



بررسی سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و دگرسانی بخش شمالی کانسار مس پورفیری چاه‌فیروزه، شمال غرب شهر بابک، کرمان

محمد بومری*، حبیب ییابانگرد و زهرا زین‌الدینی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۰

چکیده

کانسار مس پورفیری چاه‌فیروزه در ۳۵ کیلومتری شمال غرب شهر بابک در نوار دهج-ساردوئیه از کمربند ماگمایی ارومیه-دختر واقع شده و شامل دو بخش شمالی و جنوبی است. در این پژوهش، سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی، سبک و نوع کانی‌زایی و مقدار و پراکندگی مس و مولیبدن در بخش شمالی بررسی می‌شود. زمین‌شناسی کانسار اغلب شامل آندزیت‌های ائوسن است که توسط سنگ‌های نفوذی و نیمه نفوذی میوسن قطع شده‌اند. این واحدهای سنگی توسط داسیت، کنگلومرا و آبرفت‌های جوان‌تر پوشیده شده‌اند. سنگ‌های نفوذی دارای ترکیب دیوریت، کوارتزدیوریت و گرانودیوریت و بافت پورفیری هستند. کانی‌زایی مس در بخش شمالی، اغلب از نوع هیوژن است که به صورت رگچه‌های سیلیسی و پراکنده در سنگ‌های نفوذی الیگو-میوسن و آندزیت‌های ائوسن رخ داده است. سولفیدهای هیوژن اغلب شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و مولیبدنیت است. کانی‌زایی سوپرژن در بخش شمالی گسترش چندانی ندارد و فقط بخش اکسیدان آن به صورت رخنمون‌های کوچکی از هیدرواکسیدهای آهن و کربنات مس دیده می‌شود. دگرسانی‌های عمده در بخش شمالی کانسار مس پورفیری چاه‌فیروزه، دگرسانی‌های پتاسیک و فلیک است. دگرسانی پتاسیک اغلب شامل کوارتز، بیوتیت، سریسیت، کلریت و سولفیدهای مس با یا بدون ارتوکلاز و مگنتیت و دگرسانی فلیک اغلب شامل کوارتز، سریسیت، کلریت و پیریت و کالکوپیریت می‌شوند. دگرسانی پروپلیتیک با رنگ سبز و داشتن کانی‌های سبز کلریت و اپیدوت و دگرسانی آرژلیک در حاشیه‌ها و مناطق سطحی مشاهده می‌شوند. با افزایش عمق در این کانسار، مقدار مس تقریباً ثابت است؛ ولی مقدار مولیبدن افزایش می‌یابد. بیشترین میزان مس مربوط به گمانه شماره ۴۴ در عمق ۲۱۰ تا ۲۱۲ متری با مقدار ۴/۵ درصد مس در کوارتزدیوریت است و بیشترین مقدار مولیبدن ۰/۱۷ درصد در گمانه ۸۰، عمق ۶۰۸ متری در گرانودیوریت وجود دارد. میانگین مقدار مس و مولیبدن در بخش شمالی به ترتیب ۰/۲۱ درصد و ۲۴ ppm است. اندازه، عیار، نوع دگرسانی، سبک کانی‌زایی و سنگ‌های همراه در بخش شمالی، مشابه با کانسارهای نوع مس پورفیری است که در آن کانی‌زایی مس بر اثر جدایش محلول‌های گرمابی وابسته به توده‌های نیمه نفوذی در زون پتاسیک و فلیک تشکیل شده است.

واژه‌های کلیدی: محلول‌های گرمابی، کانی‌زایی مس-مولیبدن پورفیری، دهج-ساردوئیه، کمربند ماگمایی ارومیه-دختر

مقدمه

گرمابی-ماگمایی خیلی شور، اشباع از گوگرد و نسبتاً غنی از مس، منشأ گرفته از نفوذی‌های پورفیری غالباً حدواسط، در دمای

کانسارهای مس پورفیری، کانسارهایی هستند که از محلول‌های

بررسی‌های اولیه زمین‌شناسی و تهیه نقشه زمین‌شناسی عمومی منطقه به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰۰ و ۲۳ برگ نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از استان کرمان (Dimitrijevic et al., 1971)، مبنای مهمی برای شناسایی کانسارها در این استان است (Bazin and Hubner, 1969). استان کرمان دربرگیرنده کانسارهای مهم مس پورفیری است و گزارش‌ها، مقالات و پژوهش‌های زیادی بر روی این کانسارها در مناطق مختلف انجام شده است (Waterman and Hamilton, 1975; Shahabpour, 1982; Hassanzadeh, 1993; Hezarkhani and William-Jones, 1998; Zarasvandi et al., 2005; Barzegar, 2007; Shafiei, 2008; Shafiei and shahabpour, 2008; Taghipour et al., 2008; Shafiei, 2010; Boomeri et al., 2009; Boomeri et al., 2010; Maanijou et al., 2012; Yousefi and Moradian, 2012; Asadi et al., 2014; Golestani et al., 2017).

از اولین بررسی‌ها در منطقه چاه‌فیروزه می‌توان به تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرباک اشاره کرد (Dimitrijevic, 1971 et al.). تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ و بررسی زمین‌شناسی و دگرسانی برای محدوده‌ای به وسعت ۲ کیلومتر مربع نیز در محدوده اکتشافی چاه‌فیروزه توسط شرکت ملی صنایع مس ایران انجام شده است. حفاری‌های اکتشافی در محدوده چاه‌فیروزه در تابستان ۱۳۸۵ توسط شرکت ملی صنایع مس ایران آغاز شد که در مرحله اول تعداد ۲۶ حلقه گمانه با عمق‌های متغیر از ۳۲۵ تا ۵۶۰ متر حفر شد که به کشف دو منطقه کانی‌زایی، یکی در بخش شمالی و دیگری در بخش جنوبی منجر شد. در مرحله دوم، حفاری‌ها که در سال ۱۳۸۶ انجام شد، تعداد ۱۶ حلقه گمانه با عمق متغیر از ۳۰۰ تا ۶۰۷ متر و با هدف شناسایی دقیق مرزهای کانی‌سازی و تعیین ذخیره بخش شمالی کانسار حفاری شد (Shafiei, 2008; Adeli Sarcheshmeh et al., 2009). پژوهش‌های قبلی اغلب بر روی بخش جنوبی کانسار متمرکز بوده که نتیجه آن شناسایی مناطق دگرسانی پتاسیک، فلیک و پروپیلیتیک و بررسی پتروگرافی و پتروژنز سنگ‌های منطقه چاه‌فیروزه بوده است (Pouramini, 2008; Mohammadzadeh, 2009). کانی‌زایی مس در چاه‌فیروزه،

بالا تشکیل می‌شوند. هرچند این کانسارها دارای عیار پایینی هستند؛ ولی به دلیل ذخیره زیاد، روش استخراج روباز و پراکندگی یکنواخت کانی‌زایی در سرتاسر کانسار، از ارزش اقتصادی بالایی برخوردارند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کانسارهای مس پورفیری، وجود هاله دگرسانی گسترده‌ای است که اطراف نفوذی پورفیری و منطقه کانی‌زایی شده وجود دارد و شناخت ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمی آن به‌عنوان ابزاری اکتشافی راهنمای خوبی برای تعیین محل دقیق مناطق کانی‌زایی شده است. امروزه ۸۰ درصد مس، ۹۵ درصد مولیبدن (Sun et al., 2015)، ۲۰ درصد طلا، بخش عمده‌ای رنیوم و مقادیر جزئی Pb ، Zn ، Bi ، Se ، Te ، Pd از کانسارهای مس پورفیری تولید می‌شود (Sillitoe, 2010). به دلیل اهمیت بالایی که کانسارهای مس پورفیری دارند، بیشترین بررسی‌ها در زمینه زمین‌شناسی اقتصادی روی این نوع کانسارها انجام شده است (Lowell and Guilbert, 1970; Kesler, 1973; Guilbert and Park, 1997; Hedenquist and Richards, 1998; Kerrich et al., 2000; Richards, 2003; Cooke et al., 2005; Sillitoe 2010; Sun et al., 2015). کانسارهای مس پورفیری اغلب در کمان‌های قاره‌ای و اقیانوسی در بالای مناطق قرورانش دیده می‌شوند (Wilkinson, 2013).

کانسار مس چاه‌فیروزه در ۲۴۰ کیلومتری شهر کرمان، ۱۳۵ کیلومتری شمال‌غرب معدن سرچشمه و ۳۵ کیلومتری شمال‌غرب شهرباک و در غرب معدن میدوک واقع شده است. مختصات محدوده اکتشافی این کانسار با عرض جغرافیایی $30^{\circ}23'$ و $30^{\circ}24'$ شرقی و طول جغرافیایی $55^{\circ}00'30''$ و $55^{\circ}02'00''$ شمالی مشخص است. فاصله هوایی مرکز محدوده چاه‌فیروزه تا معدن مس میدوک، ۱۴ کیلومتر است. بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه بخش کوچکی از کل کانسار است که در حاشیه شرقی جاده آسفالت شهرباک-انار واقع شده است؛ به طوری که پس از عبور از روستای کهتوکرها و طی ۳ کیلومتر به طرف انار می‌توان به محدوده مورد بررسی رسید.

واحدهای زمین‌شناسی آن توسط گسل‌هایی که فعالیت آنها تا عهد حاضر نیز ادامه دارد، از یکدیگر جدا می‌شوند. قدیمی‌ترین سنگ‌های این بخش، سنگ‌های رسوبی تریاس، گرانیت ژوراسیک و فلیش‌های کرتاسه بالایی است و جوان‌ترین سنگ‌های آن نیز جریان‌ات الیون بازالتی، لوسیتی و نفلینی مربوط به پلیوسن - کواترنری هستند. در دوره میوسن و در طی فاز پیرنه، با فعالیت ماگماتیسیم در منطقه، توده‌های بزرگی از سنگ‌های گرانودیوریتی تا داسیتی نیمه‌عمیق در منطقه دهج - ساردوئی و در سنگ‌های ولکانیکی ائوسن نفوذ کرده‌اند (Dimitrijevic, 1973).

در پیرامون کانسار مس پورفیری چاه‌فیروزه اغلب سنگ‌های آتشفشانی شامل سنگ‌های آذرآواری و گدازه‌های ائوسن که اغلب ترکیب آندزیتی تا داسیت - آندزیت دارند، دیده می‌شود که در پاره‌ای از نقاط همچون جنوب ناحیه، توسط سنگ‌های نفوذی میوسن شامل استوک و دایک، واحدی کنگلومرای حاوی قطعات ولکانو کلاستیک و نهشته‌های کواترنری، پوشیده شده‌اند. در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه نیز آندزیت‌های ائوسن، قدیمی‌ترین واحد زمین‌شناسی است (شکل ۲) و در میوسن یک توده کوارتزدیوریت و گرانودیوریتی دگرسان شده در آندزیت‌ها نفوذ کرده است. سنگ‌های جوان‌تر، داسیت‌های دگرسان‌نشده با سن میوسن پایانی و نهشته‌های جوان پلیوکواترنری هستند (شکل ۲). سن توده نفوذی دگرسان شده و بارور ۱۶/۳ میلیون سال است (Kazemi-Mehrnia, 2010).

روش بررسی

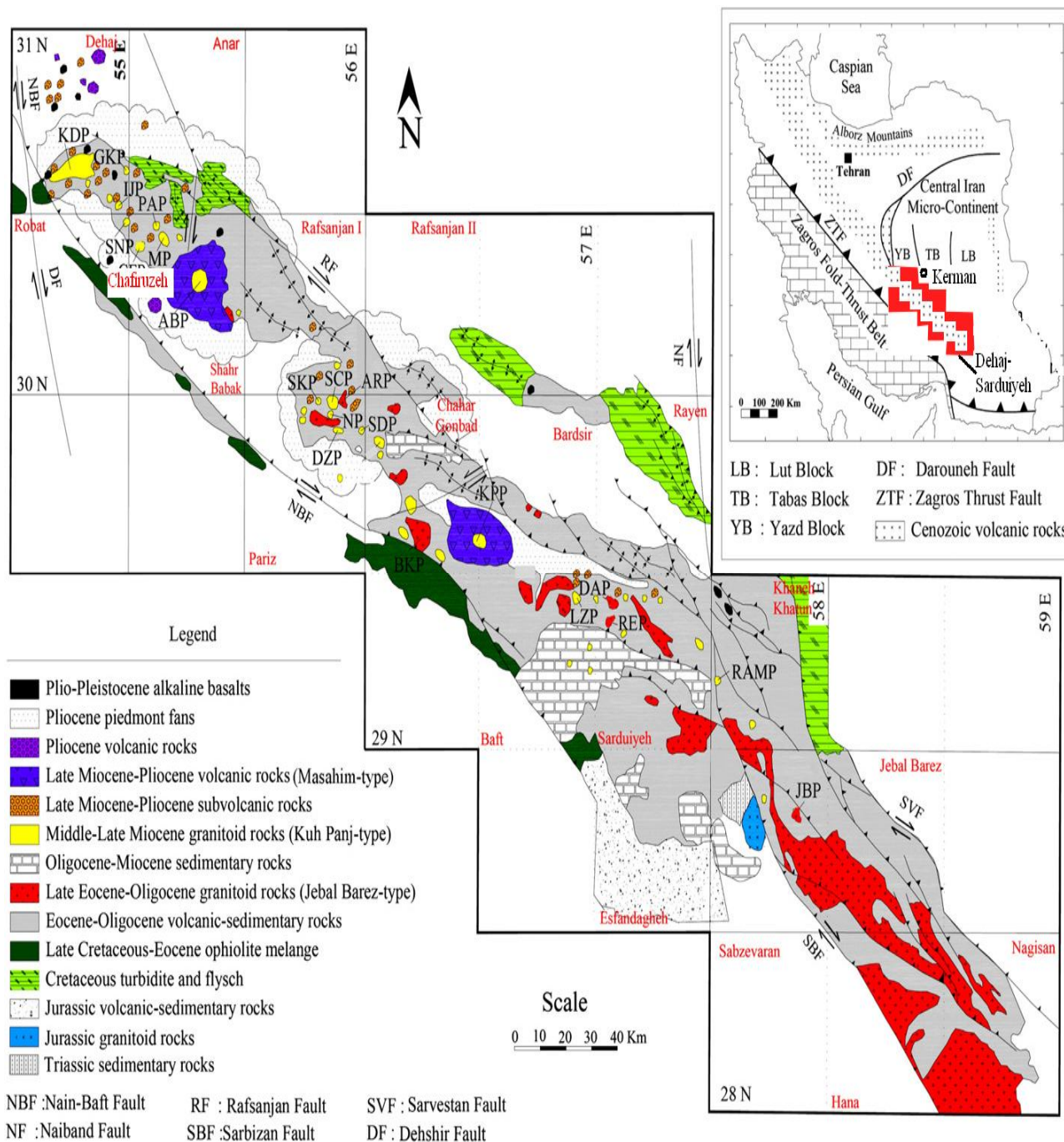
طی بازدیدهای صحرایی از تمامی واحدهای سنگی و مغزه‌های اکتشافی موجود، نمونه‌برداری شد. برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانی‌زایی، تعداد ۲۵ مقطع نازک و ۳۹ مقطع صیقلی از سنگ‌های میزبان تهیه شدند. همچنین برای بررسی انواع دگرسانی‌ها، ۸ نمونه با XRD مدل فیلیپس ساخت هلند آزمایش و بررسی شد و ۶ نمونه برای تعیین مقدار عناصر اصلی به وسیله XRF مدل فیلیپس ساخت هلند در شرکت فراوری مواد معدنی کرج آنالیز شد که نتایج آن در جدول ۱ آمده است.

در بخش جنوبی و در ارتباط با پورفیری‌های کوارتزدیوریت تا کوارتزمونوزودیوریت است و در امتداد سامانه‌ای گسلی، با امتداد شرقی - غربی در سنگ‌های آذرین اتفاق افتاده است (Shafiei, 2009; Mohammadzadeh, 2008). بررسی سیالات درگیر نشان داد که کانی‌زایی در بخش جنوبی چاه‌فیروزه به وسیله سیالات ماگمایی دما بالا و شور، مشابه با سیستم‌های مس پورفیری تشکیل شده است (Einali et al., 2009; Hezarkhani, 2014). نقشه‌های عیار مس نیز ابتدا در بخش جنوبی کانسار تهیه شده است (Sheikhzadeh et al., 2011). اخیراً توزیع مس و مولیدن و دیگر عناصر تا اعماق ۶۰۰ متری در بخش شمالی بررسی شده است (Zeinadini, 2013).

چنان‌که از نوشته‌های بالا می‌توان دریافت کرد، بخش جنوبی به طور مفصل از جهات مختلف مطالعه شده؛ ولی بخش شمالی کانسار به ندرت از نظر زمین‌شناسی اقتصادی بررسی شده است. هدف این پژوهش، تشخیص و تفکیک واحدهای سنگی و ارتباط آنها با کانی‌زایی، شناسایی انواع دگرسانی، رگه‌ها و رگچه‌ها، بررسی توزیع، میزان، نوع و سبک کانی‌زایی و بررسی‌های کانی‌شناسی و کانه‌نگاری کانسنگ است.

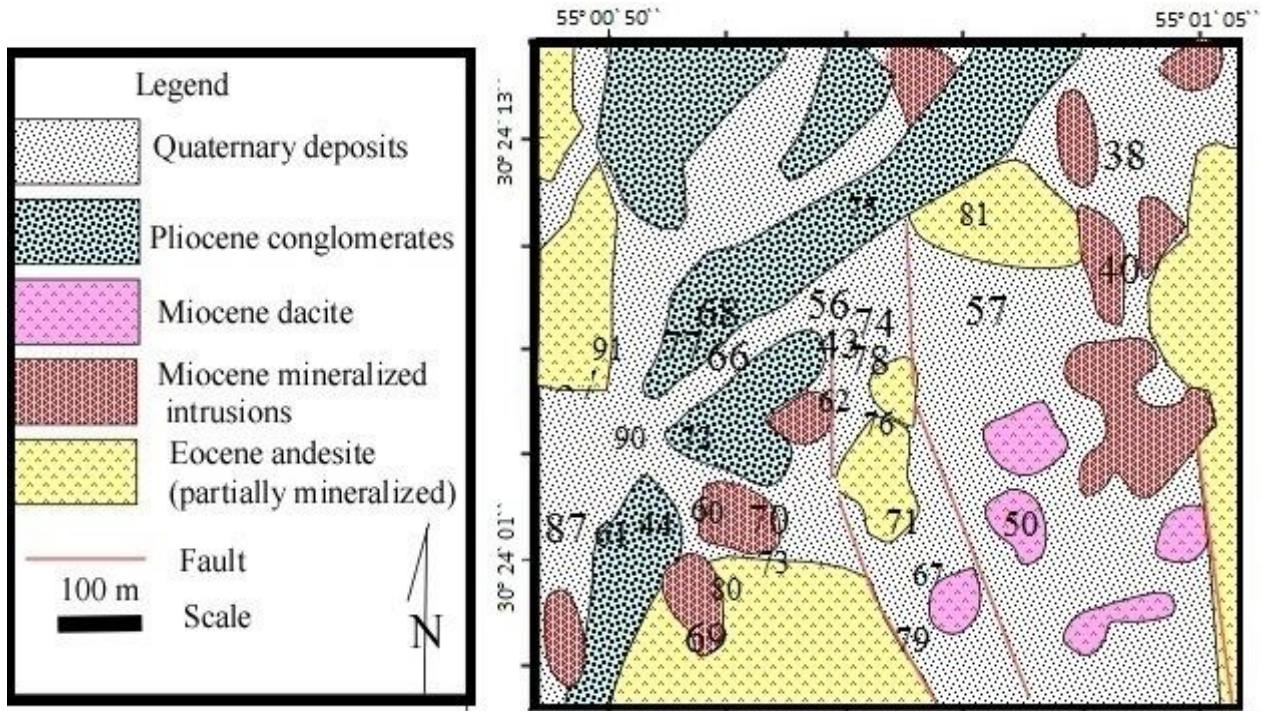
زمین‌شناسی

کانسار مس چاه‌فیروزه در شمال غربی محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهر بابک، در منطقه دهج - ساردوئی و در کمان ماگمایی ارومیه - دختر (سنگ‌های ولکانیکی سنوزوئیک) واقع شده است (شکل ۱) (Dimitrijevic, 1973). کمان ماگمایی ارومیه - دختر که به موازات نوار سنندج - سیرجان و کمربند زاگرس است، مهم‌ترین کمربند فلز زایی مس و طلا ایران است. این کمربند معلول فازهای کوه‌زایی آلپی از زمان مزوزوئیک تا اواخر سنوزوئیک است. بیشتر کانسارهای مس پورفیری ایران هم در این کمربند قرار دارند (Bazin and Hubner, 1969; Jonkovic, 1977; Forster, 1978; Shahabpour, 1999). بخش دهج - ساردوئی پایانه جنوب شرقی کمان ماگمایی ارومیه - دختر است (شکل ۱). ساختار داخلی بخش دهج - ساردوئی بسیار پیچیده است و



شکل ۱. پراکندگی کانسارهای مس پورفیری در منطقه دهج ساردوئیه و موقعیت کانسار مس چاه‌فیروزه (Asadi et al., 2014). علایم اختصاری کانسارها: SCP: سرچشمه، SKP: سرکو، ABP: آبدر، DAP: دره آلو، DZP: دره زار، MP: میدوک، PAP: پرکام، REP: ریگان، ARP: آرچندر، SDP: سریدون، GKP: گودکلواری، IJP: ایجو، KDP: کدر، KPP: کوه پنچ، LZP: لاله‌زار، NP: نوچون، RAMP: رضی‌آباد، SNP: سرنو. علایم اختصاری گسل‌ها: DF: دهشیر، RF: رفسنجان، NBF: ناین-بافت، SBF: سربیزان، NF: نایبند، SVF: سروستان

Fig. 1. Distribution of Cu porphyry deposits in Dehaje-Sarduiyeh zone and location of Chahfiruzeh ore deposit (Asadi et al., 2014). Ore deposit abbreviations are: SCP: Sarcheshmeh, SKP: Sar Kuh, ABP: Abdar, DAP: Dar Alu, DZP: Darreh Zar, MP: Meiduk, PAP: Parkam, REP: Reagan, ARP: Archandor, SDP: Saridune, GKP: God-e-Kolvary, IJP: Iju, KDP: Kader, KPP: Kuh-e-Panj, LZP: Lalleh Zar, NP: Now Chun, RAMP: Razi Abad-Madin, SNP: Serenu. Fault abbreviations are: DF: Dehshir, RF: Rafsanjan, NBF: Nain-Baft, SBF: Sarbizan, NF: Nayband, SVF: Sarvestan



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه، تغییر یافته از عادل‌سرچشمه و همکاران (Adeli Sarcheshmeh et al, 2009). اعداد روی نقشه، شماره گمانه‌هاست.

Fig. 2. Geological map of northern part of Chahfiruzeh deposit (Modified from Adeli Sarcheshmeh et al., 2009). The numbers on the map are number of study boreholes.

جدول ۱. مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی سنگ‌های آذرین بخش شمالی کانسار مس پورفیری چاه‌فیروزه بر حسب درصد وزنی که با XRF تعیین شده است.

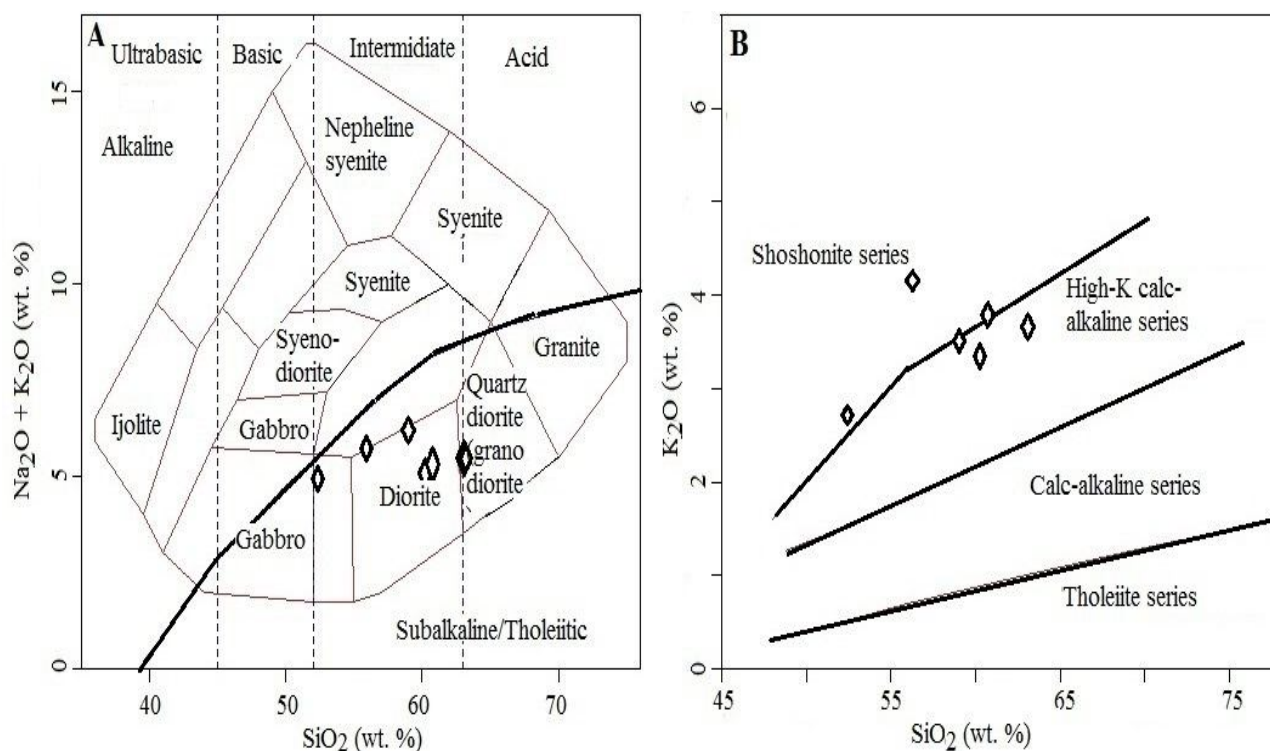
Table 1. XRF Analysis of igneous rocks for major elements in terms of wt.% from the northern part of the Chahfiruzeh porphyry Cu deposit.

Samples	57-511	80-436	80-451	91-188	75-192	57-98
SiO ₂	60.69	52.37	55.9	63.11	59.03	60.29
Al ₂ O ₃	17.76	17.75	18.79	20.4	16.66	18.15
Fe ₂ O ₃	6.24	9.27	8.1	4.5	7.53	6.08
CaO	4.13	5.8	3.96	1.22	5.92	5.67
Na ₂ O	1.51	2.29	1.49	1.75	2.75	1.86
K ₂ O	3.79	2.74	4.27	3.7	3.49	3.34
MgO	3.08	4.22	3.56	3.06	2.56	2.62
TiO ₂	0.61	0.76	0.67	0.53	0.66	0.56
P ₂ O ₅	0.32	0.3	0.34	-	0.35	0.27
SO ₃	1.66	3.49	4.23	3.22	0.81	0.94
Total	99.79	99	101.31	101.49	99.76	99.78

پتروگرافی

بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، سنگ‌های آذرین در بخش شمالی کانسار مس پورفیری چاه‌فیروزه را می‌توان به دو گروه تقسیم‌بندی کرد که شامل سنگ‌های آذرین بیرونی و درونی می‌شوند. سنگ‌های آذرین درونی شامل گرانودیوریت، دیوریت و کوارتز دیوریت و سنگ‌های آذرین خروجی شامل آندزیت و داسیت است. بر اساس رده‌بندی TAS، سنگ‌های نفوذی کانسار مس چاه‌فیروزه از نظر ترکیب شیمیایی در محدوده گابرو-دیوریت تا گرانودیوریت قرار می‌گیرند (شکل ۳-۱). این سنگ‌ها اغلب ساب‌آلکان و متعلق به گروه کالک‌آلکان پتاسیم بالا هستند (شکل ۳-۲).

همچنین برای تعیین عیار و مقایسه پراکندگی عناصر در زون‌های مختلف دگرسانی، ۲۵ نمونه سنگی انتخاب و برای عناصر فرعی اصلی به روش ICP-OES با دستگاه VARIN مدل LIBERTY-RL در شرکت فراوری مواد معدنی کرج تجزیه شدند (جدول ۲). علاوه بر این، از لاگ‌های حفاری و داده‌های موجود در بایگانی معدن نیز استفاده شده است. نمونه‌های آنالیز شده همگی از مغزه‌ها گرفته شده و شماره آنها در جدول‌ها شامل شماره چاه و عمق نمونه‌برداری است؛ به طوری که از سمت چپ، دو رقم اول شماره گمانه و رقم‌های بعدی عمق نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. شماره تعدادی از گمانه‌های نمونه‌برداری شده در این پژوهش، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۳. موقعیت سنگ‌های آذرین بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه، A: روی نمودار کاکس و همکاران (Cox et al., 1979) و B: روی نمودار پسرلیلو و تایلر (Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 3. Plot of the igneous rocks of the northern part of the Chafiruzeh deposit, A: on the diagram of Cox et al., (1979), and B: On the diagram of Peccerillo and Taylor (1976)

جدول ۲. تعیین عناصر اصلی و فرعی کانسنگ‌ها در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه با روش ICP-OES. Na, K, Ca, Mg, Fe و Al بر حسب درصد وزنی و سایر عناصر بر حسب قسمت در میلیون هستند.

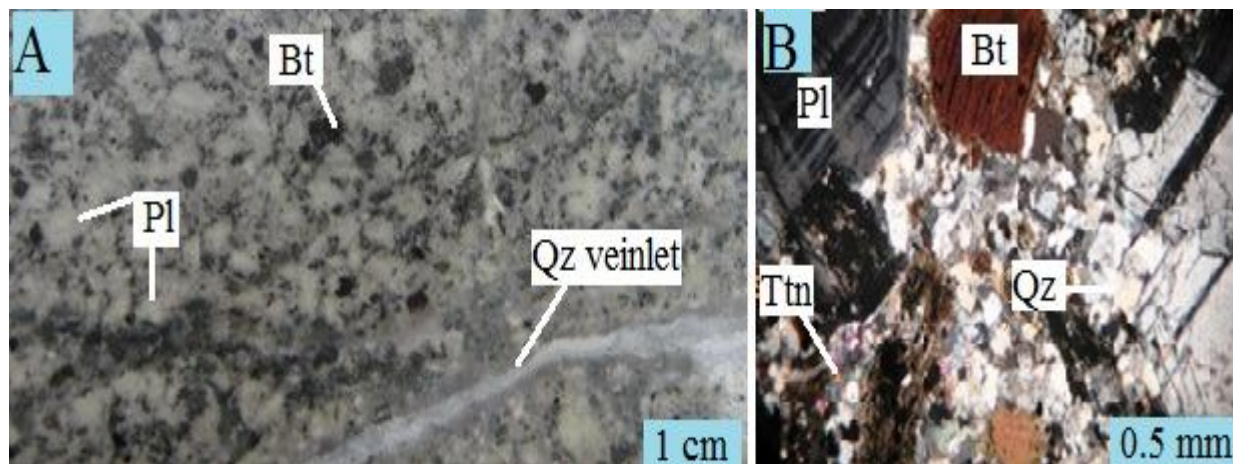
Table 2. ICP-OES Analysis of major and minor elements of ores from northern part of the Chahfiruzeh. Na, K, Ca, Mg, Fe and Al are in terms of wt.% and other elements are in terms of ppm.

samples	57-624	60-380	71-563	73-140	80-436	75-569	64-342	63-336	
Ag	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	
Na	0.6	1.2	1.8	1.8	0.7	0.8	1	1.4	
K	2	1.5	1.7	1.2	1.2	1.5	1.7	1.4	
Ca	1.2	1.3	1	1.3	0.8	1.2	1.1	1.1	
Mg	1.4	1.5	1	1.7	1.5	1.5	1.6	1.7	
Cu	2412	5550	5190	436	492	1633	1594	1322	
Mo	3	5	1	1	2	3	1	1	
Pb	9	36	135	40	5	5	21	10	
Zn	45	41	28	39	32	25	34	30	
Fe	2.7	5.5	2.8	3.5	5.1	3.8	4.9	4.1	
Al	3.7	4.4	4	4.3	3.6	3.8	3.8	3.7	
Co	26	16	18	15	13	26	18	21	
Cr	44	48	53	31	40	45	47	61	
samples	91-667	70-139	74-383	43-437	70-657	64-543	73-449	79-493	
Ag	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	
Na	0.9	0.1	1.5	0.9	0.3	0.1	0.9	1.1	
K	1.4	2.1	1.7	2	1.8	2.4	1.4	1.5	
Ca	1.2	0.6	0.7	1.5	1.2	0.5	0.8	1.5	
Mg	1.7	0.8	1	1.9	2.6	2.2	2.4	2.4	
Cu	428	2760	4038	6205	567	7359	454	1709	
Mo	2	7	32	448	41	1	1	1	
Pb	18	49	41	17	5	5	70	13	
Zn	23	60	44	78	34	25	35	123	
Fe	3.8	2.5	2.4	3.4	4.6	3.7	5.2	4.3	
Al	3.9	2.8	3.9	4.8	4.5	5.2	4.8	5.5	
Co	16	14	15	13	19	15	21	26	
Cr	92	38	42	43	63	70	30	42	
samples	91-510	73-531	75-422	56-608	64-337	56-207	80-503	57-158	56-559
Ag	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Na	0.8	0.6	0.7	0.7	0.8	1.2	0.6	0.9	1.3
K	0.7	1.3	1.1	1.1	1.8	1.4	0.6	1	1.7
Ca	0.9	0.8	1.1	1.1	0.9	1	0.8	1.3	1.2
Mg	0.6	2.3	1.9	1.3	2	2	1	1.5	1.5
Cu	36	1048	896	1357	1279	1216	1569	1458	1612
Mo	11	12	2	1	5	5	2	2	3
Pb	5	11	7	5	7	6	15	44	10
Zn	34	36	29	38	47	55	39	19	32
Fe	4.1	4.5	4.7	3.9	4.5	5.4	3.8	3.9	4.9
Al	2.9	4.1	4.2	3.5	3.5	4.3	2.7	3.7	3.7
Co	14	21	15	15	13	19	19	18	14
Cr	57	51	45	39	74	38	45	35	36

تشکیل می‌دهند. اغلب منطقه‌بندی و ماکل دارند. در بعضی از مقاطع، این کانی به صورت ریزدانه در زمینه هم یافت می‌شود. کوارتز ۲۰ تا ۳۰ درصد سنگ را در بر گرفته است که بیشتر به صورت ریزدانه و در زمینه یافت می‌شود. دانه‌های کوارتز اغلب بی‌شکل هستند و فضای بین دانه‌ها را پر می‌کنند. حاشیه آنها گاه مضرس و گاه یکنواخت است. کوارتزها به صورت بلورهای ریز تا متوسط‌دانه دیده می‌شوند (شکل ۴-۵). کانی‌های فرومنیزیم این سنگ‌ها بیوتیت و هورنبلند هستند. در بعضی مقاطع بیوتیت‌ها از حاشیه خورده شده‌اند و داخل آنها کانی‌های کدر وجود دارد. اسفن و زیرکن، کانی‌های فرعی و بخشی از کوارتزها، سریسیت، کلریت و رس‌ها، کانی‌های ثانویه این سنگ هستند.

به نظر می‌رسد در کانسار چاه‌فیروزه توده نفوذی در بخش شمالی از توده نفوذی در بخش جنوبی توسط یک گسل از هم جدا شده‌اند. این توده‌های نفوذی از نظر بافت، کانی‌شناسی و ژئوشیمی مشابه هستند (Mohammadzadeh, 2009). این سنگ‌ها اغلب دارای بافت پورفیری و از پلاژیوکلاز، کوارتز، هورنبلند، بیوتیت، کانی‌های اوپیک و کانی‌های ثانویه تشکیل شده‌اند که در ادامه توصیف می‌شوند.

گرانودیوریت: در نمونه دستی خاکستری رنگ و حاوی پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، آمفیبول و گاه بیوتیت هستند. این سنگ در مقاطع میکروسکوپی دارای بافت پورفیری و حاوی کوارتز، پلاژیوکلاز، بیوتیت و هورنبلند در زمینه ریزدانه از کوارتز و فلدسپات است (شکل ۴-۵). پلاژیوکلازها به صورت درشت‌بلور و حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد حجمی کانی‌های سنگ را



شکل ۴. تصاویر مربوط به بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه است. A: نمونه‌ای دستی از گرانودیوریت پورفیری و B: گرانودیوریت با بافت پورفیری و حاوی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و بیوتیت (در نور پلاریزه متقاطع). Bt: بیوتیت، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Ttn: تیتانیست یا اسفن، علایم اختصاری کانی‌ها بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

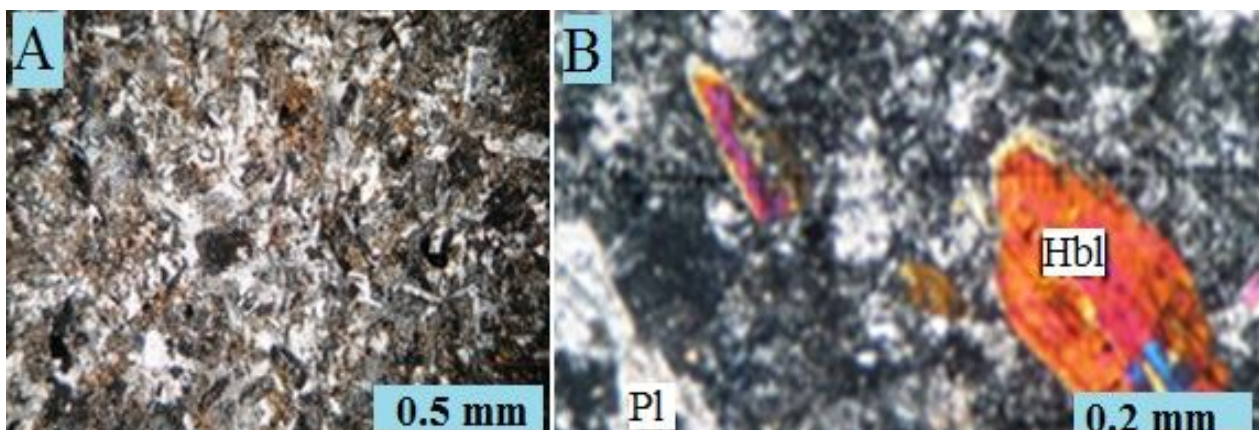
Fig. 4. Photomicrographs from northern part of the Chahfiruzeh ore deposit A: A hand specimen from the granodiorite porphyry, and B: the granodiorite with a porphyritic texture containing plagioclase and biotite as phenocrysts (Crossed polarized light). Bt: biotite, Pl: plagioclase, Qz: quartz, Ttn: sphene or titanite, Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

است (شکل ۴-۵). بافت آنها اغلب میکروولیتی-پورفیری است. پلاژیوکلازها بیش از ۷۰ درصد حجمی کانی‌های سازنده این سنگ را به خود اختصاص می‌دهند. درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز

دیوریت: این سنگ در نمونه دستی به رنگ سبز تیره است و تحت دگرسانی قرار گرفته و دارای رگچه‌های سیلیسی و شکستگی‌های متعدد همراه با کانه‌سازی پیریت و کالکوپیریت

و کوارتز به مقدار ناچیز به صورت کانی فرعی یا ثانویه حضور دارند. بخش‌هایی از پلاژیوکلاز به وسیله هورنبلند، بیوتیت، سریسیت، کلریت، اپیدوت کلسیت، و کوارتز جانشین شدند. زمینه این گروه از سنگ‌ها، نیز از کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت و هورنبلند است.

به صورت شکل دار تا نیمه شکل دار بوده است. این کانی‌ها اصولاً دارای ماکل تکراری و منطقه‌بندی و به صورت میکرولیتی و درشت‌بلور هستند (شکل ۵-۱). کانی‌های بیوتیت (۱۰ تا ۱۵ درصد) و هورنبلند (۳ تا ۵ درصد) به صورت شکل دار تا نیمه شکل دار ظاهر می‌شوند (شکل ۵-۲). فلدسپار آلکالن، آپاتیت،



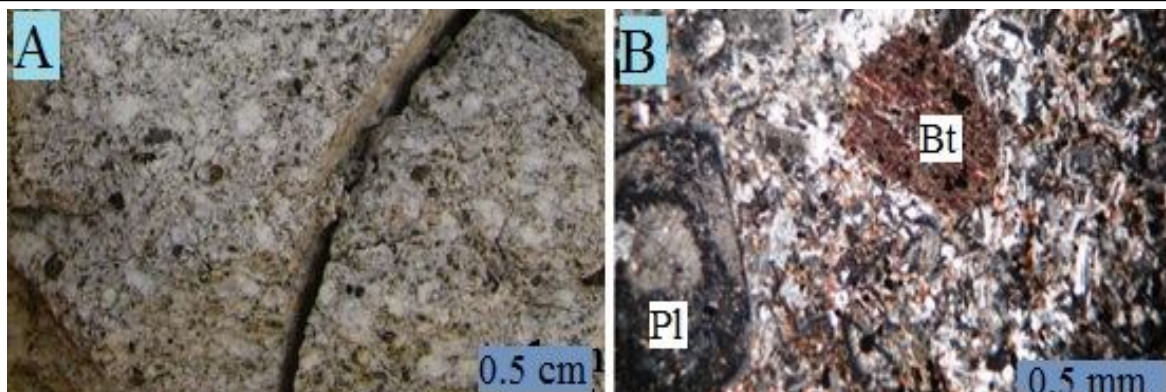
شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی از دیوریت بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه، A: تشکیل بیوتیت‌های ریز نشانه‌ای از دگرسانی پتاسیک در دیوریت و B: دیوریت با بافت پورفیری حاوی بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند (در نور پلاریزه متقاطع). Pl: پلاژیوکلاز، Hbl: هورنبلند، علایم اختصاری کانی‌ها بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 5. Microphotographs of diorite from northern part of the Chahfiruzeh ore deposit, A: formation of fine-grained biotites is an evidence of potassic alteration in the diorite, and B: the diorite with a porphyry texture containing plagioclase and hornblende (Crossed polarized light). Pl: plagioclase, Hbl: hornblende, Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

است و بافت غالب آنها پورفیری است. کانی‌های موجود در آن پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت هستند. پلاژیوکلاز حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد حجمی را به خود اختصاص داده است و به صورت درشت‌بلور و ریز بلور در زمینه دیده می‌شود (شکل ۷). اندازه درشت‌بلورها گاه تا ۱۰ میلی‌متر می‌رسد و اغلب دارای ماکل تکراری و منطقه‌بندی هستند. کانی‌های فرومنیزین بیوتیت و هورنبلند به ترتیب حدود ۷ و ۱۵ درصد حجمی این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. کانی‌های هورنبلند در اثر دگرسانی به کانی‌های کلریت، کلسیت و کانی‌های کدر تبدیل شده‌اند و به رنگ‌های سبز، زرد و قهوه‌ای کم‌رنگ دیده شده‌اند. کلریت از دگرسانی بیوتیت‌های اولیه به دست آمده است. کانی‌های فرعی این سنگ‌ها، اسفن و آپاتیت است.

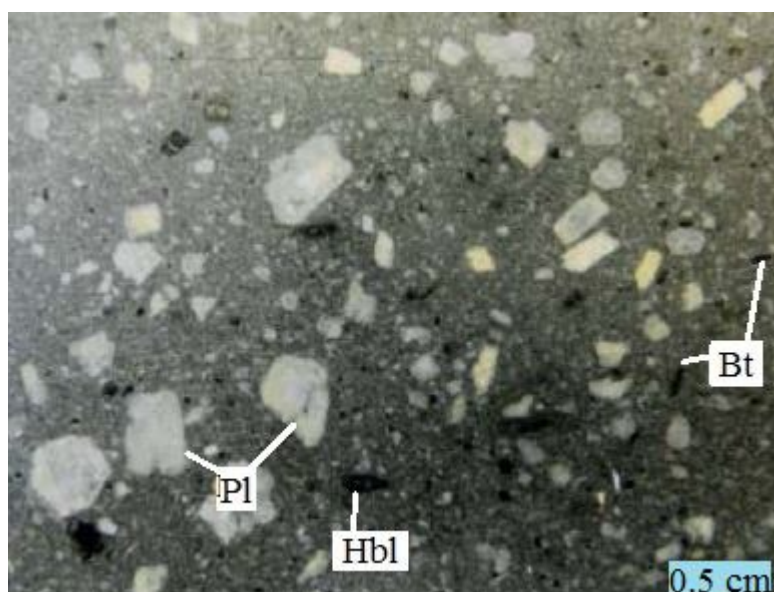
کوارتز دیوریت: این سنگ‌ها در نمونه دستی خاکستری تا روشن رنگ (شکل ۶-۱) و دارای بافت پورفیری هستند (شکل ۶-۲). درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در زمینه‌ای دانه‌ریز که اغلب از کوارتز و مقدار کمتری از پلاژیوکلاز، بیوتیت و هورنبلند تشکیل شده، قرار گرفته‌اند. پلاژیوکلازها در حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد حجم سنگ را به خود اختصاص می‌دهند و دارای ماکل تکراری و منطقه‌بندی هستند و بخش‌هایی از آنها به وسیله بیوتیت ثانویه و سریسیت جانشین شده است. کوارتز در حدود ۵ تا ۱۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد و اندازه آنها در حدود ۰/۱ تا ۰/۴ میلی‌متر بوده و بی‌شکل هستند. کانی‌های فرومنیزیم شامل هورنبلند و بیوتیت هستند.

آندزیت‌ها: رنگ این سنگ‌ها در نمونه دستی خاکستری روشن



شکل ۶. A: نمونه‌ای دستی از کوارتز دیوریت از بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه و B: کوارتز دیوریت با بافت پورفیری و حاوی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و بیوتیت، بلورهای ریز بیوتیت حاصل دگرسانی است (در نور پلاریزه متقاطع). Pl: پلاژیوکلاز، Bt: بیوتیت، علائم اختصاری کانی‌ها بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 6. A: A hand specimen from a quartzdiorite from northern part of the Chahfiruzeh ore deposit, and B: the quartzdiorite with porphyry texture contains plagioclase and biotite (Crossed polarized light). The fined-grained biotites were formed by alteration. Bt: biotite, Pl: plagioclase, Abbreviations after Whitney and Evans (2010)



شکل ۷. تصویر نمونه دستی از سنگ‌های آندزیتی در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه. Pl: پلاژیوکلاز، Bt: بیوتیت، Hbl: هورنبلند، علائم اختصاری کانی‌ها بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

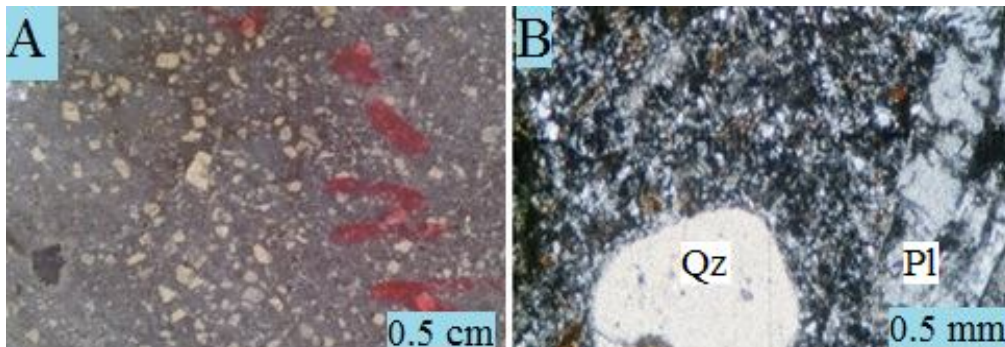
Fig. 7. A hand specimen from andesite from northern part of the Chahfiruzeh ore deposit. Bt: biotite, Pl: plagioclase, Hbl: hornblende, Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

هورنبلند، پلاژیوکلاز و بیوتیت است (شکل ۸-۸). پلاژیوکلازها به صورت بلورهای درشت و شکل‌دار با ساختار زونه و ماکل‌های پلی‌سنستیک ساده و آلیتی، حدود ۶۵ تا ۷۰

داسیت‌ها: این سنگ‌ها در نمونه دستی به رنگ خاکستری روشن، سفید و بنفش دیده می‌شوند و دارای بافت پورفیری با زمینه‌ای ریزدانه هستند و درشت‌بلورهای آن شامل کوارتز،

هستند. از کانی‌های مافیک داسیت، بیوتیت‌ها و هورنبلندها هستند که حدود ۱۰ درصد سنگ را در بر گرفته‌اند. هورنبلندهای این سنگ به صورت لوزوجهی دیده می‌شوند. کانی‌های فرعی آن کانی‌های اوپک و زیرکن است.

درصد سنگ را تشکیل می‌دهند. کوارتز هم به صورت بلورهای درشت با حالت‌های خلیجی، مدور و گلبولی (شکل ۸-B) و هم به صورت ریزدانه یافت می‌شود. وجود حاشیه خلیجی در درشت‌بلورهای کوارتز دلیل واضحی بر انحلال و خوردگی



شکل ۸. A: نمونه‌ای دستی از داسیت در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه و B: داسیت با بافت پورفیری و حاوی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کوارتز (در نور پلاریزه متقاطع). Qz: کوارتز، Pl: پلاژیوکلاز، علائم اختصاری کانی‌ها بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 8. A: A hand specimen from the dacite in northern part of the Chahfiruzeh ore deposit, and B: the dacite with a porphyry texture contains plagioclase phenocrysts and quartz (Crossed polarized light). Qz: quartz, Pl: plagioclase, Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

کانه‌زایی

در محدوده کانسار مس چاه‌فیروزه، کانه‌زایی مس به دو نوع کانی‌زایی هیپوژن و سوپرژن تقسیم‌بندی می‌شوند.

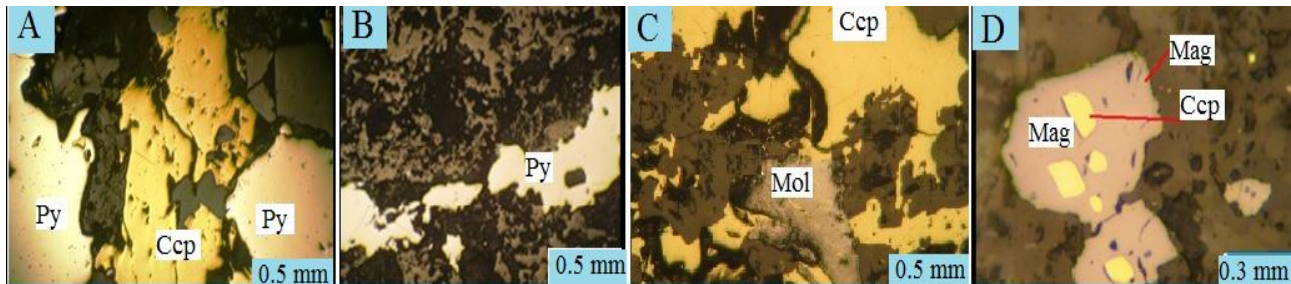
کانی‌زایی هیپوژن: بررسی نمونه‌های سنگی و مقاطع صیقلی نشان می‌دهد که کانه‌زایی هیپوژن در کانسار چاه‌فیروزه هم در نفوذی‌ها (گرانودیوریت، کوارتزیدیوریت و دیوریت) و هم در سنگ‌های آتشفشانی میزبان (آندزیت) رخ داده است. کانی‌زایی در کانسار چاه‌فیروزه به صورت افشان، رگچه‌ای و رگه‌ای وجود دارد و در بخش‌های عمیق کانسار کانی‌های غالب، پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و مولیدنیت هستند. به گونه‌ای که هرچه به عمق می‌رویم، مقدار مولیدنیت زیاد می‌شود؛ ولی در اعماق سطحی مولیدنیت یافت شده کم است. فراوان‌ترین رگچه‌های استوک و رکی، رگچه‌های کوارتز هستند که اغلب کانی‌های سولفیدی آنها را همراهی می‌کنند. کانی‌های باطله در این کانسار اغلب کانی‌های سیلیکاته، اکسیدهای آهن و پیریت است. کانی‌های فلزی مهم به شرح زیر هستند:

پیریت: پیریت در نمونه‌های بررسی شده به شکل رگچه‌ای و پراکنده تشکیل شده و بلورهای آن اغلب شکل دار و نیمه شکل دار است که حدود ۵۰ درصد از حجم کانی‌های سولفیدی را به خود اختصاص داده است. بررسی‌های مینرالوگرافی نشان می‌دهد که دو نسل متفاوت از پیریت در کانسار چاه‌فیروزه تشکیل شده است: پیریت نسل اول به صورت رگچه‌ای و پراکنده در متن سنگ است که بلورهای آن اغلب شکل دار است (شکل ۹-A)؛ در حالی که پیریت نسل دوم بیشتر به صورت رگچه‌ای و نیمه شکل دار تا بی‌شکل یافت می‌شوند (شکل ۹-B).

کالکوپیریت: مهم‌ترین کانه سولفیدی مس در زون هیپوژن، کالکوپیریت است که همراه و بعد از پیریت تشکیل شده است. این کانه به صورت پراکنده و رگچه‌ای (شکل ۹-B و C) یافت می‌شود. کالکوپیریت در بیشتر مقاطع بررسی شده بعد از پیریت تشکیل شده است. گاهی اطراف بلورهای شکسته شده کالکوپیریت توسط مگنتیت فرا گرفته شده است (شکل ۹-D).

حجم نمونه‌های کانی‌زایی شده اغلب به حدود یک درصد می‌رسد.

کالکوپیریت حدود ۴۰ درصد کانی‌های سولفیدی را در بخش کانی‌زایی شده به خود اختصاص داده است. میزان آن در کل



شکل ۹. عکس‌های میکروسکوپی از کانی‌های اوپک در نور منعکسه از بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه، A: پیریت نسل اول، B: پیریت‌های رگچه‌ای نسل دوم، C: کالکوپیریت به صورت پراکنده همراه با مولیبدنیت و D: تشکیل مگنتیت در کنار کالکوپیریت در محدوده مورد بررسی. Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Mol: مولیبدنیت، Mag: مگنتیت، علایم اختصاری کانی‌ها بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 9. Microphotographs of the opaque minerals in reflected light from northern part of the Chahfiruzeh ore deposit, A: early pyrite, B: late pyrite veinlets, C: disseminated chalcopyrite associated with molybdenite, and D: magnetite formation adjacent to chalcopyrite in the study area. Py: pyrite, Ccp: chalcopyrite, Mol: molybdenite, Mag: magnetite, Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

نوع رگچه با ترکیب کانی‌شناسی زیر در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه شناسایی شده است:

- ۱) پیریت + کلریت + کوارتز با هاله سریستی (شکل ۱۰-A)،
- ۲) کوارتز + پیریت (شکل ۱۰-B)،
- ۳) کوارتز + کلریت (شکل ۱۰-C)،
- ۴) پیریت + کالکوپیریت + کوارتز (شکل ۱۰-D و E)،
- ۵) کوارتز + مگنتیت (شکل ۱۰-F)،
- ۶) پیریت (شکل ۱۰-G)،
- ۷) کالکوپیریت (شکل ۱۰-H)،
- ۸) کوارتز + کالکوپیریت + بورنیت (شکل ۱۰-I)،
- ۹) کلریت،
- ۱۰) کوارتز و
- ۱۱) مولیبدنیت.

رگه‌ها و رگچه‌ها در کانسارهای مس پورفیری به انواع A، B، D، M، P، E شناخته می‌شوند (Gustafson and Hunt, 1975; Arancibia and Clark, 1996; Harris, et al., 2003). در کانسار چاه‌فیروزه، ضخامت رگچه‌های گروه ۱ از ۸ تا ۱۵ میلی‌متر متغیر است. رگچه‌های گروه ۲ دارای ضخامت

مولیبدنیت: کانه مولیبدنیت در مقاطع میکروسکوپی به صورت نادر و با انیزوتروپی بسیار بالا به رنگ تقریباً سفید به صورت پراکنده و رگچه‌ای و بیشتر در نمونه‌هایی که از اعماق زیاد تهیه شده است (به عنوان مثال در عمق ۵۱۰ متری در گمانه ۹۱) به همراه کالکوپیریت یافت می‌شود (شکل ۹-B).

مگنتیت: این کانه در بخش شمالی کانسار به صورت پراکنده و رگچه‌ای دیده می‌شود و نسبتاً از فراون‌ترین کانی‌های اوپک است. این کانی در مقاطعی که از نمونه‌های موجود در اعماق سطحی تهیه شده‌اند، به ماریتیت تبدیل شده است. ایلمنیت نیز کم‌وبیش و در بیشتر مقاطع بررسی شده، یافت می‌شود.

بورنیت: بورنیت با رنگ قهوه‌ای در زیر میکروسکوپ قابل تشخیص است و اندازه بلورهای آن زیر ۰/۱ میلی‌متر است و اغلب در حاشیه کالکوپیریت‌ها تشکیل شده است. میکرو رگچه‌های بورنیت اغلب بلورهای کالکوپیریت را قطع کرده‌ند که نشان‌دهنده تشکیل آن بعد از کالکوپیریت است.

طبقه‌بندی رگچه‌ها

بر اساس بررسی نمونه‌های دستی و مطالعه مقاطع صیقلی، ۱۱

مشابه با رگچه نوع B هستند. رگه‌های نوع M حاوی مگنتیت با یا بدون انهدریت و سولفید مس هستند و نوع P به رگه‌ها و رگچه‌های کوارتز اولیه مراحل پیشین و دارای ادخال شیشه‌ای اطلاق می‌شوند، این دو نوع اخیر به‌ندرت در کانسار چاه‌فیروزه شمالی دیده می‌شوند. علاوه بر کانی‌زایی رگچه‌ای، کانی‌زایی پراکنده نیز در کانسار مورد بررسی اتفاق افتاده است؛ اما بخش اعظم سولفیدها در رگچه‌ها دیده می‌شوند.

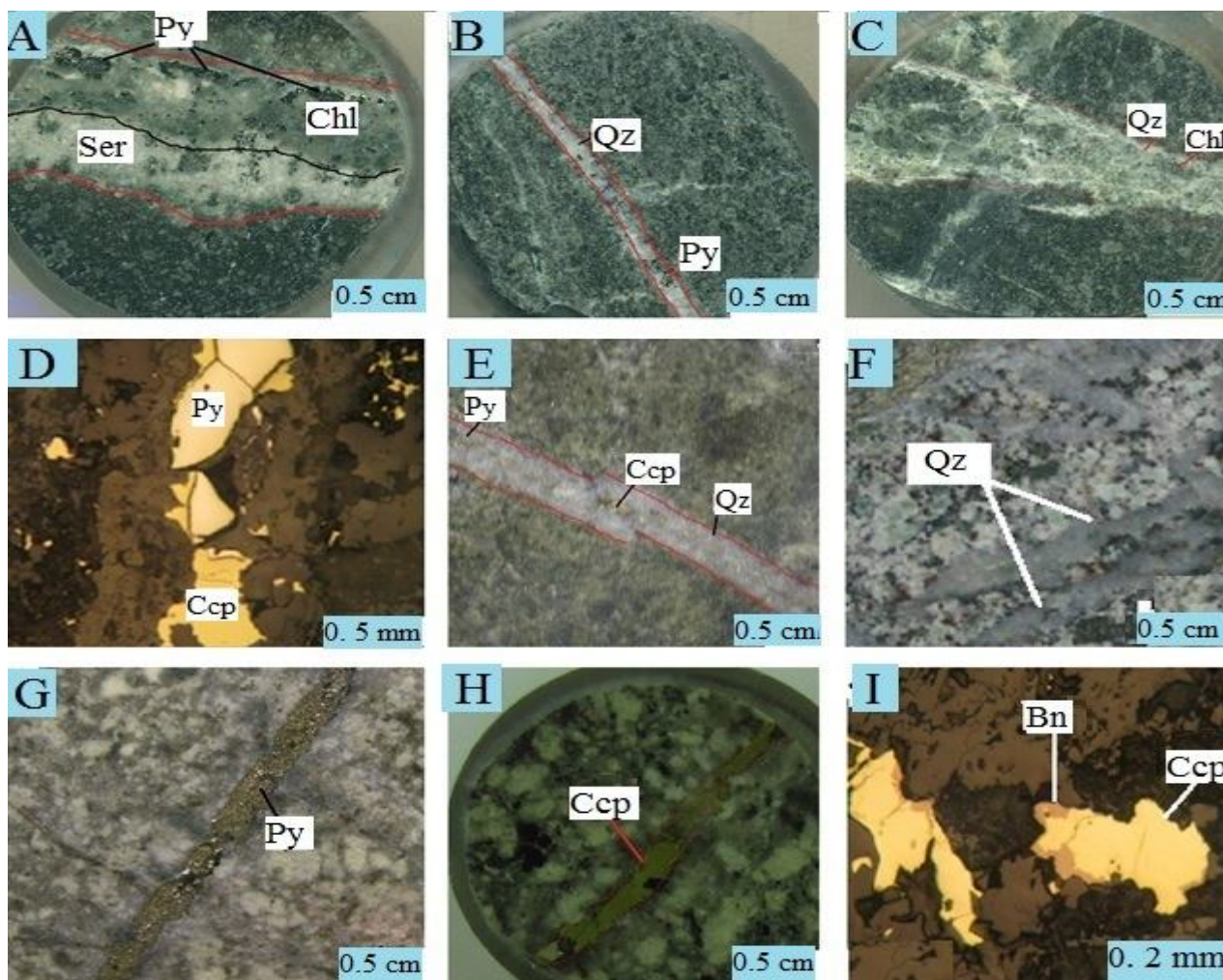
کانه‌زایی سوپرژن: کانی‌زایی مس در رخنمون‌ها اغلب به‌صورت کانی‌زایی سوپرژن است و از اکسیدهای آهن مثل هماتیت، لیمونیت، گوتیت و جاروسیت و کربنات‌های مس تشکیل شده است. گزارش‌هایی از تشکیل اکسیدهای مس، مس خالص و یک زون غنی‌شده سولفیدی مهم در گمانه شماره ۶ در بخش جنوبی وجود دارد (Mohammadzadeh, 2009). به‌طور کلی ضخامت زون کانه‌زایی سوپرژن نسبت به زون هیپوژن در بخش شمالی خیلی کمتر است و فقط در اعماق سطحی نشانه‌هایی از آن یافت می‌شود. مهم‌ترین دلیل گسترش ضعیف کانی‌زایی سوپرژن و منطقه غنی‌شده در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه این است که کانی‌زایی هیپوژن مس توسط آبرفت‌ها پوشیده شده است و رخنمون‌های کمی از آن در سطح زمین دیده می‌شود؛ به‌طوری‌که با آب‌های جوی و زیرزمینی تماس زیادی نداشته است. علاوه بر این مقدار سولفیدها به‌ویژه پیریت نسبت به بخش جنوبی و دیگر کانسارهای پورفیری کمتر است. به هر حال وجود آب‌های جوی، خردشدگی‌ها و شکستگی‌های فراوان و همچنین حضور کانی‌های سولفیدی در سنگ میزبان در رخنمون‌ها زمینه گسترش دگرسانی و کانی‌سازی سوپرژن را فراهم می‌کند که احتمالاً بعضی از این عوامل در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه موجود نبودند.

توالی پاراژنتیکی کانی‌های موجود در کانسار چاه‌فیروزه در شکل ۱۱ آمده است. بر اساس شکل ۱۱، در مرحله هیپوژن،

حدود ۲ تا ۵ میلی‌متر هستند و کانی‌زایی در آن دیده نمی‌شود. به نظر می‌رسد رگچه‌های ۱ و ۲ در چاه‌فیروزه مشابه با رگه‌های نوع D در کانسارهای مس پورفیری باشند. رگه نوع D با حضور سولفید توده‌ای همراه یا بدون کالکوپیریت، انارژیت و دیگر سولفیدها، سولفوسلت‌ها، کوارتز و کربنات و هاله نازک فلیک مشخص می‌شود. رگه نوع D، رگه‌های نوع A و B را قطع می‌کند. رگچه‌های گروه ۴ در محدوده مورد بررسی شامل پیریت، کالکوپیریت، کوارتز و ارتوکلاز هستند که در ابتدا پیریت تشکیل شده و سپس کالکوپیریت به‌وجود آمده است. ضخامت این رگچه‌ها از ۳ تا ۸ میلی‌متر متغیر است و دارای دیواره تقریباً منظم و در منطقه دگرسانی پتاسیک یافت می‌شود (شکل ۱۰-D و E). این گروه مشابه با رگه‌های نوع B در کانسارهای مس پورفیری هستند. رگه‌هایی که دارای دیواره‌های هماهنگ، کانی‌های شکل‌دار، تقارن داخلی، هاله نازکی از فلدسپات پتاسیم و حاوی سولفیدهایی همچون کالکوپیریت و مولیبدنیت هستند، به رگه‌های نوع B شناخته می‌شوند. رگچه‌های گروه ۵ در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه دارای کوارتز و مگنتیت و احتمالاً ارتوکلاز و فاقد کانی‌زایی مس هستند، در منطقه پتاسیک گسترش دارند و مشابه با رگه‌های نوع A در کانسارهای مس پورفیری هستند. رگه‌های نوع A که دارای کانی‌های اغلب گرانولار و بی‌شکل دما بالا هستند، رگه‌هایی نامنظم، ناپیوسته و نامتقارن هستند که توسط رگه‌های نوع B و C قطع می‌شوند. ضخامت رگچه‌های پیریتی و رگچه‌های کالکوپیریتی که هر کدام به تنهایی نیز در کانسار یافت می‌شوند، به بیش از ۵ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۱۰-G و H). این رگچه‌ها بیشتر در منطقه فلیک دیده می‌شوند و می‌توانند متعلق به رگه نوع D باشند. در رگچه‌های گروه ۸ ابتدا کالکوپیریت تشکیل شده و سپس بورنیت در حاشیه‌ها و داخل کالکوپیریت تشکیل شده است (شکل ۱۰-J). این رگچه‌ها نیز

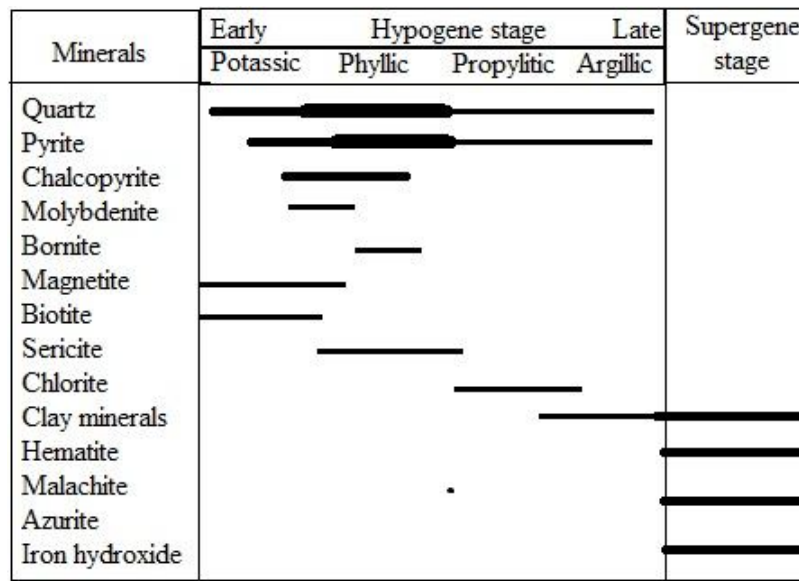
طی تشکیل دگرسانی پتاسیک در مرحله پیشین هیوژن تشکیل شده است. هماتیت نیز که از اکسیدشدن مگنتیت تشکیل شده از کانی‌های سوپرژن است.

پیریت نسل اول در منطقه دگرسانی پتاسیک و پیریت نسل دوم در منطقه دگرسانی فلیک تشکیل شده‌اند. کالکوپیریت و مولیدنیت بیشتر در منطقه دگرسانی پتاسیک و بعد از آن بورنیت به مقدار کم در دگرسانی فلیک شکل گرفته‌اند. مگنتیت در



شکل ۱۰. انواع رگچه‌های کوارتزی و کانی‌زایی شده در بخش شمالی کانسار مس پورفیری چاه‌فیروزه، A: رگچه کلریت + پیریت دارای هاله سریستی، B: رگچه‌های کلریت + کوارتز، C: رگچه کلریت + پیریت دارای هاله سریستی، D: تصویر میکروسکوپی از رگچه پیریت + کالکوپیریت + کوارتز در نور منعکس، E: رگچه پیریت + کالکوپیریت + کوارتز، F: رگچه‌های کوارتز که حاوی مگنتیت هستند، G: رگچه پیریت، H: رگچه کالکوپیریت و I: تصویر میکروسکوپی از رگچه کالکوپیریت + بورنیت + کوارتز در نور منعکس. Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Bn: بورنیت، Chl: کلریت، Ser: سریست، Qz: کوارتز، علائم اختصاری کانی‌ها بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 10. Mineralized quartz veinlets types in northern part of the Chahfiruzeh porphyry copper deposit, A: chlorite + pyrite veinlet with a sericitic halo, B: chlorite + quartz veinlet, C: chlorite + pyrite veinlet with a sericitic halo, D: microphotograph of pyrite + chalcopyrite + quartz veinlet in reflected light, E: veinlet of pyrite + chalcopyrite + quartz, F: quartz veinlets containing magnetite, G: veinlet of pyrite, H: chalcopyrite veinlet, and I: microphotograph of chalcopyrite + bornite + quartz veinlet in reflected light. Py: pyrite, Ccp: chalcopyrite, Bn: bornite, Chl: chlorite, Ser: sericite, Qz: quartz, Abbreviations after Whitney and Evans (2010)



شکل ۱۱. توالی پاراژنتیکی بخش شمالی کانسار مس چاه‌فیروزه

Fig. 11. Paragenetic sequence of northern part of the Chahfiruzeh porphyry copper deposit

تهیه‌شده از حفاری‌ها، انواع دگرسانی‌های تفکیک‌شده در بخش شمالی کانسار مس پورفیری چاه‌فیروزه به شرح زیر است: دگرسانی پتاسیک، دگرسانی فلیک، دگرسانی پروپلیتیک و دگرسانی آرژیلیک.

دگرسانی

با توجه به مشاهدات صحرائی، بررسی‌های سنگ‌نگاری و نتایج حاصل از آنالیز XRD (جدول ۳) سنگ‌های کانی‌زایی شده اغلب غنی از رگچه‌ها و دانه‌های کوارتز هستند و سیلیسی شدن مشخص‌ترین دگرسانی است. با وجود این در لاگ‌های

جدول ۳. نتایج XRD نمونه‌های برداشت‌شده از زون‌های مختلف دگرسانی در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه

Table 3. XRD results of samples from the various alteration zones in northern part of the Chahfiruzeh ore deposit

CHF-43-335	quartz + magnetite + clinochlore + biotite + kaolinite + albite
CHF-57-642	quartz + andesine + clinochlore + biotite + calcite + kaolinite+ illite + albite
CHF-63- 240	quartz + andesine + clinochlore + calcite + dickite + muscovite + biotite
CHF-69-612	quartz + dickite + albite + clinochlore + pyrite + albite + biotite + muscovite
CHF-70-484	quartz + albite + dickite + calcite + clinochlore + orthociaise + muscovite
CHF-70-645	quartz + clinochlore + albite + calcite + dickite + montmorillonite + biotite
CHF-91-342	quartz + albite + clinochlore + dickite + calcite + biotite + labradorite + muscovite
CHF-79-490	quartz + clinochlore + andesine + muscovite + biotite + albite

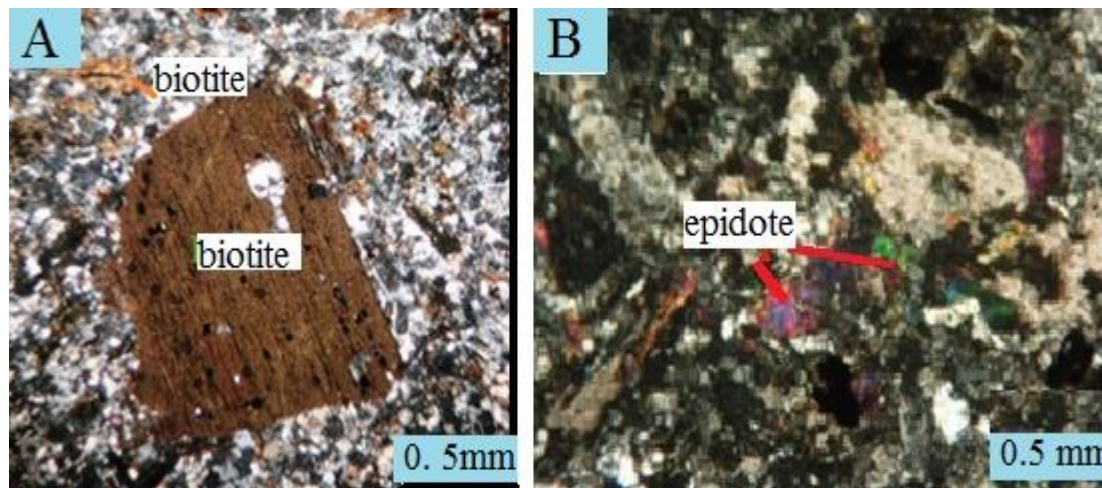
کالکوپیریت و مولیدنیت از کانه‌های اصلی این زون است. **دگرسانی پروپیلیتیک:** دگرسانی پروپیلیتیک بیشتر در سنگ‌های ولکانیکی رخمون یافته در اطراف پهنه کانی‌زایی شده، گسترش یافته است. گسترش این دگرسانی در حفاری‌ها محدود و ضعیف است. سنگ‌های دارای این دگرسانی به صورت سبز خودنمایی می‌کنند. کانی‌سازی در منطقه دگرسانی پروپیلیتیک ضعیف و غیر اقتصادی است. کانی‌های مهم این زون اپیدوت، کلریت و کلسیت (شکل ۱۲-B) و کانی‌های فرعی این دگرسانی آلپیت و سریسیت هستند. اپیدوت، کلریت و کلسیت نه تنها جانشین پلاژیوکلازها و کانی‌های آهن منیزیم‌دار شده‌اند؛ بلکه در فضاها خالی نیز تشکیل شده‌اند. مرز دگرسانی پروپیلیتیک با دیگر زون‌های دگرسانی همچون پتاسیک و فیلیک مشخص نیست. احتمالاً فرسایش، بخش زیادی از این دگرسانی را در محدوده کانی‌زایی شده، از بین برده است.

دگرسانی فیلیک: به نظر می‌رسد بیشتر سنگ‌های کانی‌زایی شده در مرز دگرسانی فیلیک و پتاسیک تشکیل شده باشند. کانی‌هایی مثل کوارتز، سریسیت و پیریت شاخص زون فیلیک هستند. در اکثر نمونه‌ها آثار کانی‌زایی وجود دارد؛ ولی بیوتیت و کلریت نیز معمولاً همراه آنهاست. به همین دلیل در این پژوهش چنین نمونه‌هایی تحت دگرسانی پتاسیک و فیلیک بررسی شدند. نمونه‌هایی که درصد زیادتری از رگچه‌های پیریت و کوارتز دارند و به خصوص سیلیسی شدن در آنها شدیدتر بوده است، در این مقاله به عنوان دگرسانی فیلیک در نظر گرفته می‌شوند. مرز بین دگرسانی پتاسیک و فیلیک مرزی تدریجی است و به طور کلی زون کانی‌زایی شده، به شدت تحت تأثیر رگچه‌های سیلیسی و اغلب در محدوده دگرسانی پتاسیک و فیلیک واقع شده است. دگرسانی فیلیک در مغزه‌های حفاری با رنگ روشن‌تر نسبت به بقیه دگرسانی‌ها مشخص می‌شود که ناشی از تجزیه فلدسپات‌ها و کانی‌های فرومنیزین اولیه و ثانویه (مانند بیوتیت و هورنبلند) و فراوانی سریسیت و کوارتز است (شکل ۱۳-A). در بعضی جاها به خصوص مناطق کم عمق‌تر،

با توجه به بررسی‌های انجام شده در این پژوهش که با بررسی نمونه‌ها از اعماق متفاوت است، دگرسانی‌ها در بخش شمالی کانسار چاه فیروزه با دگرسانی‌های شاخص دیگر کانسارهای مس پورفیری تاحدی متفاوت است. چنان‌که نتایج XRD در جدول ۳ نشان می‌دهد، بیشتر نمونه‌ها نوعی دگرسانی را نشان می‌دهند که تعدادی از کانی‌های شاخص دگرسانی پتاسیک (بیوتیت و ارتوکلاز)، دگرسانی فیلیک (سریسیت و پیریت)، دگرسانی پروپیلیتیک (آلیت، کلریت و کلسیت) و دگرسانی آرژیلیک (کائولینیت، مونت موریلونیت، دیکیت) در آنها مشاهده می‌شود. در این دگرسانی بعد از کوارتز که فاز اصلی در همه نمونه‌های مورد آزمایش است، بیوتیت، سریسیت (مسکویت) و کلریت درصد بیشتری را شامل می‌شوند. بیشتر این نمونه‌ها به دلیل داشتن بیوتیت و سریسیت تحت عنوان دگرسانی پتاسیک توصیف شده و به نقشه در می‌آیند. در این دگرسانی وجود رگچه‌های ارتوکلاز مینیرالیزه به همراه کوارتز و جانشینی‌های شاخص بیوتیت به جای آمفیبول و دیگر کانی‌های آهن و منیزیم‌دار و یا ارتوکلاز به جای پلاژیوکلاز کمیاب است. **دگرسانی پتاسیک:** این دگرسانی طبق تعریفی که در بالا شد، در چاه فیروزه گسترش نسبتاً زیادی دارد و با مجموعه کانی‌های کوارتز + پلاژیوکلاز + بیوتیت + ارتوکلاز + سریسیت + کلریت + پیریت نسل اول + کالکوپیریت \pm مولیدنیت \pm مگنتیت مشخص می‌شود. علاوه بر توده پورفیری مولد دگرسانی و کانی‌سازی، سنگ‌های آندزیتی میزبان نیز تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند. بیوتیت، فراوان‌ترین کانی در این دگرسانی است و این امر سبب شده است که سنگ دگرسان شده، رنگ تیره به خود بگیرد. بیوتیت‌ها در این دگرسانی از دو نوع ماگمایی و گرمابی هستند. بیوتیت‌های گرمابی بیشتر به صورت بلورهای سوزنی و کوچکی در اطراف و فضای بین دیگر بلورها دیده می‌شوند. گسترش این دگرسانی در مناطق عمیق‌تر بیشتر است (شکل ۱۲-A). احتمالاً کانی‌های رسی در امتداد بعضی از رگچه‌های موجود در این زون رشد کرده‌اند. مهم‌ترین ویژگی این دگرسانی وجود رگچه‌های سیلیسی حاوی سولفیدهاست.

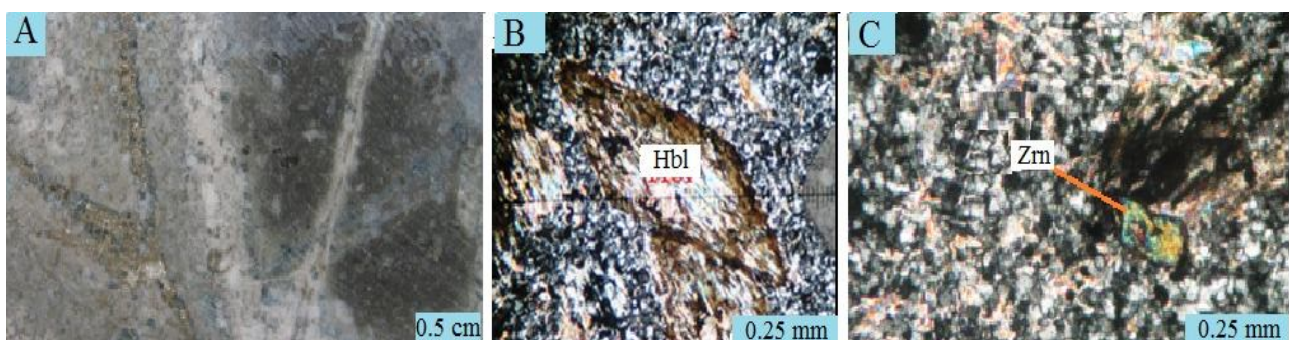
دگرسانی فلیک در چاه‌فیروزه شامل سریسیت + کوارتز ± پیریت نسل دوم ± کلریت ± کالکوپیریت ± بورنیت هستند. در نمونه دستی، بلورهای سریسیت ریزدانه و دارای رنگ روشن هستند. کلریت در این دگرسانی از تجزیه کانی‌های فرومینیزین مانند بیوتیت و هورنبلند، به دست آمده است.

سریسیت به همراه کلریت در فنوکریست‌های هورنبلند جانشین شده است (شکل ۱۳-B). سریسیت در سنگ‌های سطحی در زمینه سنگ رشد کرده است (شکل ۱۳-C). در بخش‌های سطحی، دگرسانی فلیک جای خود را به دگرسانی آرژیلیک داده است. مجموعه کانی‌شناسی در محدوده با



شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپی در نور پلاریزه متقاطع از بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه، A: بیوتیت‌های ریز در زمینه نشان‌دهنده دگرسانی پتاسیک و B: اپیدوت و کلسیت شاخص دگرسانی پروپیلیتیک

Fig. 12. Microscopic photographs under crossed polarized light from northern part of the Chahfiruzeh ore deposit, A: fine-grained biotites in groundmass indicate potassic alteration, and B: epidote and calcite are typical of propylitic alteration

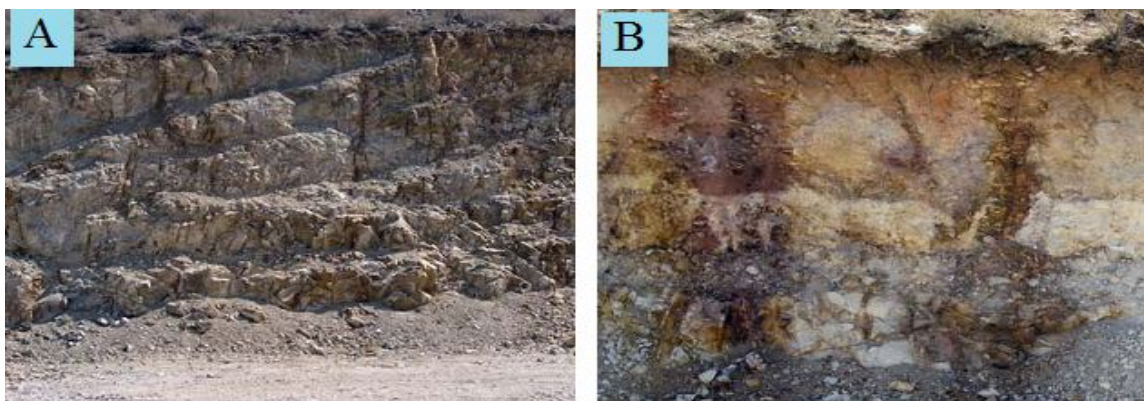


شکل ۱۳. تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی دگرسانی فلیک از بخش شمالی کانسار مس چاه‌فیروزه، A: نمونه دستی از دگرسانی سریسیتی و رگچه‌های کوارتز و سولفید، B: تصویر میکروسکوپی از سریسیتی شدن زمینه و بلورهای آمفیبول و C: تصویر میکروسکوپی از سریسیتی شدن سنگ آذرین (در نور پلاریزه متقاطع). Hbl: هورنبلند، Zrn: زیرکن، علایم اختصاری کانی‌ها بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 13. Macroscopic and microscopic photographs of phyllic alteration from northern part of the Chahfiruzeh deposit, A: a hand specimen from phyllic alteration and quartz and sulfide veinlets, B: microphotographs of sericitized groundmass and sericitized amphibole crystals, and C: microphotographs of sericitization of igneous rocks (Crossed polarized light). Hbl: hornblende, Zrn: zircon, Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

نمونه‌های رسی در نمونه‌هایی که از سطح برداشت شده است، بیشتر است و این نشان می‌دهد که دگرسانی آرژیلیک در مناطق سطحی گسترش بیشتری دارد. مهم‌ترین دگرسانی دیده شده در رخنمون‌ها و همراه کانی‌زایی سوپرژن، دگرسانی آرژیلیک است که به صورت پودر شده و رنگ سفید است؛ هرچند وجود اکسیدهای آهن باعث رنگ‌های قرمز و زرد در آنها شده است (شکل ۱۴-A و B).

دگرسانی آرژیلیک: این دگرسانی نیز به صورت زون مشخصی که فقط کانی‌های رسی در آن حضور داشته باشد، گسترش ندارد. کانی‌های رسی چنان‌که از جدول ۳ دریافت می‌شود، در همه نمونه‌ها وجود دارد و کانی‌هایی مثل کائولینیت، مونت موریلونیت، ایلیت و دیکیت در آنها ثبت شدند. به نظر می‌رسد که این دگرسانی بیشتر در اطراف رگچه‌های سیلیسی گسترش دارد و نمی‌توان آن را به عنوان فراگیر معرفی کرد. درصد

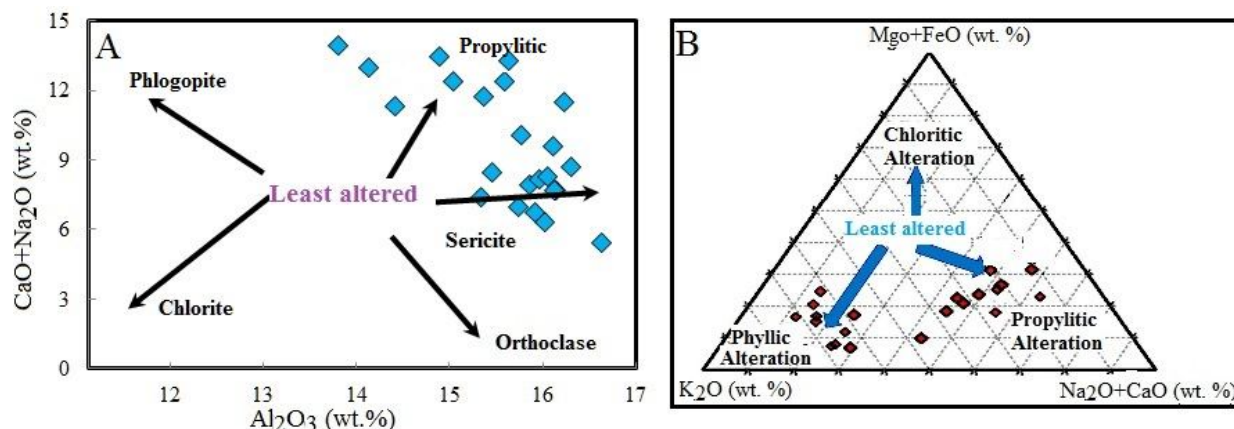


شکل ۱۴. دگرسانی آرژیلیک در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه، A: سنگ‌های رخنمون‌یافته در بالای زون مینیرالیزه که کانی‌های رسی در آنها تشکیل شده است و B: رخنمون‌های به شدت دگرسان شده به کانی‌های رسی بر اثر فرایندهای سوپرژن. آغستگی به هیدرواکسیدهای آهن باعث رنگ قرمز شده است.

Fig. 14. Argillic alteration in northern part of the Chahfiruzeh deposit A: clay minerals in outcrops above mineralized zone, and B: outcrops that were strongly altered to clay minerals by supergene processes. The reddish color was caused by iron hydroxide contamination.

به نظر می‌رسد که دگرسانی آرژیلیک در سطح از برخورد آب‌های جوی با سولفیدها حاصل شده باشد. انحلال سولفیدها باعث شده است خاصیت اسیدی آب‌های جوی افزایش پیدا کند و بر اثر هیدرولیز شدید عناصر قلیایی و بازی مثل پتاسیم، سدیم، کلسیم، منیزیم و آهن از محیط خارج و کانی‌های رسی تشکیل شوند.

بر اساس داده‌های آمده در جدول ۲، نمودارهایی برای تفکیک دگرسانی‌ها ترسیم شد (شکل ۱۵). در نمودار دوتایی Al_2O_3 در مقابل $CaO+Na_2O$ ، دگرسانی غالب در کانسار چاه‌فیروزه شامل دگرسانی فلیک و پروپیلیتیک است (شکل ۱۵-A). در شکل ۱۵-B نیز نمونه‌های مورد بررسی در دو محدوده دگرسانی فلیک و پروپیلیتیک واقع شده‌اند. دلیل تفاوت نتایج ژئوشیمی با نتایج پتروگرافی، حضور نادر ارتوکلاز در سنگ‌های بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه است. در بررسی‌های پتروگرافی نیز حضور هم‌زمان کوارتز، سریسیت، بیوتیت، کلریت و آلپیت در بیشتر نمونه‌های بررسی شده، شواهدی از هر سه دگرسانی فلیک، پروپیلیتیک و پتاسیک را نشان می‌دهد. علاوه بر این شدت دگرسانی زیاد نیست و کانی‌های اولیه مثل پلاژیوکلاز هنوز ماهیت اولیه خود را حفظ کرده‌اند. در این پژوهش به دلیل تشکیل بیوتیت‌های گرمابی در بیشتر نمونه‌های مورد بررسی، نوع دگرسانی را می‌توان دگرسانی پتاسیک ارزیابی کرد.



شکل ۱۵. نمودارهای تفکیک دگرسانی (Myers, 1994) برای بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه، A: نمونه‌های مورد بررسی در محدوده دگرسانی فیلیک و پروپیلیتیک واقع شده‌اند و B: نمونه‌های مورد بررسی در محدوده دگرسانی فیلیک و پروپیلیتیک واقع شده‌اند.

Fig. 15. Alteration discriminated diagrams (Myers, 1994) for northern part of the Chahfiruzeh ore deposit, A: study samples plotted in the sericitic and propylitic alteration fields, and B: all samples plotted in the sericitic and propylitic alteration fields.

آنومالی‌هایی از سرب و روی به ترتیب تا ۴/۵ و ۳ درصد را نشان می‌دهند که احتمالاً نشانه حضور رگه‌های گالن و اسفالریت است. توزیع مس و مولیبدن برای گمانه‌های متعددی از بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه از سطح تا اعماق ۶۰۰ متری بررسی شده است و نمودارهای توزیع این عناصر برای تمام گمانه‌هایی که نمونه‌برداری شدند، مشابه با شکل ۱۷ ترسیم شد. بیشترین میزان مس مربوط به گمانه شماره ۴۴ در عمق ۲۱۰ تا ۲۱۲ متری با مقدار ۴/۵ درصد مس در کوارتز دیوریت با دگرسانی پتاسیک است و بیشترین مقدار مولیبدن در گمانه ۸۰ برابر ۰/۱۷ درصد و در عمق ۶۰۸ متری در گرانودیوریت با دگرسانی فیلیک وجود دارد. ستون افقی دگرسانی در پایین شکل ۱۶، نشان‌دهنده مناطق دگرسانی در طول گمانه‌ها هستند که از سمت بالا به پایین عمق گمانه‌ها زیاد می‌شود. در این مقاله فقط نمودارهای گمانه‌های ۶۸ و ۷۳ آورده شده است. بیشتر نمودارها نشان می‌دهند که بیشترین کانی‌زایی مس در زون پتاسیک اتفاق افتاده است و توزیع آنها در مناطق سطحی و مناطق عمیق، روند خاصی ندارد و کاهش و افزایش مقدار مس از سطح تا اعماق برای بیشتر گمانه‌ها یکسان است (شکل ۱۷-A و B)؛ هرچند عیارهای مس در گمانه‌های مختلف، متفاوت است

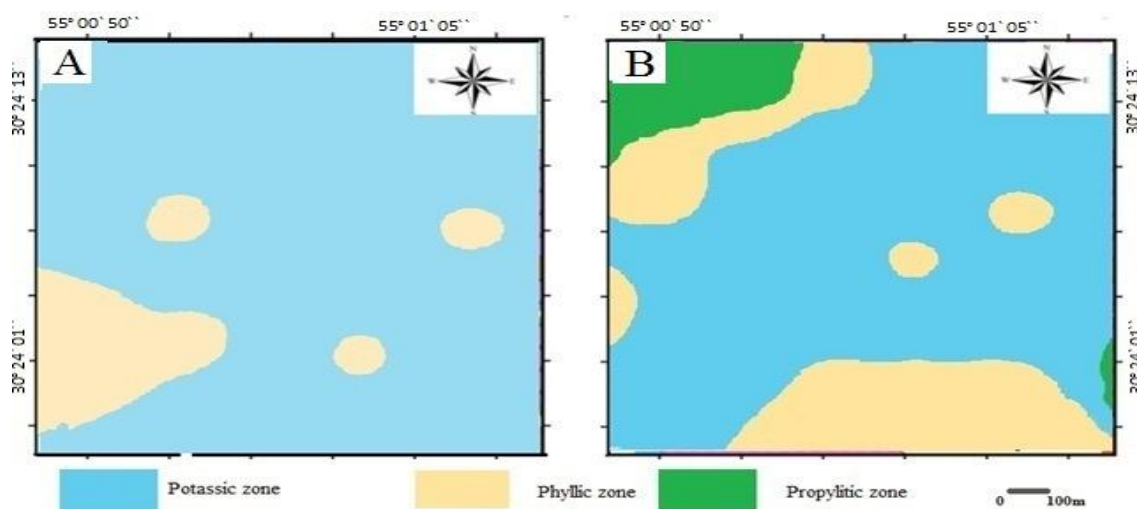
نقشه زون‌های دگرسانی با استفاده از داده‌های حاصل از آنالیزهای ارائه‌شده در این پژوهش و داده‌های موجود در بایگانی کانسار برای اعماق ۱۰ و ۴۰۰ متری ترسیم شده است (شکل ۱۶). در عمق ۱۰ متری، بخش عمده بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه به وسیله دگرسانی پتاسیک اشغال شده است و دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک نیز در حاشیه‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۱۶-A). در این شکل، دگرسانی پتاسیک در مرکز و سپس دگرسانی سربسیت و دگرسانی پروپیلیتیک به صورت هاله‌ای در اطراف قرار گرفته است. نقشه‌های دگرسانی برای اعماق دیگر هم ترسیم شد و از مقایسه آنها نتیجه‌گیری شد که محدوده دگرسانی پتاسیک در اعماق حدود ۴۰۰ متر (شکل ۱۶-B) بیشتر شده است و دگرسانی پروپیلیتیک در آن دیده نمی‌شود.

توزیع مس و مولیبدن

میانگین مقدار مس در بخش جنوبی ۰/۵ درصد گزارش شده است (Mohammadzadeh, 2009). بر اساس داده‌های جدول ۲، میانگین مقدار مس و مولیبدن در بخش شمالی به ترتیب ۰/۲۱ درصد و ۲۴ ppm است. از پردازش داده‌های موجود در بایگانی معدن نیز نتایج مشابهی به دست آمد. این داده‌ها

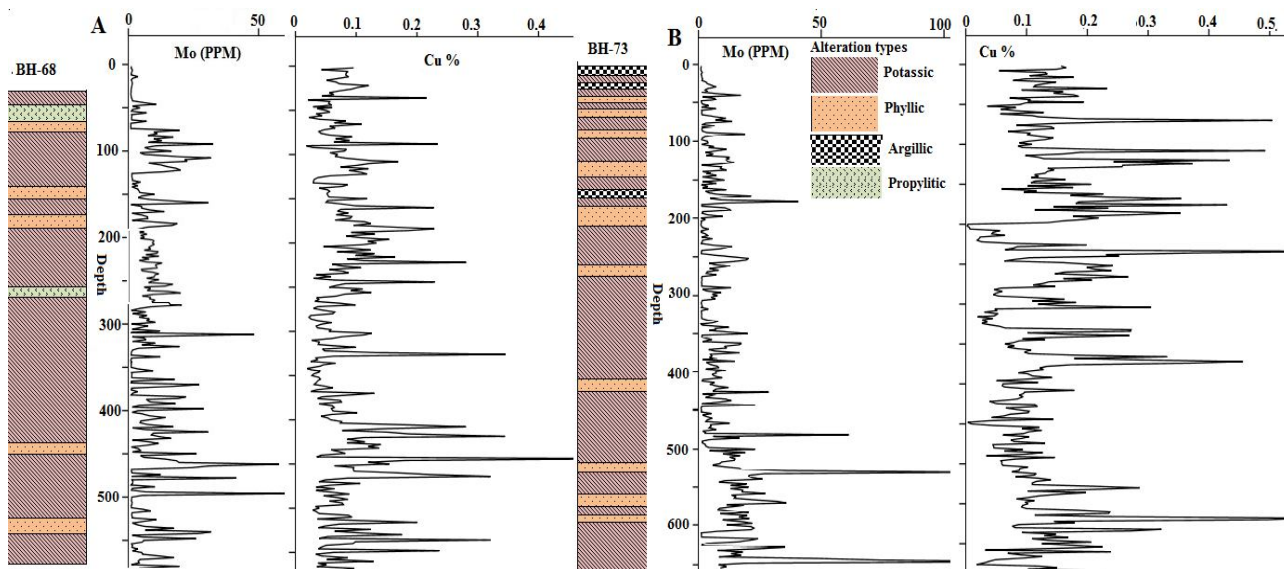
به بعد نمود بیشتری دارد؛ به طوری که مقدار مولیبدن در اعماق بیشتر از ۵۰۰ متر افزایش نشان می‌دهد (شکل ۱۷).

و نشان می‌دهد که عیارها به طور جانبی متغیرند. به طور کلی مس در زون پتاسیک عیار بیشتری را نشان می‌دهد. مقدار مولیبدن نیز در زون پتاسیک افزایش می‌یابد. این افزایش از اعماق ۴۰۰ متر



شکل ۱۶. زون‌های دگرسانی در بخش شمالی کانسار مس پورفیری چاه‌فیروزه، A: در عمق ۱۰ متری از سطح زمین و B: در عمق ۴۰۰ متری از سطح زمین

Fig. 16. Alteration zones in northern part of the Chahfiruzeh porphyry copper deposit, A: depth is 10 meters from surface, and B: depth is 400 meters from surface



شکل ۱۷. A: مقایسه نمودارهای تغییرات عیار مولیبدن و مس با انواع دگرسانی برحسب عمق در گمانه CHF-68 و B: مقایسه نمودار تغییرات عیار مولیبدن و مس با انواع دگرسانی برحسب عمق در گمانه CHF-73

Fig. 17. A: Comparison of diagrams of molybdenum and copper grade with alteration types in terms of depth for borehole CHF- 68, and B: Comparison of diagrams of molybdenum and copper grade with alteration types in terms of depth for borehole CHF- 73

نتیجه گیری

۱) واحدهای سنگی در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه اغلب سنگ‌های آذرین خروجی و نفوذی با بافت پورفیری هستند که سنگ‌های خروجی شامل گدازه‌ها و سنگ‌های آذرآواری انوسن با ترکیب آندزیت هستند. توده‌های نفوذی میوسن دارای ترکیب دیوریت، گرانودیوریت و کوارتز دیوریت هستند. پلاژیوکلاز فراون‌ترین کانی و بیوتیت و آمفیبول از کانی‌های رایج در این سنگ‌هاست.

۲) عمده‌ترین دگرسانی در بخش شمالی کانسار مس چاه‌فیروزه دگرسانی پتاسیک است. شاخص این دگرسانی، حضور و تشکیل بیوتیت گرمابی در بیشتر نمونه‌های مورد بررسی است. تشکیل سریست، کلریت و کانی‌های رسی نشان می‌دهد که این دگرسانی در امتداد رگچه‌های سیلیسی تحت تأثیر دگرسانی‌های فیلک، پروپیلیتیک و آرژیلیک واقع شده است.

۳) کانه‌زایی در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه هم در سنگ‌های خروجی و هم در سنگ‌های نفوذی صورت گرفته است. کانه‌زایی در کانسار به دو نوع کانی‌زایی هیپوزن و سوپرژن تقسیم می‌شود. در زون هیپوزن، سولفیدهای اصلی، پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و مولیبدنیت هستند و کانی‌سازی به صورت رگچه‌ای و پراکنده است. در زون سوپرژن، کانی‌های شاخص تشکیل شده شامل هیدرواکسیدهای آهن و اکسیدها و کربنات‌های مس به خصوص مالاکیت می‌شود. کانی‌زایی استوک‌ورک نیز در کانسار چاه‌فیروزه گسترش خوبی داشته و اصولاً در قسمت مرکزی و عمقی کانسار و همراه با دگرسانی‌های پتاسیک و سریست تمرکز یافته است. ترکیب کانی‌شناسی که در بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه شناسایی شده است، عبارتند از: ۱- پیریت + کلریت + کوارتز با هاله سریستی، ۲- کوارتز + پیریت، ۳- کوارتز + کلریت، ۴- کوارتز، ۵- کلریت، ۶- پیریت + کالکوپیریت + کوارتز، ۷- کوارتز + مگنتیت، ۸- پیریت، ۹- کالکوپیریت، ۱۰- رگچه کوارتز + کالکوپیریت + بورنیت و ۱۱- رگچه‌های مولیبدنیت. کانی‌زایی سوپرژن و زون غنی شده سولفیدی در بخش شمالی کانسار

چاه‌فیروزه گسترش ضعیفی دارد و به ندرت سولفیدهای سوپرژن مثل کالکوسیت، کوولیت و دیژنیت در آن دیده می‌شود. گسترش ضعیف زون غنی شده مس در این کانسار، به دلیل کم بودن پیریت اولیه و قرارگیری کانسار در اعماق است.

۴) بررسی توزیع مس و مولیبدن در گمانه‌های مختلف نشان می‌دهد که کانی‌زایی اغلب در زون پتاسیک رخ داده است. مقدار مس از اعماق کم تا اعماق زیاد در بیشتر گمانه‌ها روندی خاص را نشان نمی‌دهد؛ به طوری که مقدار آن ممکن است در بعضی گمانه‌ها در مناطق سطحی زیاد باشد و در بعضی دیگر در مناطق عمیق؛ ولی مقادیر مولیبدن در همه گمانه‌ها در اعماق زیاد افزایش می‌یابد.

۵) سبک، عیار، اندازه و وسعت کانی‌زایی، دگرسانی‌های همراه، سنگ‌های نیمه نفوذی پورفیری کالک‌آلکان و موقعیت قرارگیری آن نسبت به کانسار مس پورفیری سرچشمه و میدوک در کمان ماگمایی ارومیه دختر نشان می‌دهد که بخش شمالی کانسار چاه‌فیروزه یک کانسار مس پورفیری کم‌عیار نیمه اقتصادی است. رگچه‌های شناسایی شده نیز مشابه با یکی از رگه‌های نوع A، B و D در کانسارهای مس و مولیبدن پورفیری هستند.

۶) سنگ‌های نفوذی در بخش شمالی و بخش جنوبی کانسار چاه‌فیروزه از لحاظ کانی‌شناسی، بافت و ترکیب شیمیایی مشابه هستند و از جنوب تا شمال با طول بیش از ۱۵۰۰ متر مشاهده می‌شوند؛ ولی ظاهراً یک توده پیوسته نیستند و در بخش میانی از هم جدا شده‌اند و احتمالاً شامل دو استوک مجزا، یکی در جنوب و دیگری در شمال هستند و به همین دلیل کانسار چاه‌فیروزه به دو بخش شمالی و جنوبی تفکیک شده است. دایک‌های دیوریتی در بخش جنوبی به مقدار قابل ملاحظه یافت شده است؛ در صورتی که در بخش شمالی کمیاب هستند. گنبد داسیتی کم دگرسان شده فقط در بخش شمالی رخمون دارد. متوسط عیار مس بر حسب درصد در بخش شمالی حدود ۰/۲۱ و در بخش جنوبی حدود ۰/۵ است. زون غنی شده سوپرژن در بخش جنوبی وجود دارد؛ در حالی که در بخش

شمالی کمیاب است.

توسعه و امور اکتشاف، به‌خاطر حمایت مالی از این پژوهش صمیمانه سپاسگزاری می‌کنند. همچنین از آقای مهندس تقی‌نژاد، خانم مهندس حسینی و آقای مهندس احسان زین‌الدینی به‌خاطر همکاری در انجام این پژوهش قدردانی می‌شود.

قدردانی

نویسندگان از شرکت ملی مس ایران، به‌ویژه امور تحقیق و

References

- Adeli Sarcheshmeh, A., Karimi, M., Bahroudi, E. and Elyasi, G., 2009. Determination of boreholes location by GIS in Chahfiruzeh. Sciences Magazine of University of Tehran, 35(2):85–97. (in Persian)
- Arancibia, O.N. and Clark, A.H., 1996. Early magnetite–amphibole–plagioclase alteration–mineralization in the Island copper porphyry copper–gold–molybdenum deposit, British Columbia. Economic Geology, 91(2): 402–438.
- Asadi, S., Moore, F. and Zarasvandi, A., 2014. Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano–plutonic belt, Kerman region, Iran: A review. Earth Science Reviews, 138(1):25–46.
- Barzegar, H., 2007. Geology, petrology, and geochemical characteristics of alteration zones within the Seridune prospect, Kerman, Iran. Ph.D. thesis, Aachen University, Aachen, Germany, 180 pp.
- Bazin, D. and Hubner, H., 1969. Copper deposits in Iran. Geology Survey, Tehran, Iran, Report, 13, 232 pp.
- Boomeri, M., Nakashima, K. and Lentz, D.R., 2009. The Miduk porphyry Cu deposit, Kerman, Iran: a geochemical analysis of the potassic zone including halogen element systematic related to Cu mineralization processes. Journal of Geochemical Exploration, 103(1): 17–29.
- Boomeri, M., Nakashima, K. and Lentz, D.R., 2010. The Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran: a mineralogical analysis of the igneous rocks and alteration zones including halogen element systematics related to Cu mineralization processes. Ore Geology Reviews, 38(4): 367–381.
- Cooke, D.R., Hollings, P. and Walshe, J.L., 2005. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls. Economic Geology, 100(5): 801–818.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979. The Interpretation of Igneous Rocks. Allen and Unwin, London, 450 pp.
- Dimitrijevic, M.D., 1973. Geology of Kerman region. Geology survey, Tehran, Iran, Report YU/53, 334 pp.
- Dimitrijevic, M.D., Dimitrijevic, M.N., Djordjevic, M. and Djokovic, I., 1971. Geological map of Shar-e-Babak II (1:100000 scale). Geological Survey, Tehran, Iran.
- Einali, M., Alirezaei, S. and Zaccarini, F., 2014. Chemistry of magmatic and alteration minerals in the Chahfiruzeh porphyry copper deposit, south Iran: implications for the evolution of the magmas and physicochemical conditions of the ore fluids. Turkish Journal of Earth Sciences, 23(2): 147–165.
- Förster, H., 1978. Mesozoic and Cenozoic metallogenesis in Iran. Journal of the Geological Society, 135(4): 443–455.
- Golestani, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Haidarian Shahri, M.R., 2017. Characterization of fluid inclusions and sulfur isotopes in the Ijo porphyry copper deposit, northwest of Share-e-Babak. Journal of Economic Geology, 9(1): 25–55. (in Persian with English abstract)
- Guilbert, J.M. and Park, J.R., 1997. The geology of ore deposits. Freeman and Company, New York, 985 pp.
- Gustafson, L.B. and Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. Economic Geology, 70(5): 857–912.
- Harris, A.C., Kamenetsky, V.S., White, N.C., van Achterbergh, E., and Ryan, C.G., 2003. Melt inclusions in veins: Linking magmas and porphyry Cu deposits. Science, 302(5653): 2109–2111.
- Hassanzadeh, J., 1993. Metallogenic and

- tectonomagmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of Iran (Shahre Babak area, Kerman province). Ph.D. thesis, University of California, Los Angeles, America, 204 pp.
- Hedenquist, J.W. and Richards, J.P., 1998. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits. *Reviews in Economic Geology*, 10(1): 235–256.
- Hezarkhani, A., 2006. Petrology of the intrusive rocks within the Sungun porphyry copper deposit, Azerbaijan, Iran. *Jurnal of Asian Earth Sciences*, 27(3): 326–340.
- Hezarkhani, A., 2009. Hydrothermal fluid geochemistry at the Chah-Firozeh porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusion, *Jornal of Geochemical Exploration*, 101(3): 254–264.
- Hezarkhani, A. and William-Jones, A.E., 1998. Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Economic Geology*, 93(5): 651–670.
- Jonkovic, S., 1977. The copper deposits and geotectonic setting of Tethyan Eurasian metallogenic belt. *Mineralium Deposita*, 12(1): 37–47.
- Kazemi-Mehrnia, A., 2010. Characteristics of leached capping and evolution of supergene enrichment of Northwest Kerman belt copper-molybdenum porphyry deposits. Ph.D. thesis, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran, 310 pp.
- Kesler, S.E., 1973. Copper, molybdenum and gold abundances in porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 68(1): 106–112.
- Kerrick, R., Goldfarb, R., Groves, D., Garwin, S. and Jia, Y., 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China Series D (Earth Sciences)*, 43(1 supplement): 1–68.
- Lowell, J.D. and Guilbert, J.M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4): 373–408.
- Maanijou, M., Mostaghimi, M., Abdollahy Riseh, M. and Sepahi Gerow, A.A., 2012. Systematic sulfur stable isotope and fluid inclusion studies on veinlet groups in the Sarcheshmeh porphyry copper deposit: based on new data. *Journal of Economic Geology*, 4(2): 217–239. (in Persian with English abstract)
- Mohammadzadeh, Z., 2009. Geology, alteration and copper mineralization in Chahfiruzeh area, Shahr Babak, Kerman. M.Sc. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 200 pp. (in Persian)
- Myers, G.L., 1994. Geology of the copper Canyon-Fortitude skarn system, Battle Mountain, Nevada. Ph.D. thesis, Washington State University, Pullman, Washington, America, 393 pp.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Pouramini, S., 2008. Investigation of petrography, geochemistry and petrogenesis of Kahtokerha rocks and its relationship with mineralization. M.Sc. thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, 190 pp. (in Persian)
- Richards, J.P., 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, 98(8): 1515–1533.
- Shafiei, B., 2008. Metallogenic model of Kerman porphyry copper belt and its exploratory approaches. Ph.D. thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, 257 pp. (in Persian)
- Shafiei, B. 2010. Lead isotope signatures of the igneous rocks and porphyry copper deposits from the Kerman Cenozoic magmatic arc (SE Iran), and their magmatic-metallogenetic implications. *Ore Geology Reviews*, 38(1–2): 27–36.
- Shafiei, B. and Shahabpour, J., 2008. Gold distribution in porphyry copper deposits of Kerman region, southeastern Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 19(3): 247–260.
- Shahabpour, J., 1982. Aspects of alteration and mineralization at the Sar-Cheshmeh copper-molybdenum deposit, Kerman, Iran. Ph.D. Thesis, Leeds University, U.K., 342 pp.
- Shahabpour, J., 1999. The role of deep structures in the distribution of some major ore deposits in Iran, NE of the Zagros thrust zone. *Journal of Geodynamics*, 28(2–3): 237–250.
- Sheikhzadeh, A., Mokhtari, A., Fatheianpur, N. and Sahebazamani, N., 2011. Isolation of high-

- grade copper zone using exploratory data analysis on a case study, Chahfirozeh deposit. 29th Symposium of Earth Sciences, Geological Survey and Mineral Exploration, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry-copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- Taghipour, N., Aftabi, A. and Mathur, R., 2008. Geology and Re–Os geochronology of mineralization of the Miduk porphyry copper deposit. *Resource Geology*, 58(2): 143–160.
- Sun, W., Huang, R.F., Li, H., Hu, H.B., Zhang, C.C., Sun, S.J., Zhang, L.P., Ding, X., Li, C.Y., Zartman, R. E. and Ling, M.X., 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas. *Ore Geology Reviews*, 65(1) : 97-131.
- Waterman, G.C. and Hamilton, R.L., 1975. The Sar–Cheshmeh porphyry copper deposit. *Economic Geology*, 70(3): 568–576.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Wilkinson, J.J., 2013. Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs. *Nature Geoscience*, 6(77): 917–925.
- Yousefi, S.J. and Moradian, A., 2012. Cu-Au mineralization pattern in Chahargonbad (Sirjan) using mineralogy, alteration, geochemical and statistical studies. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 135-153. (in Persian with English abstract)
- Zarasvandi, A., Liaghat, S. and Zentilli, M., 2005. Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper deposits, Central Iran. *International Geology Review*, 47(6): 620–646.
- Zeinadini, Z., 2013. Cu and Mo mineralization and geochemistry of north part of Chahfirozeh porphyry copper deposit. M.Sc. thesis, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran, 112 pp. (in Persian with English abstract)



Investigation of petrography, mineralogy and alteration of northern part of the Chahfiruzeh porphyry copper deposit, northwest of Shar-e-Babak, Kerman

Mohammad Boomeri*, Habib Biabangard and Zahra Zeinadini

Department of Geology, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Submitted: Mar. 17, 2017

Accepted: Dec. 11, 2017

Keywords: *Hydrothermal solutions, porphyry Cu-Mo mineralization, Dehaj–Sarduieh, Urumieh- Dokhtar magmatic belt*

Introduction

The Chahfiruzeh porphyry copper deposit is located at 35 Km northwest of Shar-e-Babak in Dehaj–Sarduieh part of the Urumieh- Dokhtar magmatic arc (UDMA). The world class porphyry Cu deposits, such as Sarcheshmeh, Meiduk, Sungun and several other Cu-porphyry in the UDMA have been numerously studied, for example: Boomeri, et al., (2009, 2010), and Asadi et al., (2014). The Chahfiruzeh Cu porphyry is divided into two parts of the southern and northern deposits. The southern deposit was studied by Hezarkhani (2006), and Sheikhzadeh et al., (2011). This paper studies the northern part to distinguish mineralized rock units, alteration types, mineralization style, ore mineralogy and geochemical characteristics.

Geology

Geology of the northern part of the Chahfiruzeh area consists of upper Cretaceous-Eocene andesitic lava, pyroclastic and volcanoclastic rocks that have been intruded by Oligo-Miocene intermediate stocks and dikes (Dimitrijevic, 1973). Neogene rocks in the area are mainly alkali basalt to dacitic domes and Quaternary alluvium deposits.

Method and material

During the field studies more than 100 samples were taken from the boreholes and outcrops. Among them 25 thin sections and 39 polished sections were studied by microscopic methods, 6 samples from the alteration zones, 8 samples from

the less altered rocks and 25 samples from the mineralized rocks were examined and analyzed by XRD, XRF and ICP-OES, respectively. The analyses and XRD data are presented in Tables 1, 2 and 4.

Result and discussion

Petrography

The igneous rocks in the northern part occur as extrusive and intrusive. The extrusive rocks are dacite and andesite and intrusive rocks are diorite, granodiorite and quartzdiorite. They are porphyry in texture and high-K calc-alkaline in magmatic series. The main mineral in all rocks is plagioclase that has variable size, shape and texture. K-feldspar, amphibole, biotite and quartz are other primary minerals in the study rocks. Biotite, quartz, and K-feldspar occur also as secondary minerals that are associated with chlorite, sericite, clays minerals and sulfide and oxide minerals.

Mineralization

Mineralization can be usually divided into the two hypogene and supergen types. The hypogene mineralization occurs mainly as silicic veinlets and disseminated in the intrusive porphyries and volcanic rocks. The silicic veins are in eleven types as follows: 1) quartz + chlorite + pyrite, 2) quartz + chlorite, 3) quartz + pyrite, 4) quartz, 5) chlorite, 6) pyrite + chalcopyrite + quartz, 7) quartz + magnetite, 8) pyrite, 9) chalcopyrite, 10) quartz + chalcopyrite + bornite, 11) molybdenite. The hypogene sulfides are pyrite, chalcopyrite, bornite and molybdenite that are

*Corresponding authors Email: boomeri@science.usb.ac.ir

associated with magnetite, hematite and ilmenite. The pyrites and chalcopyrites occur in all parts of the mineralized area from the surface to the depth while molybdenites and bornites occur only in the deep depths. The supergene mineralization occurs as small outcrops of iron oxide and hydroxide, copper carbonate and clay minerals.

Alteration

The alteration zones in the mineralized area are potassic, propylitic, phyllic and argillic. The main alteration is potassic that is characterized by biotite, sericite and chlorite and numerous sulfide-bearing silicic veinlets with or without orthoclase and magnetite. The orthoclase is probably present as anhedral in some parts and around the plagioclase. The hydrothermal biotites are fine and thin in shape and occur in groundmass. Magmatic biotites are also present as euhedral to subhedral grains. The propylitic alteration observes only in the surface as an outer zone and characterized mainly by chlorite and epidote. Calcite and clay minerals are other minerals of this zone while sulfides are rare. The phyllic alteration zone is characterized by a higher proportion of sericite, quartz veins and pyrite than the potassic alteration in the marginal parts of the mineralized area. The argillic alteration zone occurs locally in shallow depths. Based on XRD analyses, each one of the clay minerals such as kaolinite, montmorillonite, illite and dickite, are dominant in some samples.

The alteration map of the northern part is presented in Fig.15 for two depths of 10 and 400 meters. The potassic alteration is the main alteration type in both levels. In level 10, the inner potassic alteration is surrounded by phyllic and outer propylitic alteration, while in level 400, the inner potassic alteration is only associated with the local phyllic alteration. Distribution of copper and molybdenum in different boreholes indicate that mineralization has occurred mainly in the potassic and phyllic alteration zones (Fig. 16). The copper shows similar contents from shallow

to deeper depths while Mo contents are higher in the depths of more than 500 meters (Fig. 16).

The following features show that the northern part of Chahfiruzeh ore deposit is a porphyry Cu-type ore deposit: style, grade, size and shape of the mineralization, alteration types, associated calc-alkaline intrusive porphyries and the tectonic setting.

References

- Asadi, S., Moore, F. and Zarasvandi, A., 2014. Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano-plutonic belt, Kerman region, Iran: A review. *Earth Science Reviews*, 138(1):25–46.
- Boomeri, M., Nakashima, K. and Lentz, D.R., 2009. The Miduk porphyry Cu deposit, Kerman, Iran: a geochemical analysis of the potassic zone including halogen element systematic related to Cu mineralization processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 103(1): 17–29.
- Boomeri, M., Nakashima, K. and Lentz, D.R., 2010. The Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran: a mineralogical analysis of the igneous rocks and alteration zones including halogen element systematics related to Cu mineralization processes. *Ore Geology Reviews*, 38(4): 367–381.
- Dimitrijevic, M.D., 1973. Geology of Kerman region. Geology survey, Tehran, Iran, Report YU/53, 334 pp.
- Hezarkhani, A., 2006. Petrology of the intrusive rocks within the Sungun porphyry copper deposit, Azerbaijan, Iran. *Jurnal of Asian Earth Sciences*, 27(3): 326–340.
- Sheikhzadeh, A., Mokhtari, A., Fatheianpur, N. and Sahebazamani, N., 2011. Isolation of high-grade copper zone using exploratory data analysis on a case study, Chahfirozeh deposit. 29th Symposium of Earth Sciences, Geological Survey and Mineral Exploration, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)