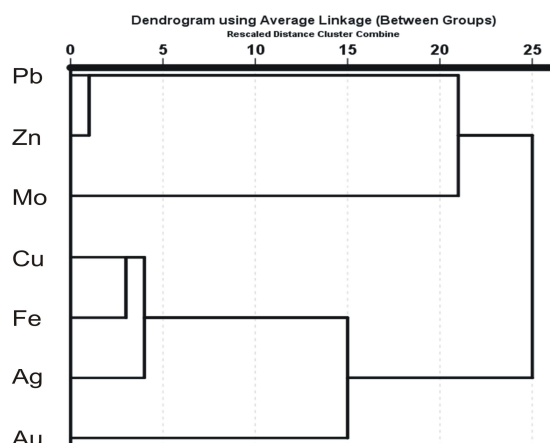
با بررسی توزیع عمقی عناصر در گمانه‌های انتخاب‌شده و با توجه به اینکه کانسار چاه‌مسی از نوع رگه‌ای است، نوسانات عیار عناصر با افزایش عمق کاملاً مورد انتظار است. البته با توجه به اینکه میزان افزایش عناصر در اعماق مختلف از الگوی یکنواختی پیروی نمی‌کند، به‌خوبی می‌توان پی‌برد که نوع کانسارسازی رگه‌ها و درصد وجود کانه‌های مختلف در تمامی رگه‌ها مشابه نیست.

مقایسه این چهار بیانگر آن است که عیار اغلب عناصر در گمانه‌های CHM-03 و CHM-12 از دو گمانه دیگر بیشتر است. با توجه به محل حفر این دو گمانه که تقریباً نزدیک محدوده اصلی کانسار است (شکل 2)، چنین نتیجه‌ای کاملاً قابل انتظار و نشانه کانه‌زایی شدید است. در صورتی که گمانه‌های CHM-04 و CHM-08 خارج از محدوده اصلی کانسارسازی واقع هستند و کانه‌زایی در آنها ضعیف است (شکل 2).

نتایج بررسی‌ها در هریک از این چهار گمانه و مقایسه آنها به شرح زیر است:

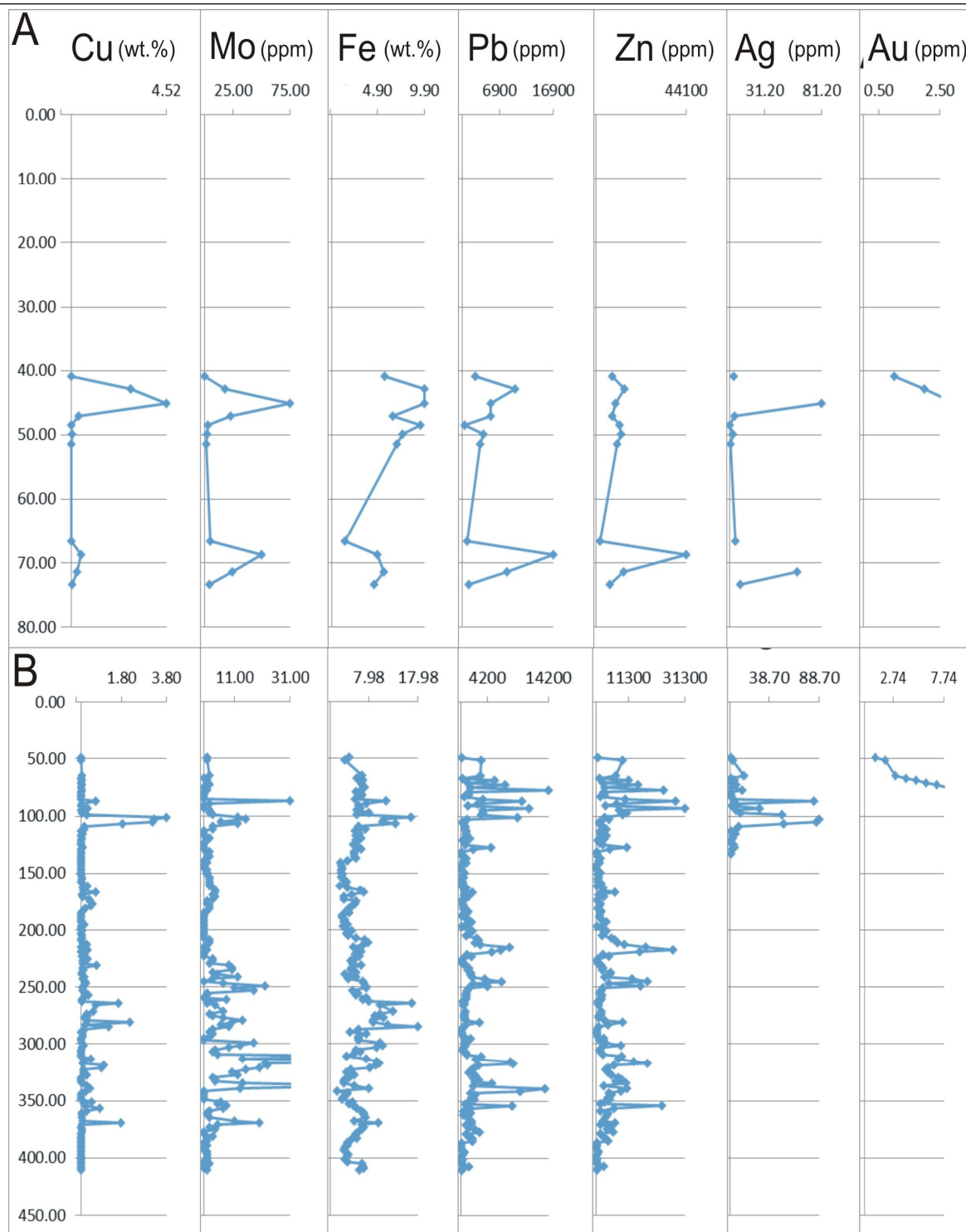
در گمانه شماره CHM-03 بیشترین میزان مس در عمق 45 متری گمانه مشاهده می‌شود که انطباق قابل توجهی با میزان طلا، نقره، آهن و مولیبدن و به میزان کمتر سرب و روی دارد. یک فراوانی کوچک‌تر مس نیز در عمق 70 متری دیده می‌شود که با افزایش عناصر فلزی دیگر به‌خوبی منطبق است؛ اما در عمق 70 متری افزایش سرب و روی بسیار واضح‌تر از عمق 45 متری است (شکل 7).

در گمانه CHM-04 نتایجی قابل مقایسه با گمانه CHM-03 به‌دست آمد؛ به‌طوری‌که در اعماق 20 و 60 متری، افزایش فزاینده مس به‌خوبی با افزایش قابل توجه طلا، نقره، مولیبدن و



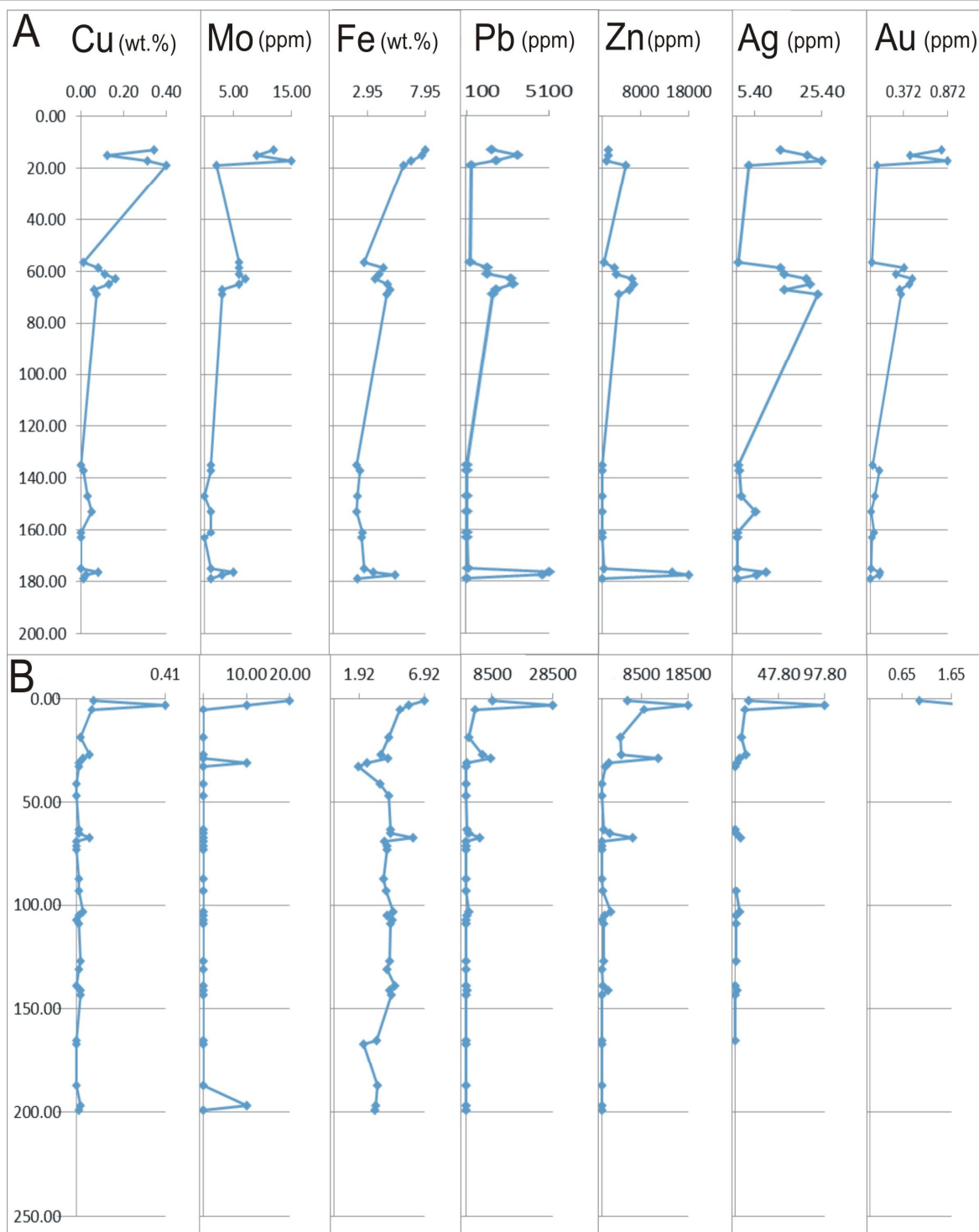
شکل 6. دندروگرام عناصر کمیاب و کانساری در کانسار چاه‌مسی

Fig. 6. Dendrogram of trace and ore elements in the Chah-Mesi ore deposit



شکل 7. منطقه‌بندی قائم عناصر کمیاب و کانساری در گمانه‌های حفاری انتخاب‌شده مربوط به بخش کانه‌زایی شدید کانسار چاه مسی، A: گمانه شماره CHM-03 و B: گمانه شماره CHM-12

Fig. 7. Vertical zonality of trace and ore elements in the drilled boreholes selected from the highly mineralized part for the Chah-Mesi ore deposit, A: Borehole No. CHM-03, and B: Borehole No. CHM-12



شکل 8. منطقه‌بندی قائم عناصر کمیاب و کانساری در گمانه‌های حفاری انتخاب‌شده مربوط به بخش کانه‌زایی ضعیف کانسار چاه مسی، A: گمانه شماره CHM-04 و B: گمانه شماره CHM-08

Fig. 8. Vertical zonality of trace and ore elements in the drilled boreholes selected from the weakly mineralized part of the Chah-Mesi ore deposit, A: Borehole No. CHM-04, and B: Borehole No. CHM-08

بررسی توزیع مکانی و نحوه پراکندگی عناصر فلزی در کانسار چندفلزی چاه‌مسی

رسم نقشه‌های هم‌عیار، دید واضح‌تری را نسبت به پراکندگی عناصر و نحوه توزیع مکانی آنها به دست می‌دهد. برای ترسیم نقشه‌ها، به علت اختلاف ارتفاع دهانه گمانه اکتشافی و نیز روند متفاوت حفاری گمانه‌های مختلف، در ابتدا کلیه داده‌های مربوط به گمانه‌ها با توجه به مختصات ژئومتری حفاری آنها، وارد محیط نرم‌افزار Datamine شدند و سپس تصحیحات ارتفاعی با موقعیت‌های جغرافیایی جدید برای هر داده انجام شد. در ادامه، داده‌های تصحیح‌شده وارد نرم‌افزار Excel شد و با فیلتر کردن داده‌ها، داده‌های حفاری موجود از پایین‌ترین افق حفاری‌شده (افق 2275 متر) تا بالاترین افق (افق 2525 متر) به صورت بازه‌های 50 متری تفکیک شد. در ادامه با میانگین‌گیری از هر بازه، در نهایت میانگین عیار عناصر برای ترازهای مختلف معدن به صورت زیر به دست آمد:

1) افق 2475 تا 2525 متر با نقطه میانگین 2500 متر به عنوان سطحی‌ترین افق؛

2) افق 2425 تا 2475 متر با نقطه میانگین 2450 متر؛

3) افق 2375 تا 2425 متر با نقطه میانگین 2400 متر؛

4) افق 2325 تا 2375 متر با نقطه میانگین 2350 متر؛
5) افق 2275 تا 2325 متر با نقطه میانگین 2300 متر به عنوان عمقی‌ترین افق.

در ادامه با انتقال داده‌ها به محیط نرم‌افزار Surfer و رسم منحنی‌های هم‌عیار، توزیع عناصر فلزی مختلف در هر تراز کانسار مورد بررسی قرار گرفت.

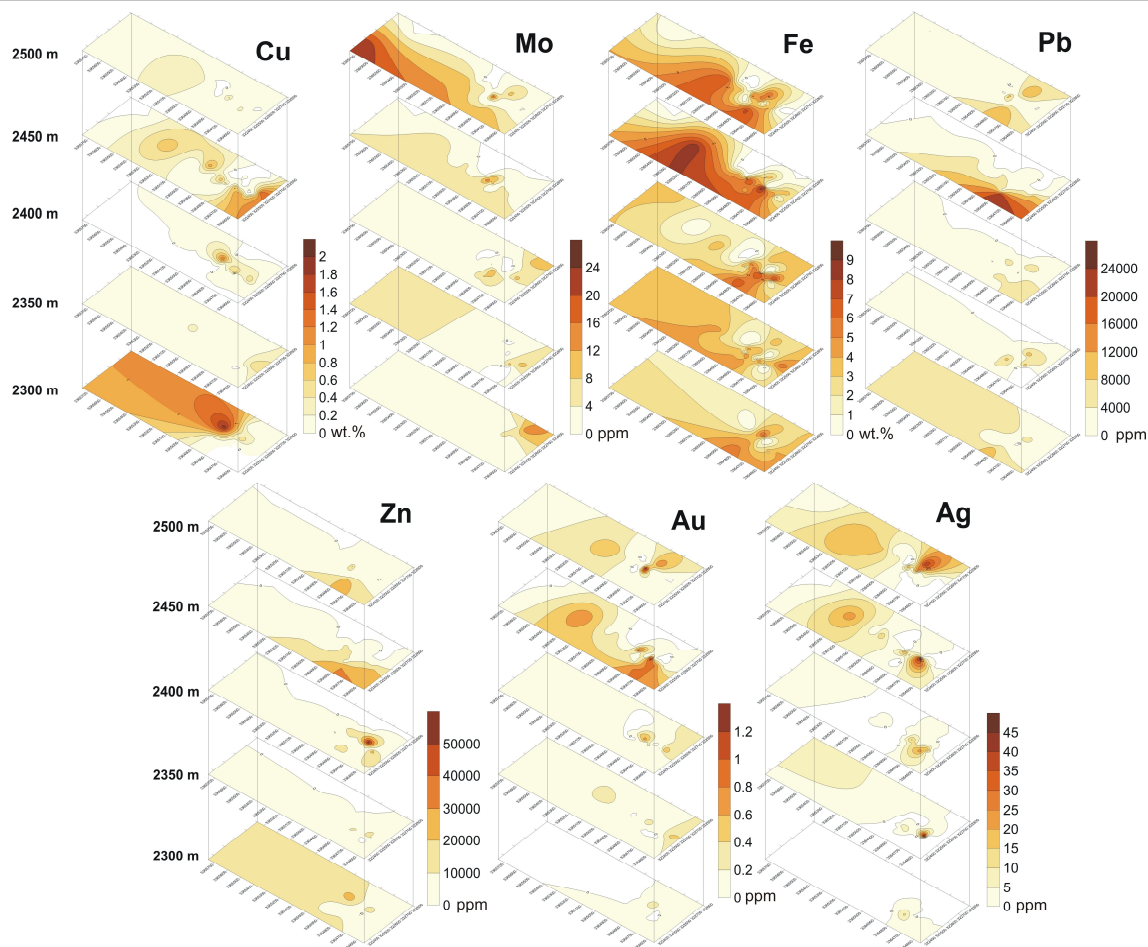
در تمامی نقشه‌ها برای یکسان‌سازی و امکان مقایسه صحیح نقشه‌های مربوط به ترازهای مختلف کانسار، یک چهارگوش واحد لحاظ شد که شامل محدوده اصلی کانه‌زایی همراه با بخش‌هایی از نواحی اطراف است که احتمال کانه‌زایی وجود دارد. موقعیت این چهارگوش و همین‌طور محدوده اصلی کانه‌زایی در شکل 2 نشان داده شده است.

بررسی تغییرات عمودی عناصر فلزی مختلف در گمانه‌های منتخب بیانگر آن است که بیشترین مقدار عنصر مس در عمیق‌ترین قسمت حفاری‌شده است (جدول 2 و شکل 9) که این موضوع اهمیت ادامه عملیات حفاری را نشان می‌دهد؛ چرا که احتمال وجود عیارهای قابل قبول در عمق بیشتر هنوز حداقل در بخش جنوبی کانسار چاه‌مسی وجود دارد.

جدول 2. حداکثر عیار میانگین عناصر در افق‌های مختلف در کانسار چاه‌مسی

Table 2. Maximum average concentration of elements from different levels in the Chah-Mesi ore deposit

Element	Maximum concentration	Maximum concentration level (meter)
Cu	1.91 wt. %	2300
Mo	23.14 ppm	2500
Fe	8.67 wt. %	2450
Pb	2.37 wt. %	2450
Zn	5.39 wt. %	2400
Au	1.30 ppm	2500
Ag	43.8 ppm	2450



شکل 9. مدل‌های توزیع سه بعدی عناصر کمیاب و کانساری در کانسار چاه‌مسی

Fig. 9. Three dimensional distribution models of trace and ore elements in the Chah-Mesi ore deposit

مسئله با الگوی منطقه‌بندی قابل‌انتظار در کانسارهای گرمابی در تناقض است؛ چرا که بر اساس نظر پژوهشگران مختلف، از جمله وانگ و همکاران (Wang et al., 2013)، گونگ و همکاران (Gong et al., 2016) و لی و همکاران (Li et al., 2016)، عیار مولیبدن باید در افق‌های زیرین افزایش یابد. به نظر می‌رسد، علت این مسئله را باید در ساختار رگه‌ای کانسار چاه‌مسی جستجو کرد؛ زیرا در کانسار چاه‌مسی، رگه‌های متعدد سیلیسی حاوی کانه‌زایی چندفلزی تزریق شده است و بر اساس نظر لی و همکاران (Li et al., 1995)، زمانی که تزریق رگه‌ای به صورت متعدد و در فواصل نزدیک به هم رخ داده باشد، شبیه به

میانگین عناصر سرب، روی و طلا اغلب در ترازهای سطحی‌تر کانسار مشهود است و با افزایش عمق، اغلب از میزان آن کاسته می‌شود (شکل 9) که این مسئله بیانگر اختلافاتی در روند تغییرات این عناصر با مس است. نحوه توزیع آهن و میزان تغییرات آن در افق‌های مختلف خیلی شدید نیست؛ اما با بیشترین مقدار میانگین عنصر نقره در افق‌های 2350، 2450 و 2500 متری دیده می‌شود (جدول 2 و شکل 9) که با توجه به عیار بالای آن، از لحاظ اقتصادی بسیار حائز اهمیت است.

میانگین عیار عنصر مولیبدن در معدن چاه‌مسی در بالاترین تراز یعنی تراز 2500 متری دیده می‌شود (جدول 2 و شکل 9) که این

آنچه که در کانسار چاه‌مسی دیده می‌شود، بخش زیرین هاله ژئوشیمیایی اولیه رگه بالایی می‌تواند با بخش بالایی هاله ژئوشیمیایی اولیه رگه پایینی هم‌پوشانی داشته باشد و این مسئله باعث می‌شود، هاله ژئوشیمیایی اولیه رگه‌ها در هم تداخل کرده و کار تفسیر بسیار پیچیده و در مواردی ناممکن شود. شبیه به چنین وضعیتی در رگه‌های سیلیسی حاوی کانه‌زایی فلزی در مناطق مختلف جهان گزارش شده است (Li et al., 1995, 2016). وجود نوسانات عیار عناصر مختلف در بررسی توزیع عمقی عناصر در گمانه‌های منتخب (شکل‌های 7 و 8) نیز به‌خوبی تقویت‌کننده هم‌پوشانی هاله ژئوشیمیایی اولیه رگه‌ها در کانسار چاه‌مسی است.

البته مسئله دیگری نیز که نباید از نظر دور داشت، رفتار ژئوشیمیایی متفاوت عنصر مولیبدن است. رفتار ژئوشیمیایی این عنصر به‌شدت متأثر از میزان پیریت، pH و درجه قلیائیت سیال است (Leanderson et al., 1987)؛ به‌طوری‌که در سیستم‌های گرمابی، فراوانی پیریت و افزایش H^+ ته‌نشست مولیبدن را در ترازهای مختلف کنترل می‌کند. نکته قابل اهمیت آن است که در کانسار چاه‌مسی، بیشترین میزان مولیبدن در تراز سطحی بخش شمال‌غربی نقشه‌های ژئوشیمیایی قرار می‌گیرد (شکل 9)؛ یعنی بخشی از نقشه که خارج از محدوده اصلی کانه‌زایی واقع شده است؛ اما در بخش جنوبی نقشه یعنی در محدوده اصلی کانه‌زایی چاه‌مسی، بیشترین عیار مولیبدن در ترازهای عمقی‌تر دیده می‌شود (شکل 9)، شبیه به آنچه که در کانسارهای گرمابی مورد انتظار است. این مسئله همراه با ضریب همبستگی ضعیف عنصر مولیبدن با سایر عناصر فلزی همگی این فرضیه را تقویت می‌کند که کنترل عیار عنصر مولیبدن به‌ویژه در بخش شمال‌غربی، متفاوت از سایر عناصر مورد بررسی و احتمالاً تحت تأثیر pH و درجه قلیائیت سیال بوده است. مشابه با چنین وضعیتی در کانسار دره‌زار نیز گزارش شده است؛ به‌طوری‌که پارساپور و همکاران (Parsapoor et al., 2017) نیز افزایش عیار مولیبدن در افق‌های سطحی کانسار دره‌زار را به افزایش فعالیت H^+ در طی تشکیل کانسار و یا بعد از آن مربوط

می‌دانند.

نتیجه‌گیری

1) بررسی‌های انجام‌شده در منطقه کانسار چاه‌مسی نشان می‌دهد که سنگ‌های میزبان موجود در منطقه شامل سنگ‌های آتشفشانی از نوع بازالت و آندزیت بازالتی با بافت پورفیری تا گلوپورپورفیری در زمینه‌ای ریزدانه و سنگ‌های آذرآواری از نوع توف بلورین-سنگی و توف سنگی-بلورین است که در این میان، حجم بازالت‌ها از بقیه سنگ‌ها بیشتر است.

2) در محدوده چاه‌مسی کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت سولفیدهای اصلی در ذخیره چاه‌مسی هستند. همچنین در مناطق سطحی به‌علت عملکرد فرایندهای ثانویه، مقادیر قابل توجهی کالکوسیت و مالاکیت همراه با مقادیر کمتری کوولیت و آزوریت دیده می‌شود که اغلب با هیدروکسیدهای آهن نظیر لیمونیت و گوتیت همراهی می‌شوند.

3) بررسی‌های صحرایی بیانگر آن است که کانه‌زایی در ارتباط با شکستگی‌های منطقه بوده است؛ به‌نحوی که کانسار با ساختار رگه‌ای توسعه‌یافته است. این شکستگی‌ها، زمینه را برای واکنش سیالات گرمابی با سنگ میزبان فراهم کرده و سبب ایجاد این ذخیره اقتصادی در ارتباط مستقیم با ساختارهای گسلی شده است.

4) با توجه به ماتریس همبستگی پیرسون، همبستگی مثبت و قوی بین عناصر سرب و روی، نقره و طلا و به میزان کمتر مس با نقره، آهن و طلا در کانسار چاه‌مسی نشان‌دهنده شرایط مشابه تشکیل و غنی‌شدگی این عناصر است. نتایج مشابهی نیز در بررسی توزیع مکانی عناصر به‌دست آمده است؛ به‌طوری‌که بیشترین میزان مس انطباق قابل توجهی با میزان طلا، نقره و آهن دارد؛ درحالی‌که افزایش سرب و روی اغلب با هم دیده می‌شود. همبستگی ضعیف عنصر مولیبدن با دیگر عناصر مورد بررسی به‌خوبی بیانگر نقش فرایندهای متفاوت در توزیع این عنصر است.

5) بررسی میانگین عیار عناصر در ترازهای 50 متری کانسار

کانه‌زایی مس و نقره، علاوه‌بر ترازهای سطحی، در ترازهای عمقی‌تر نیز دارای تمرکزهای قابل توجهی هستند. (7) بالا بودن میانگین عیار عنصر مولیبدن در ترازهای سطحی باید در ارتباط با هم‌پوشانی هاله‌های ژئوشیمیایی اولیه رگه‌های مختلف و یا تأثیر میزان پیریت، درجه pH و درجه قلیائیت سیال بوده باشد.

قدردانی

نویسندگان از کارکنان محترم معدن مس میدوک به‌علت فراهم آوردن امکان انجام بررسی‌های صحرایی و همچنین در اختیار گذاشتن نتایج آنالیزهای شیمیایی عناصر سپاسگزاری می‌نمایند.

چاه‌مسی از سطحی‌ترین تراز (2500 متر) تا عمقی‌ترین تراز (2300 متر) بیانگر آن است که بیشترین مقدار مس در عمیق‌ترین قسمت حفاری شده است که این مسئله، ادامه عملیات حفاری را پیشنهاد می‌کند؛ اما بیشترین مقدار میانگین عناصر سرب، روی و طلا در ترازهای سطحی‌تر مشهود است. بیشترین مقدار میانگین نقره نیز در افق‌های 2450، 2350 و 2500 متری دیده می‌شود.

(6) بررسی توزیع عمقی عناصر در گمانه‌های انتخابی، نشان‌دهنده نوسانات عیار عناصر با افزایش عمق است. به‌نظر می‌رسد فراوانی رگه‌های حاوی کانه‌زایی عناصر فلزی سرب، روی و طلا اغلب در ترازهای سطحی‌تر رخ داده است؛ درحالی‌که رگه‌های حاوی

References

- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z. and Zhou, L., 2015. Temporal-spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology. *Ore Geology Reviews*, 70: 385–406.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics*, 229 (3–4): 211–238.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros folded-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, 304(1): 1–20.
- Alirezaei, A., Arvin, M. and Dargahi, S., 2017. Adakite-like signature of porphyry granitoid stocks in the Meiduk and Parkam porphyry copper deposits, NE of Shahr-e-Babak, Kerman, Iran: Constraints on geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 88: 370–383.
- Atapour, H., 2017. The Exploration Significance of Ag/Au, Au/Cu, Cu/Mo, (Ag×Au)/(Cu×Mo) Ratios, Supra-ore and Sub-ore Halos and Fluid Inclusions in Porphyry Deposits: A Review. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 28(2): 133–146.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a pale paleogeography and Tectonic tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(11): 210–265.
- Beus, A.A. and Grigorian, S.V., 1977. *Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits*. Applied Publishing Limited, Wilmette, Illinois, 287 pp.
- Boomeri, M., Biabangard, H. and Zeinadini, Z., 2019. Investigation of petrography, mineralogy and alteration of northern part of the Chahfiruzeh porphyry copper deposit, northwest of Shar-e-Babak, Kerman. *Journal of Economic Geology*, 11(1): 57–80. (in Persian with English abstract)
- Broderick, T.M., 1929. Zoning in the Michigan copper deposits and its significance. *Economic Geology*, 24(2): 149–162.
- Brown, W.H., 1935. Quantitative study of ore zoning at the Austinville Mine, Wythe County, Virginia. *Economic Geology*, 30(4): 425–433.
- Chen, J., Chen, R.Y., Mao, Z.X., Yang, H.Z., Zhang, C.P. and Han, R.P., 2016. Regional mineral resources assessment based on rasterized geochemical data: a case study of porphyry copper deposits in Manzhouli, China.

- Ore Geology Reviews, 74: 15–25.
- Dimitrijevic, M.D., Dimitrijevic, M.N. and Diordjevic, M., 1971. Geological map of Shahe-e-Babak, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Ghyasi Fathabad, M., 2012. Evaluation and analysis of structural style of the Chahmesi deposit. M.Sc Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, 105 pp. (in Persian with English abstract)
- Golestani, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Haidarian Shahri, M.R., 2017. Characterization of fluid inclusions and sulfur isotopes in the Iju porphyry copper deposit, North West of Shahr-e-Babak. Journal of Economic Geology, 9(1): 25–55. (in Persian with English abstract)
- Golestani, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Haidarian Shahri, M.R., 2018. Geochemistry, U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of the Neogene igneous rocks, at the Iju porphyry copper deposit, NW Shahr-e-Babak, Iran. Ore Geology Reviews, 93: 290–307.
- Gong, Q., Yan, T., Li, J., Zhang, M. and Liu, N., 2016. Experimental simulation of element mass transfer and primary halo zone on water-rock interaction. Applied Geochemistry, 69: 1–11.
- Gross, W.H., 1956. The direction of flow of mineralizing solutions, Blykken Mine, Greenland. Economic Geology, 51(5): 415–426.
- Harraz, H.Z., 1995. Primary geochemical haloes, El Sid gold mine, Eastern Desert, Egypt. Journal of African Earth Sciences, 20(1): 61–71.
- Harraz, H.Z. and Hamdy, M.M., 2015. Zonation of primary haloes of Atud auriferous quartz vein deposit, Central Eastern Desert of Egypt: a potential exploration model targeting for hidden mesothermal gold deposits. Journal of African Earth Sciences, 101: 1–18.
- Hezarkhani, A., 2002. Specific physico-chemical conditions (360°C) for chalcopyrite dissolution/deposition in the Sungun porphyry copper deposit, Iran. Amirkabir Journal of Scientific and Research, 13(52): 668–687.
- Hezarkhani, A., 2006. Hydrothermal evolution of the Sar-Cheshmeh porphyry Cu-Mo deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions. Journal of Asian Earth Sciences, 28(4–6): 409–422.
- Hosseini-Dinani, H. and Aftabi, A., 2016. Vertical lithogeochemical halos and zoning vectors at Goushfil ZnPb deposit, Irankuh district, southwestern Isfahan, Iran: implications for concealed ore exploration and genetic models. Ore Geology Reviews, 72: 1004–1021.
- Kan Iran Consulting Engineers, 2006. Report on geological studies and alteration of the Chahmessi area. National Iranian Copper Industries Co., Tehran, 109 pp.
- Karimpour, M.H. and Sadeghi, M., 2019. A new hypothesis on parameters controlling the formation and size of porphyry copper deposits: Implications on thermal gradient of subducted oceanic slab, depth of dehydration and partial melting along the Kerman copper belt in Iran. Ore Geology Reviews, 104: 522–539.
- Leanderson, P.J., Schrader, E.L., Brake, S. and Kaback, D.S., 1987. Behavior of molybdenum during weathering of the Ceresco Ridge porphyry molybdenite deposit, Climax, Colorado and a comparison with the Hollister deposit, North Carolina. Applied Geochemistry, 2(4): 399–415.
- Li, H., Wang, Z.N. and Li, F.G., 1995. Ideal models of superimposed primary halos in hydrothermal gold deposits. Journal of Geochemical Exploration, 55(1–3): 329–336.
- Li, Y., Zhang, D., Dai, L., Wan, G. and Hou, B., 2016. Characteristics of structurally superimposed geochemical haloes at the polymetallic Xiasai silver-lead-zinc ore deposit in Sichuan Province, SW China. Journal of Geochemical Exploration, 169: 100–122.
- Mirzababaei, G., Shahabpour, J., Zarasvandi, A. and Hayatolghayb, S.M., 2016. Structural controls on Cu metallogenesis in the Dehaj Area, Kerman Porphyry Copper Belt, Iran: A remote sensing perspective. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, 27(3): 253–267.
- Modrek, H., 2009. Mineralization, alteration and nature of ore fluids in Chahmessi polymetallic deposit & its relation to Miduk porphyry copper deposit. M.Sc Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 174 pp. (in Persian with English abstract).

- Mohajjel, M., Fergusson, C.L. and Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision Sanandaj–Sirjan zone, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21(4): 397–412.
- Mohammaddoost, H., Ghaderi, M., Kumar, T.V., Hassanzadeh, J., Alirezaei, S., Stein, H.J. and Babu, E.V.S.S.K., 2017. Zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology, with S isotopic composition of sulfides from the Chah-Firouzeh porphyry Cu deposit, Kerman Cenozoic arc, SE Iran. *Ore Geology Reviews*, 88: 384–399.
- Mohammadi, M., Nabatian, G., Honarmand, M. and Ebrahimi, M., 2019. Geology and Origin of the Dohneh Copper Mineralization, Northeast of Zanjan. *Journal of Economic Geology*, 11(3): 497–524. (in Persian with English abstract)
- Parsapoor, A., Khalili, M. and Maghami, M., 2017. Discrimination between mineralized and unmineralized alteration zones using primary geochemical haloes in the Darreh-Zar porphyry copper deposit in Kerman, southeastern Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 132: 109–126.
- Shahabpour, J., 2007. Island-arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt. Island-arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt. *Journal of Asian Earth Science*, 30(5–6): 652–665.
- Shahabpour, J. and Kramers, J.D., 1987. Lead isotope data from the Sar-Cheshmeh porphyry copper deposit, Iran. *Mineralium Deposita*, 22 (4): 278–281.
- Shao, Y., 1997. Rock Measurements (Primary Halo Method) in the Hydrothermal Deposits Prospecting. Geological Publishing House, Beijing, China, 145 pp. (in Chinese)
- Sojodehee, M., Rasa, I., Nezafati, N., Abedini, M.V., Madani, N. and Zeinedini, E., 2015. Probabilistic modeling of mineralized zones in Daralu copper deposit (SE Iran) using sequential indicator simulation. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10): 8449–8459.
- Taghipour, N., Aftabi, A. and Mathur, R., 2008. Geology and Re–Os geochronology of mineralization of the miduk porphyry copper deposit, Iran. *Resource Geology*, 58(2): 143–160.
- Talesh Hosseini, S., Asghari, O. and Ghavami Riabi, S.R., 2018. Spatial modelling of zonality elements based on compositional nature of geochemical data using geostatistical approach: a case study of Baghqlloom area, Iran. *Journal of Mining and Environment*, 9(1): 153–167.
- Wang C., Carranza, E.J.M., Zhang, S., Zhang, J., Liu, X., Zhang, D., Sun, X. and Duan, C., 2013. Characterization of primary geochemical haloes for gold exploration at the Huanxiangwa gold deposit, China. *Journal of Geochemical Exploration* 124: 40–58.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Yongqing, C. and Pengda, Z., 1998. Zonation in primary halos and geochemical prospecting pattern for the Guilaizhuang gold deposit, eastern China. *Nonrenewable Resources*, 7(1): 37–44.
- Zarasvandi A., Samani B., Pourkaseb H., Khorsandi, Z. and Jalili, Y., 2015. Investigation of Regional Fractures and Cu Mineralization Relationships in the Khezrabad and Shahr-e-Babak Area: Using Fry and Fractal analysis. *Journal of Economic Geology*, 7(2): 385–402. (in Persian with English abstract)



Dispersion and distribution of trace and ore elements in the polymetallic vein-type Chah-Mesi ore deposit, north of Shahre-Babak

Sara Dargahi*, Maryam Sarvarizadeh and Mohsen Arvin

Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Submitted: Mar. 22, 2018

Accepted: Nov. 10, 2019

Keywords: *Correlation coefficient, Zonality, Vein-type ore deposits, Polymetal, Chah-Mesi, Urumieh-Dokhtar magmatic arc*

Introduction

The Chah-Mesi polymetallic vein-type ore deposit, located 40 km north of Shahre-Babak city and 1.5 km southwest of Miduk porphyry copper deposit, is situated in the Dehaj-Sarduieh belt as a part of the Urumieh–Dokhtar magmatic Arc (UDMA) (Figure 1).

The main objectives of this research study are to investigate: (1) characterization of multi-element distribution associated with Cu mineralization, in order to demonstrate prediction of elemental concentration applied to identify high-grade ore bodies, (2) evaluating the interrelationships between copper, molybdenum, iron, lead, zinc, gold and silver.

Materials and methods

Petrography and mineralography of the Chah-Mesi ore deposit were carried out using thin and polished sections. More than 980 chemical analyses of samples collected from 35 boreholes of the National Iranian Copper Industry Company (NICICO) were implemented to evaluate the statistical as well as spatial distribution and dispersion of multi-element halos. Geochemical data processing was performed by applying Excel (2010), SPSS (19), Datamine (Studio3.22.84.0) and Surfer10 (2011) software packages.

Results

The Chah-Mesi ore deposit consists of four main and some minor polymetallic (Cu-Pb-Zn-Ag) quartz-sulfide veins, with NE-SW and N-S

trending and 65-80 degree dipping, which intersected the Eocene volcanic and pyroclastic sequences (Figure 2). It seems that mineralization has mainly occurred along these quartz-sulfide veins overlaid by Quaternary alluvium. Based on rock outcrops, the prominent mineralization has been controlled by structural features including faults and fractures that provided proper conditions for reaction of hydrothermal fluids with the host rocks.

In the Chah-Mesi ore deposit, silicified veins containing poly-metallic mineralization have predominantly occurred along the main faults and shear zones. The intensity of argillic alteration dramatically decreases outward from the mineralized quartz veins (Figure 3). Propylitic alteration which is composed of calcite and chlorite minerals has extended in the peripheral zones and does not represent a clear relationship with Cu mineralization.

The main host rocks in the Chah-Mesi ore deposit consist of basalt to basaltic andesite, with porphyry to glomeroporphyry textures, and to a lesser extent of pyroclastic rocks (Figure 4). The ore bodies are mainly composed of pyrite, chalcopyrite, sphalerite and galena. The ore minerals are accompanied with chalcocite, malachite, covellite, azurite and iron hydroxides that have been formed during supergene and weathering processes (Figure 5). According to field surveys, structural controls have played an important role in the mineralization of the Chah-Mesi ore deposit.

*Corresponding author Email: s.dargahi@uk.ac.ir

Discussion

Geochemical investigation in the Chah-Mesi ore deposit, using Pearson correlation coefficient of trace elements (Table 1), indicated the highest correlation coefficient (more than 0.7) between Pb-Zn and Ag-Au elements, due to their similar geochemical affinities during epigenetic mineralization. Other significant correlations were observed between Cu-Ag, Cu-Fe, Cu-Au and Fe-Ag with a correlation coefficient of more than 0.6; while the Mo shows weak correlation with other elements.

Based on cluster analysis, the trace elements that are associated with mineralization can be classified into four main clusters of Pb-Zn, Mo, Cu-Fe-Ag and Au (Figure 6). Noteworthy, despite the fact that Mo and Au each separately form their individual clusters, Au still shows some proximities with the Cu-Fe-Ag cluster that indicate their genetic relationship. However, Mo displays the most dissimilarity with other clusters, which indicates the role of different processes in its distribution. The results of this analysis are well in line with correlation coefficients.

The geochemical vertical zonation of trace elements in the Chah-Mesi ore deposit were studied using four borehole data from different parts of the ore deposit (Figures 7 and 8). This demonstrated that variation of elements at different depths does not follow a uniform pattern due to differences in the type and amount of ore minerals in the veins.

The veins containing lead, zinc and gold mineralization are highly abundant at the shallower levels based on geochemical maps of the Chah-Mesi ore deposit (Figure 9). In contrast, the veins containing copper and silver mineralization have been considerably developed in both shallow and deeper levels. The high degree of Mo at shallow levels seems to occur due to either superimposition of primary geochemical haloes of various veins (Li et al., 1995, 2016) and/or the effect of amount of pyrite, pH, and

alkalinity contents of hydrothermal fluids (Leanderson et al., 1987).

The average value of different elements in intervals of 50 meters from the shallow (2500 meters) to the deep (2300 meters) levels are determined by existence of maximum abundance of lead, zinc and gold elements at surface levels. However, the highest average abundance of copper occurs in the deepest level. The highest average value of silver is also located in the 2450, 2350, and 2500 meters levels, which is economically valuable (Table 2). Therefore, the continuation of drilling in the southern part of the Chah-Mesi ore deposit into deeper levels is strongly recommended as there may still exist more concentrations of copper and silver there.

Acknowledgment

The authors are grateful to the honorable personnel of the Miduk Copper Mine for their efforts in providing field studies and access to geochemical analyses.

References

- Leanderson, P.J., Schrader, E.L., Brake, S. and Kaback, D.S., 1987. Behavior of molybdenum during weathering of the Ceresco Ridge porphyry molybdenite deposit, Climax, Colorado and a comparison with the Hollister deposit, North Carolina. *Applied Geochemistry*, 2(4): 399–415.
- Li, H., Wang, Z.N. and Li, F.G., 1995. Ideal models of superimposed primary halos in hydrothermal gold deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 55(1–3): 329–336.
- Li, Y., Zhang, D., Dai, L., Wan, G. and Hou, B., 2016. Characteristics of structurally superimposed geochemical haloes at the polymetallic Xiasai silver-lead-zinc ore deposit in Sichuan Province, SW China. *Journal of Geochemical Exploration*, 169: 100–122.