



دگرسانی، کانی‌سازی، زمین‌شیمی و مطالعه سیالات درگیر در معدن فیروزه، شمال غرب نیشابور

علیرضا غیاثوند^۱، محمدحسن کریم‌پور^{۱*}، آزاده ملکزاده شفارودی^۲ و محمدرضا حیدریان شهری^۱

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(۲) گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۲

چکیده

معدن فیروزه در شمال غرب نیشابور و در شرق کمربند ماگمایی قوچان-سزوار قرار دارد و از نظر ساختاری جزو بخش غربی زون بینالود است. زمین‌شناسی این منطقه متشکل از گدازه و پیروکلاستیک‌هایی با سن پالئوسن-ائوسن است که توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق با سن ائوسن میانی در آنها نفوذ کرده‌اند. مهم‌ترین دگرسانی‌هایی که واحدهای آتشفشانی و نفوذی منطقه را تحت تأثیر قرار داده شامل سیلیسی، آرژیلیک و کربناتی است. کانی‌سازی در سطح و تونل‌ها در درز و شکستگی‌ها اغلب به شکل‌های افشان، استوک‌ورک، رگه-رگه‌چه و برش گرمابی دیده می‌شود. کانی‌های اولیه شامل اسپیکولاریت، مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت و بورنیت و کانی‌های ثانویه شامل هماتیت، آلونیت، کولیت، فیروزه و لیمونیت هستند. اکتشافات ژئوشیمیایی، ناهنجاری‌های عناصر مس (تا ۱۰۷۴ ppm)، طلا (تا ۶۹۹ ppb)، آهن (تا ۳۰ درصد)، سریم (تا ۴۶۴ ppm)، لانتانیم (تا ۲۲۷ ppm)، اورانیوم (تا ۲۴۳ ppm) و کبالت (تا بیش از ۱۰۰۰۰ ppm) را نشان می‌دهد. بر مبنای بررسی‌های سیالات درگیر، دمای تشکیل کانسار بین ۱۴۷ تا ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۲۰۳ درجه سانتی‌گراد بوده و از محلولی شامل نمک‌های KCl، CaCl₂، MgCl₂ و NaCl با درجه شوری بین ۵/۵۶ تا ۱۷/۰۸ درصد وزنی معادل نمک طعام به وجود آمده است. فرایند اختلاط بین محلول ماگمایی گرم و شور با محلول سرد و کم‌شور جوی و نیز فرایند جوشش توانسته است باعث ته‌نشینی عناصر شود. این کانسار منشأ ماگمایی-گرمابی دارد و مرتبط با فعالیت‌های ماگماتیکی ترشیری وابسته به زون فرورانش ورقه اقیانوسی نئوتیس سزوار به زیر صفحه توران است. بررسی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی، ژئوشیمی، ژئوفیزیکی و سیالات درگیر در معدن فیروزه نیشابور نشان‌دهنده حضور کانی‌سازی بزرگی از نوع اکسید آهن مس-طلا-اورانیوم-عناصر نادر خاکی سبک مشابه با بخش هماتیت-غالب کانسار IOCG المپیک دم است.

واژه‌های کلیدی: کانی‌سازی، اکتشافات زمین‌شیمیایی، سیالات درگیر، اکسید آهن مس-طلا، معدن فیروزه نیشابور

مقدمه

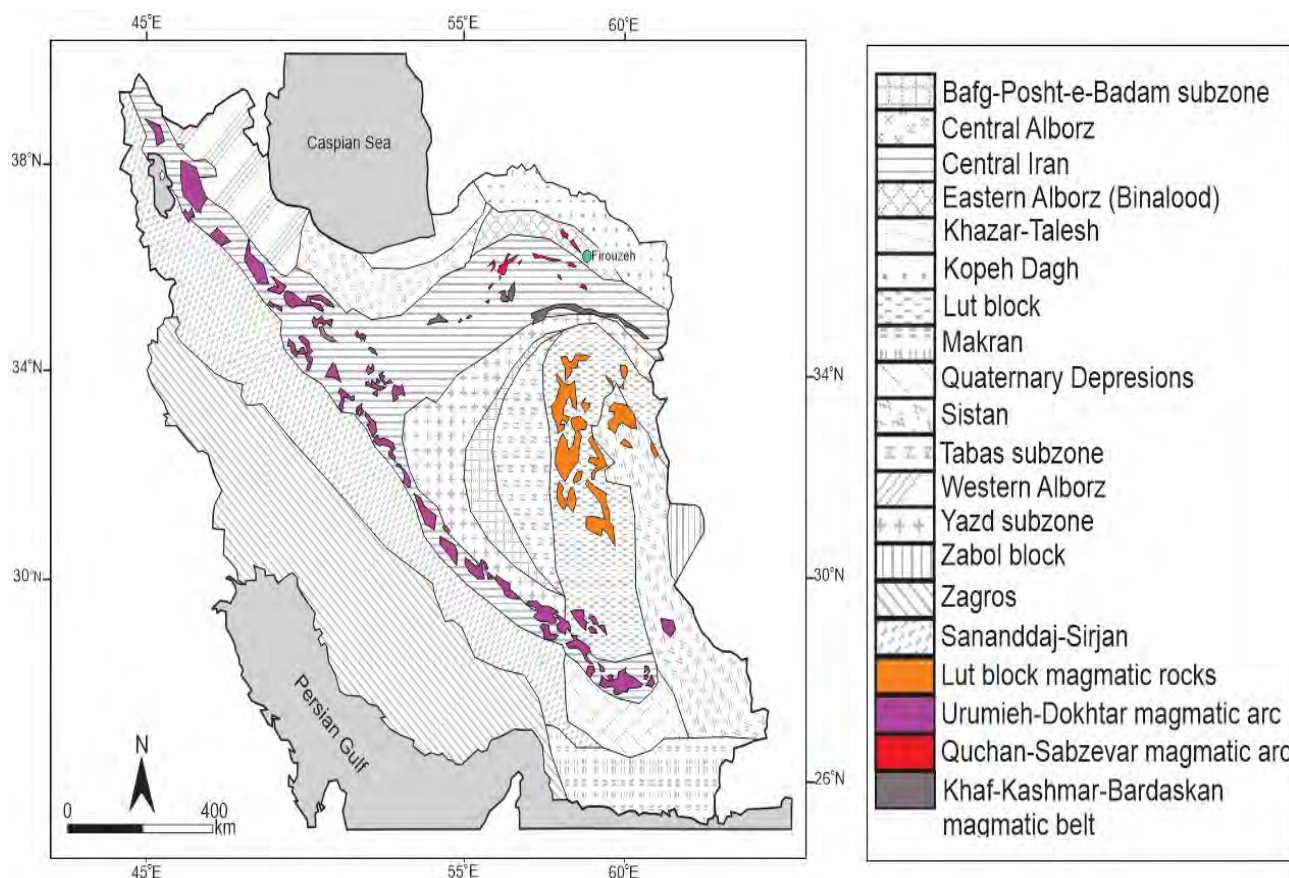
نیشابور در استان خراسان رضوی، شمال شرق ایران و بخش

غربی زون ساختاری بینالود و بخش شرقی کمان ماگمایی

معدن فیروزه، قدیمی‌ترین معدن فیروزه دنیا، در شمال غرب

مگنتیت شترسنگ (Gholami, 2009)، کانی‌سازی نوع کایرونا خائلق (Zarei et al., 2016) و چندین رخداد طلا و مس مربوط به فعالیت کمان ماگمایی سنوزوئیک سبزواری- قوچان هستند.

سنوزوئیک سبزواری- قوچان قرار دارد (شکل ۱). معدن فیروزه به‌عنوان کانی‌سازی اکسید آهن مس-طلا- اورانیوم- عناصر نادر خاکی سبک (Karimpour et al., 2011; Ghasvand et al., 2016)، مس- طلای پورفیری جلمبادان (Fatehi, 2014)،



شکل ۱. نقشه ساختاری ایران برگرفته از سهندی و همکاران (Sahandi et al., 2002) و موقعیت معدن فیروزه

Fig. 1. Structural map of Iran (after Sahandi et al, 2002) and the Firouzeh Mine location

در محدوده معدنی فیروزه نیشابور، بررسی‌های زمین‌شیمیایی را در سطح محدوده و تونل‌ها انجام داده است (Sabzi et al., 1984). هدف از انجام این پژوهش، تهیه نقشه زمین‌شناسی با تأکید ویژه بر تفکیک توده‌های نفوذی، تهیه نقشه دگرسانی، بررسی کانی‌سازی، تعیین روابط همبزرادی، انجام اکتشافات زمین‌شیمیایی به‌روشنی خردسنگی از واحدهای آلتیره‌شده برای رسیدن به مناطق امیدبخش، بررسی سیالات درگیر و دستیابی بهتر به منشأ و نحوه تشکیل کانسار فیروزه به‌عنوان اولین کانسار

تدین اسلامی (Tadayon Slami, 1974) و کیمیا قلم و ایرانمنش (Kimiaghalam and Iranmanesh, 1974)، به‌طور هم‌زمان گزارش اکتشاف ژئوشیمی و ژئوفیزیکی در معدن فیروزه نیشابور را تهیه کرده‌اند. اسفندیارپور (Sfandiarpour, 2011) و محمدنژاد (Mohammadnejad, 2011) در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش‌های شرقی منطقه و خارج از تونل‌های معدن را در سطح مطالعه کرده‌اند. سازمان انرژی اتمی نیز در قالب طرح اکتشاف مواد رادیواکتیو

اکسید آهن مس - طلا - اورانیوم - عناصر نادر خاکی سبک و مقایسه با ذخایر مشابه IOCG دنیاست.

روش مطالعه

پس از انجام بررسی‌های صحرایی، برای بررسی سنگ‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و توالی همبزادی تعداد ۲۵۰ مقطع میکروسکوپی شامل ۱۹۶ مقطع نازک و صیقلی از بخش‌های سطحی منطقه و تعداد ۵۴ مقطع نازک و صیقلی از تونل‌های معدن (تونل اصلی، غاردم و غارزاک)، تهیه شد. تعداد ۲۱ نمونه از دگرسانی‌های مختلف منطقه برای شناخت بهتر کانی‌های حاصل از دگرسانی، زون‌های دگرسانی و شناخت بهتر کانی‌های رسی انتخاب و با دستگاه XRD در آزمایشگاه کانساران بینالود تهران تجزیه شد. برای بررسی‌های ژئوشیمی اکتشافی و تعیین بی‌هنجاری‌های احتمالی تجزیه ۵۵ عنصری، تعداد ۶۰ نمونه خرده‌سنگی از زون‌های آلتیره به روش ترکیبی ICP-AES و ICP-MS با کد GE ICM90A در آزمایشگاه SGS کشور کانادا انجام شد. هم‌زمان با تجزیه نمونه‌های خرده‌سنگی به روش یادشده، نمونه‌ها به روش Aqua Regia با کد GE ARE145 برای عنصر طلا در آزمایشگاه SGS کشور کانادا تجزیه شدند. پس از تعیین توالی همبزادی کانسار، تعداد ۶ نمونه درشت و شفاف بلور کوارتز که با کانی‌سازی همراه بود و در آنها آثار کانی‌سازی دیده شد، انتخاب و سپس مقاطع دوبرصیقل تهیه شد. دماسنجی بر روی ۸۵ سیال درگیر و شوری بر روی ۶۷ سیال درگیر انجام و نمودارهای مربوط ترسیم شد. بررسی‌های پتروگرافی به وسیله میکروسکوپ پلاریزان و با عدسی ۵۰ و دماسنجی سیالات درگیر به وسیله دستگاه سردکننده و گرم‌کننده لینکام مدل THMSG 600 در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. گستره دمایی دستگاه بین ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد و با دقت ± 1 است. نرم‌افزار مورد استفاده این دستگاه Bodnar Linksys 32 است. مقدار شوری بر اساس بودنار (Bodnar, 1993) در سیستم $H_2O-NaCl$ و مقدار چگالی سیالات درگیر با استفاده از نرم‌افزار FLINCOR و بر اساس اطلاعات

دماسنجی بر طبق بروان و لمب (Brown and Lamb, 1989) محاسبه شد.

زمین‌شناسی

محدوده اکتشافی فیروزه در بخش غربی زون ساختاری بینالود (کوه‌های البرز شرقی) و درون کمان ماگمایی سنوزوئیک سبزوار - قوچان با روند شمال غرب - جنوب شرق در شمال شرق ایران قرار دارد (شکل ۱). زون ساختاری بینالود با روند شمال غرب - جنوب شرق به عنوان بخش باقی‌مانده پالتوتیس در نظر گرفته می‌شود که با رخنمون سنگ‌های گرانیتی شناخته می‌شود و در نتیجه برخورد صفحه توران در شمال با صفحه ایران مرکزی در جنوب در دوره تریاس پایانی ایجاد شده است (Nabavi, 1976; Berberian et al., 2000; Karimpour et al., 2006; Shabanian et al., 2009). در کمان سبزوار - قوچان، فعالیت‌های ماگمایی از دوره ائوسن (حدود ۴۰ میلیون سال قبل) آغاز شده و تا دوران پلیستوسن (حدود ۲ میلیون سال قبل) ادامه داشته است (Spies et al., 1983).

اسپایس و همکاران (Spies et al., 1983) با توجه به فعالیت ماگمایی در مقاطع زمانی مختلف ترشیاری، انواع سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی با طیف ترکیبی اسید - حدواسط و مافیک در این کمان را معرفی کرده‌اند. سنگ‌های آذرین حدواسط ائوسن و اسیدی الیگوسن متاآلومینوس تا پراآلومینوس و کالک‌آلکالن متوسط پتاسیم هستند؛ در حالی که سنگ‌های آلکالن میوسن - پلیستوسن متاآلومینوس و پتاسیم بالا تا شوشونیتی هستند که در محیط ژئوتکنونیک حاشیه قاره‌ای فعال به وجود آمده‌اند (Spies et al., 1983). ولکانیسم کالک‌آلکالن با ذوب‌بخشی گویشته در زون فرورانش بین لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس سبزوار و حاشیه قاره‌ای صفحه توران ایجاد شده است (Spies et al., 1983).

بر اساس مطالعات و بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی، واحدهای سنگی عمده معدن فیروزه را می‌توان به چهار بخش واحدهای آتشفشانی، توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق، برش‌های

شامل قطعاتی از سنگ‌های آتشفشانی به شدت دگرسان شده است که در سیمانی از سیلیس همراه با مگنتیت و سولفید اکسید شده، قرار گرفته‌اند. برش گرمایی با گسترش زیاد در شمال شرق، غرب، مرکز و جنوب غربی منطقه دیده می‌شود. ۴- رسوبات کواترنری در بخش‌های جنوبی و شمال شرقی منطقه دیده می‌شوند (شکل ۲).

در حال حاضر استخراج از معدن فیروزه نیشابور به صورت زیرزمینی و در سه تونل به نام‌های تونل اصلی، تونل غاردم و تونل زاگ انجام می‌شود. واحدهای سنگی رخنمون یافته در تونل اصلی معدن فیروزه شامل واحدهای آتشفشانی، توده‌های نفوذی نیمه عمیق و برش گرمایی است. توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب کوارتز مونوزوسینیت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری در تونل غارسیز که بخشی از تونل اصلی است و در بخش غربی آن قرار دارد، رخنمون دارند و این واحدها در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده که بر این اساس، سن نسبی آنها بعد از ائوسن است. بافت این سنگ‌ها، پورفیری با زمینه دانه متوسط است. کانی‌های درشت بلور شامل آلکالی فلدسپات و پلاژیوکلاز و زمینه سنگ را کانی‌های فلدسپات، کوارتز، کدر و کانی‌های ثانویه تشکیل می‌دهند. کانی‌های ثانویه اغلب شامل کانی‌های رسی، کوارتز و اکسیدهای آهن است.

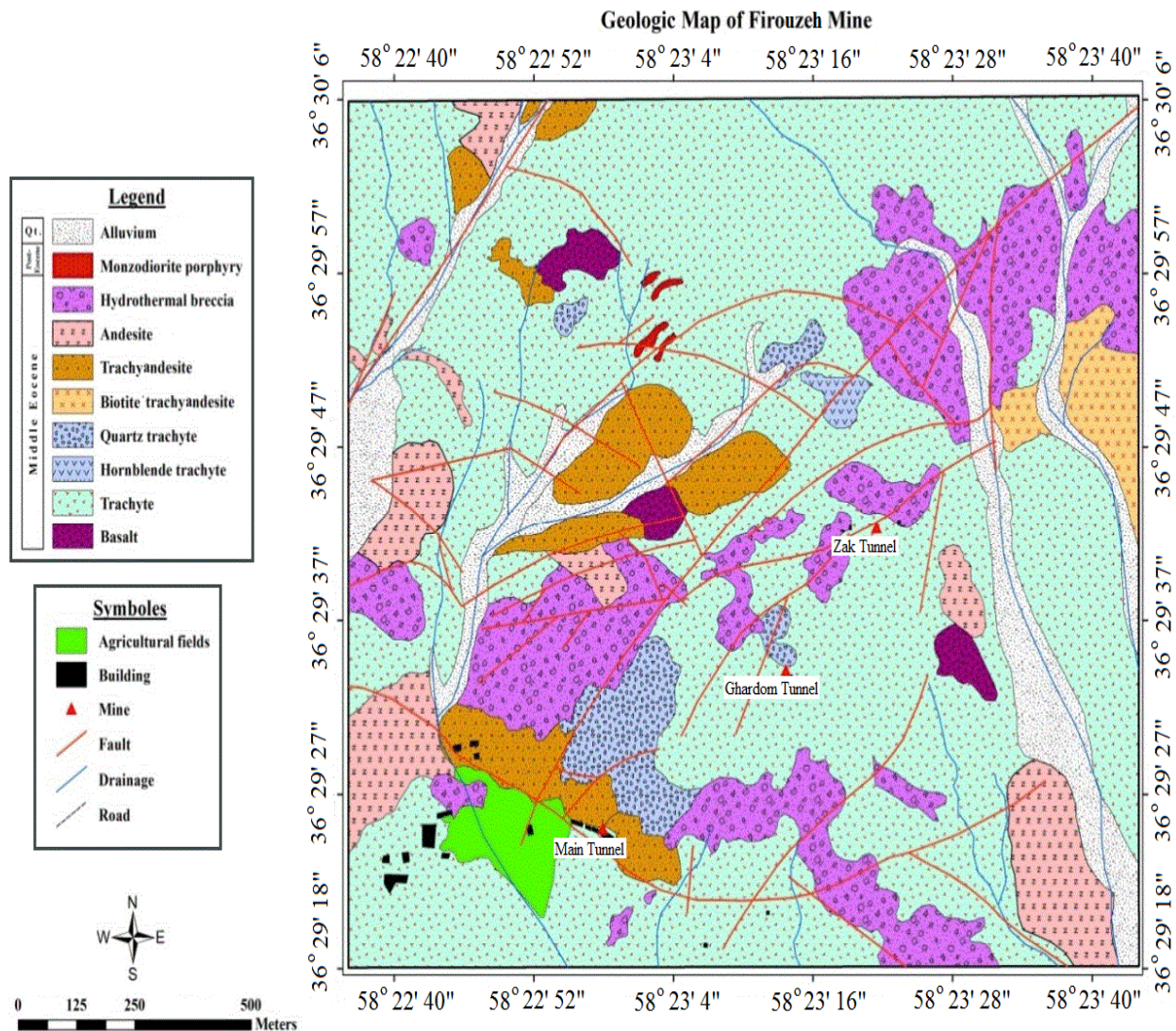
دگرسانی

دگرسانی به‌عنوان مهم‌ترین کلید اکتشافی در عملیات صحرایی، شامل تغییرات کانی‌شناسی و شیمیایی است که تحت تأثیر آب‌های ماگمایی و یا گرمایی در سنگ‌ها ایجاد می‌شود. این پدیده با اغلب ذخایر ماگمایی-گرمایی است. در محدوده اکتشافی فیروزه، سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی نیمه عمیق به شدت تحت تأثیر دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک و کربناتی قرار گرفته‌اند. دگرسانی‌های آرژیلیک و سیلیسی بیشترین ارتباط را با کانی‌سازی دارد و به همین دلیل با جزئیات بیشتر شرح داده می‌شود. این دگرسانی‌ها شامل سیلیسی شدید،

گرمایی و رسوبات عهد حاضر تقسیم کرد (شکل ۲) که در ادامه به اختصار شرح داده می‌شود: ۱- سنگ‌های آتشفشانی بخش زیادی از منطقه را به خود اختصاص داده‌اند و سن نسبی آنها بر اساس نقشه زمین‌شناسی سلطان‌آباد (Akrami and Asgari, 2000) به پالئوسن-ائوسن نسبت داده شده است. این واحدها شامل تراکیت، تراکی‌آندزیت، آندزیت، هورنبلند آندزیت، بیوتیت تراکی‌آندزیت، بازالت و برش گرمایی است که از این میان، تراکیت بیشترین گسترش را در منطقه دارد (شکل ۲). بافت این سنگ‌ها پورفیری و زمینه آنها اغلب دانه ریز و با بافت تراکیتی است. واحدهای آتشفشانی تحت تأثیر دگرسانی‌های مختلفی قرار گرفته‌اند. ۲- توده‌های نفوذی نیمه عمیق با سن ائوسن میانی رخنمون‌های کمی اغلب به صورت دایک در منطقه دارند که در سنگ‌های آذرآواری منطقه نفوذ کرده‌اند. این واحدها در سطح زمین و تونل‌های معدن فیروزه شامل مونزودیوریت پورفیری، کوارتز مونوزوسینیت پورفیری، هورنبلند مونوزونیت پورفیری و مونزونیت پورفیری است. توده‌های نفوذی مونزودیوریت پورفیری در سطح منطقه و تونل اصلی و توده نفوذی کوارتز مونوزوسینیت پورفیری فقط در تونل اصلی رخنمون دارند که هر دو دارای کانی‌سازی‌اند و توده‌های نفوذی هورنبلند مونزونیت پورفیری و مونزونیت پورفیری در غرب ناحیه و خارج از منطقه مورد نظر دارای رخنمون هستند که بدون کانی‌سازی‌اند. توده‌های نفوذی نیمه عمیق (مونزودیوریت پورفیری و کوارتز مونوزوسینیت پورفیری) عامل ایجاد دگرسانی‌های گسترده بر روی سنگ‌های آذرآواری منطقه هستند. علاوه بر این، خود نیز تحت تأثیر محلول‌های گرمایی قرار گرفته‌اند و دگرسانی‌های مختلفی را نشان می‌دهند. ۳- برش گرمایی ناشی از نفوذ سیالات ناشی از توده‌های نفوذی نیمه عمیق در بخش‌های جنوبی، جنوب غربی تا شمال شرقی منطقه دیده می‌شوند، که بخش زیادی را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۲). برش گرمایی که خود حاوی کانی‌سازی است، بخشی از کانه‌های سولفیدی-اکسیدی را با خود همراه دارد و شامل قطعاتی از سنگ‌های تراکیتی است. این واحد

در واقع منطبق بر زون گوسان است و کمترین گسترش دگرسانی مربوط به دگرسانی آرژلیک با شدت متوسط-سیلیسی است که تنها در بخش جنوب‌غربی منطقه دیده می‌شود (شکل ۳).

سیلیسی ضعیف، آرژلیک با شدت متوسط، آرژلیک با شدت ضعیف، آرژلیک با شدت متوسط-سیلیسی، آرژلیک با شدت ضعیف-سیلیسی هستند. بیشترین گسترش دگرسانی مربوط به دگرسانی سیلیسی است که تقریباً کل منطقه را پوشش می‌دهد و



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی معدن فیروزه
Fig. 2. Geological map of Firouzeh mine

کوارتز تراکیت، بازالت، برش هیدروترمالی و مونزودیوریت پورفیری تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند (شکل ۴-۱). کانی‌های اصلی این دگرسانی شامل کوارتز ثانویه است و کانی‌های رسی مانند کائولینیت و کربناتی مانند کلسیت به‌عنوان

دگرسانی سیلیسی شدید: این زون در بخش زیادی از محدوده اکتشافی فیروزه گسترش دارد (شکل ۳). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این دگرسانی تیره‌رنگ، خشن و صخره‌ساز شده‌اند. واحدهای تراکیت، تراکی‌آندزیت، هورنبلندتراکیت،

کانی‌های فرعی هستند. نوع کانی‌های رسی بر اساس بررسی‌های XRD مشخص شده است. کوارتز ثانویه به صورت پراکنده و رگه‌چه‌ای در نمونه‌های سنگی دیده می‌شود. شدت سیلیسی شدن در مقاطع بررسی شده حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد است. این دگرسانی با کانی‌سازی اکسیدی (مگنتیت، اسپیکولاریت و هماتیت) و سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت و بورنیت) همراه است.

دگرسانی سیلیسی ضعیف: این دگرسانی در شمال شرق و شمال محدوده اکتشافی فیروزه گسترش دارد (شکل ۳). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این دگرسانی تیره‌رنگ، خشن و صخره‌ساز شده‌اند. واحدهای تراکی‌آندزیت، بیوتیت تراکی‌آندزیت، تراکیت و برش هیدروترمالی تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند (شکل ۴-B). کانی‌های اصلی این دگرسانی شامل کوارتز ثانویه است و کانی‌های رسی مانند کائولینیت و کربناتی مانند کلسیت به عنوان کانی‌های فرعی هستند. کوارتز ثانویه به صورت پراکنده و رگه‌چه‌ای در نمونه‌های سنگی دیده می‌شود. شدت سیلیسی شدن در این سنگ‌ها کمتر از ۳۰ درصد است. این دگرسانی با کانی‌سازی هماتیت و مگنتیت همراه است.

دگرسانی آرژیلیک با شدت متوسط: این دگرسانی در بخش‌های غرب و جنوب شرق محدوده اکتشافی فیروزه گسترش دارد (شکل ۳). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این دگرسانی رنگ روشن و ظاهری تپه ماهوری دارند. واحدهای سنگی آندزیت، تراکی‌آندزیت و تراکیت تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند (شکل ۴-C). کانی‌های اصلی این دگرسانی شامل کانی‌های کائولینیت، مونتموریلونیت، ایلیت بوده و مسکویت، ژاروسیت و کوارتز ثانویه نیز به عنوان کانی‌های فرعی دیده می‌شوند. در این دگرسانی اغلب پلاژیوکلازها و گاهی آلکالی‌فلدسپات‌ها به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. شدت این دگرسانی در این سنگ‌ها بین ۳۰ تا ۵۰ درصد است. این دگرسانی با کانی‌سازی هماتیت و مگنتیت همراه است.

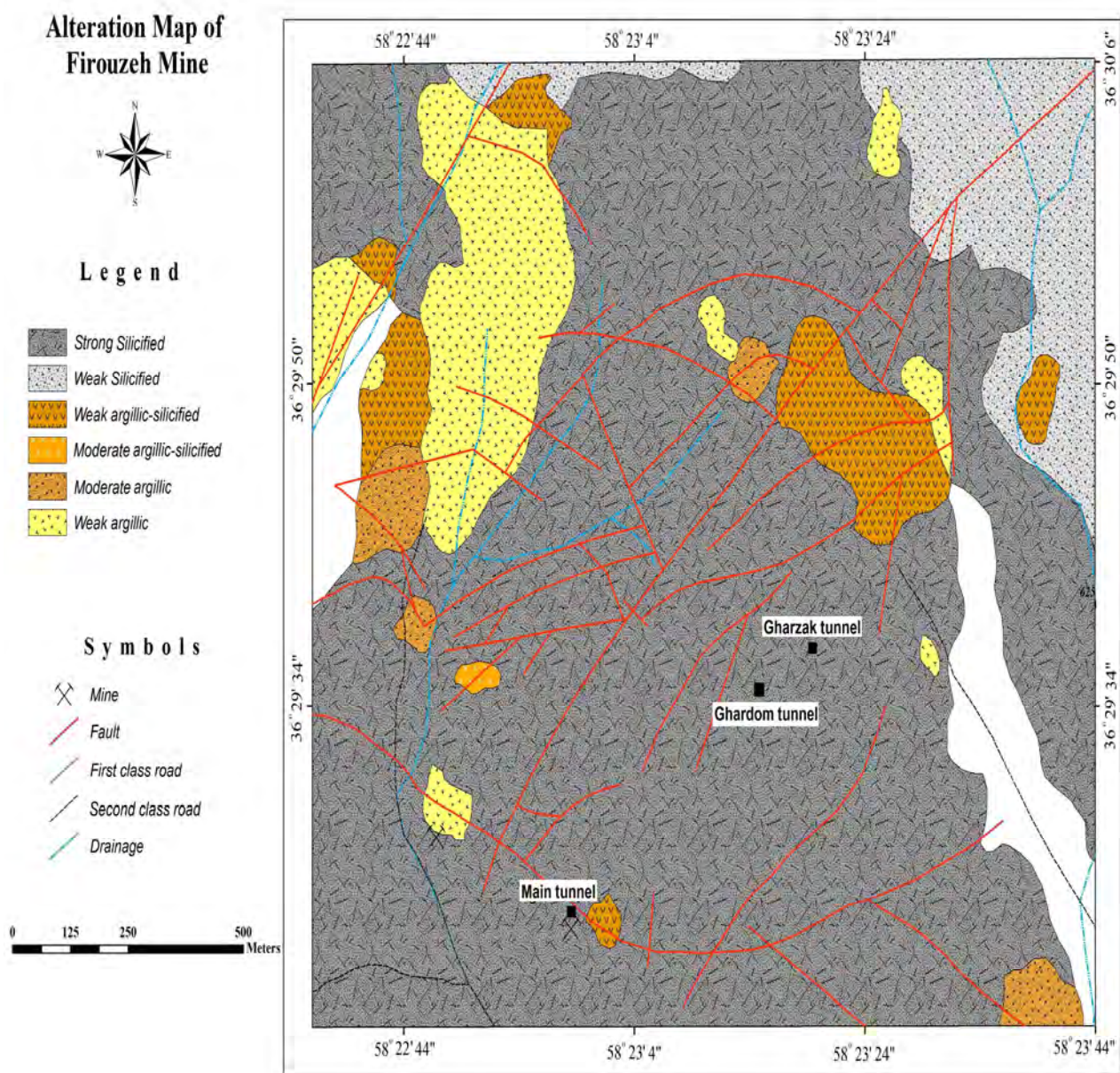
دگرسانی آرژیلیک با شدت ضعیف: این دگرسانی در شمال غرب و بخش کوچکی از شرق معدن فیروزه گسترش دارد (شکل ۳). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این دگرسانی، رنگ خاکستری روشن و ظاهری تپه ماهوری دارند. واحدهای تراکیت، بازالت، تراکی‌آندزیت و آندزیت تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند (شکل ۴-D). در این دگرسانی اغلب پلاژیوکلازها و گاهی آلکالی‌فلدسپات‌ها به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. کانی‌های اصلی این دگرسانی شامل کائولینیت، مونتموریلونیت و مسکویت بوده و کوارتز ثانویه به عنوان کانی فرعی است. شدت این دگرسانی در این سنگ‌ها کمتر از ۳۰ درصد است. این دگرسانی با کانی‌سازی هماتیت و مگنتیت همراه است.

دگرسانی آرژیلیک با شدت متوسط - سیلیسی: این دگرسانی در بخش کوچکی از شمال غرب تونل اصلی واقع در غرب محدوده اکتشافی فیروزه گسترش دارد (شکل ۳). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این دگرسانی رنگ خاکستری روشن و ظاهری تپه ماهوری دارند. واحدهای تراکیت و برش هیدروترمالی تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته است (شکل ۴-E). در این دگرسانی اغلب پلاژیوکلازها و گاهی آلکالی‌فلدسپات‌ها به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. کانی‌های اصلی این دگرسانی شامل کائولینیت، مونتموریلونیت، ایلیت، مسکویت و کوارتز ثانویه است. شدت دگرسانی در این سنگ‌ها بین ۳۰ تا ۵۰ درصد است.

دگرسانی آرژیلیک با شدت ضعیف - سیلیسی: این دگرسانی در بخش کوچکی از شرق و غرب محدوده اکتشافی فیروزه گسترش دارد (شکل ۳). واحدهای سنگی منطقه به دلیل این دگرسانی رنگ خاکستری روشن و ظاهری تپه ماهوری دارند. واحدهای تراکیت، تراکی‌آندزیت، هورنبلند تراکیت و برش هیدروترمال تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند (شکل ۴-F). در این دگرسانی اغلب پلاژیوکلازها و گاهی آلکالی‌فلدسپات‌ها به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. کانی‌های اصلی این دگرسانی شامل کائولینیت، مونتموریلونیت، مسکویت

نیمه عمیق نیز تحت تأثیر دگرسانی‌های سیلیسی شدید-آرژلیک و آرژلیک شدید قرار گرفته‌اند. واحد آندزیتی درون تونل غاردم به شدت تحت تأثیر دگرسانی سیلیسی بوده و سنگ‌های آتشفشانی در تونل غارزاک تحت تأثیر دگرسانی‌های سیلیسی شدید-آرژلیک، سیلیسی شدید و آرژلیک قرار گرفته‌اند.

و کوارتز ثانویه است. شدت این دگرسانی در این سنگ‌ها کمتر از ۳۰ درصد است. این دگرسانی با کانی‌سازی هماتیت و مگنتیت همراه است. سنگ‌های آتشفشانی در تونل اصلی به شدت تحت تأثیر دگرسانی سیلیسی شدید، سیلیسی شدید-آرژلیک و سیلیسی شدید-کربناتی (با کانی‌های شاخص کلسیت و سیدریت) بوده‌اند. در تونل اصلی توده‌های نفوذی



شکل ۳. نقشه دگرسانی معدن فیروزه

Fig. 3. Alteration map of the Firouzeh Mine

کانی‌سازی

وجود بقایای کارهای شدادی و قدیمی متعدد و وجود سه تونل اصلی یا آبدار، تونل غاردم و تونل غارزاک (که در چندین طبقه تا عمق ۸۰ متری حفر شده، بیانگر وسعت کانی‌سازی در معدن فیروزه است. کانی‌سازی به شکل‌های استوک‌ورک، رگه-رگه‌چه، افشان و برش هیدروترمالی بوده و به‌صورت کانی‌سازی اولیه و ثانویه در سطح منطقه و تونل‌ها رخ داده است. این کانی‌سازی را می‌توان به دو زون درون‌زاد و سوپرژن تقسیم کرد.

کانی‌سازی اولیه: کانی‌سازی اولیه به شکل‌های استوک‌ورک، افشان، رگه-رگه‌چه و برش هیدروترمالی است و شامل اسپیکولاریت، مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت است که در بخش‌های جنوبی، مرکزی و شمالی منطقه دیده می‌شود (شکل ۵).

کانی‌سازی استوک‌ورک: کانی‌سازی استوک‌ورک در سنگ‌های آتشفشانی، توده‌های نیمه‌عمیق و برش‌های گرمابی و با دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک و کربناتی دیده می‌شود. ضخامت کانی‌سازی اولیه در رگه‌چه‌ها از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر دیده می‌شود (شکل ۶-A). در محل‌هایی که گسلش بیشتر است، تراکم رگه‌چه‌ها زیاد می‌شود و تا ۵۰ رگه‌چه در متر مربع می‌رسد (شکل ۶-A).

کانی‌سازی افشان: کانی‌سازی افشان در محدوده معدن فیروزه به‌وفور وجود دارد و در واحدهای آتشفشانی، توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق و برش‌های گرمابی دیده می‌شود. برش گرمابی نیز که در واقع نوعی کانی‌سازی است، در محدوده معدن رخ داده است و بخشی از کانه‌های سولفیدی و اکسیدی را با خود همراه دارد (شکل ۶-B و ۷-A).

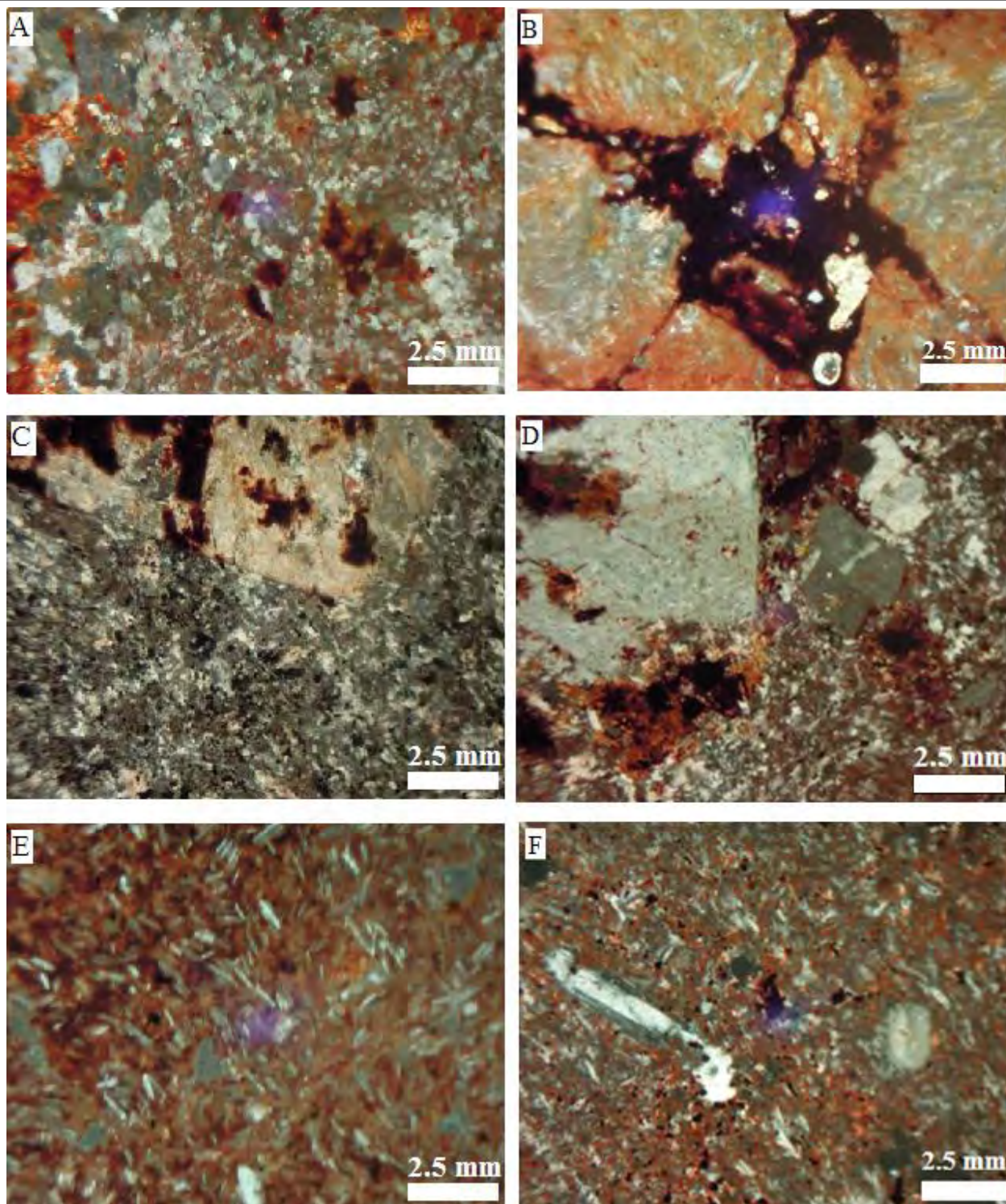
کانی‌سازی رگه-رگه‌چه: کانی‌سازی رگه-رگه‌چه به‌صورت رگه-رگه‌چه‌های اولیه شامل اسپیکولاریت، پیریت-کالکوپیریت-بورنیت، مگنتیت و رگه-رگه‌چه‌های ثانویه شامل هماتیت-گوتیت-لیمونیت، کوولیت و آلونیت-فیروزه است. با توجه به دگرسانی و هوازدگی شدید کانی‌سازی رگه-

رگه‌چه‌ای دستخوش تغییرات زیادی شده است.

برش گرمابی: برش گرمابی حاوی قطعات زاویه‌دار ولکانیک، بیشتر با ترکیب تراکیت است که با سیمان سیلیسی به‌هم متصل شده‌اند و به‌دلیل حضور اکسیدهای آهن اغلب قرمز تا قرمز قهوه‌ای هستند (شکل ۶-B). وجود رگه‌چه‌های اسپیکولاریت (شکل‌های ۶-C و ۷-A) نشان‌دهنده شرایط اکسیداسیونی بالای محلول کانه‌دار است (Ramdohr, 1970). عمده کانی‌سازی در سطح منطقه با دگرسانی سیلیسی و آرژیلیک همراه است که درون واحدهای تراکیت، برش گرمابی و مونزودوریت پورفیری دیده می‌شوند. دو مرحله کانی‌سازی در این بخش رخ داده است؛ مرحله قبل از برشی شدن که کانی‌سازی در قطعات وجود داشته و مرحله حین برشی شدن که کانی‌سازی توسط سیالات کانه‌دار ایجاد شده است. سنگ درون‌گیر اغلب تراکیتی که خود ابتدا حاوی کانی‌سازی بوده توسط فشار سیال کانه‌دار خرد شده و در سیمانی از جنس سیلیس-سولفید قرار گرفته است. خود محلول هم کانی‌سازی دارد؛ زیرا کانی‌سازی در سیمان سنگ نیز وجود دارد.

گسلش و درزه و شکستگی‌ها از عوامل مهم کنترل‌کننده کانه‌زایی در منطقه هستند. به‌دلیل وجود کانی‌سازی در توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق، این توده‌ها می‌توانند منشأ احتمالی کانی‌سازی در منطقه باشند. کانی‌های سولفیدی اغلب بر اثر هوازدگی به هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده که البته وجود زوناسیون در هیدروکسیدهای آهن نشان‌دهنده حضور پیریت به‌عنوان کانی اولیه است (شکل ۶-D).

کانی‌سازی سولفیدی و اکسیدی در بخش‌های مختلف تونل اصلی معدن نیز دیده می‌شود. کانی‌سازی اولیه شامل مگنتیت (شکل ۷-B)، پیریت، کالکوپیریت و بورنیت (شکل ۷-C) است. عمده کانی‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید و آرژیلیک شدید و کربناتی همراه است که درون واحدهای آندزیت، کوارتز مونزوسینیت پورفیری و مونزودوریت پورفیری دیده می‌شوند.

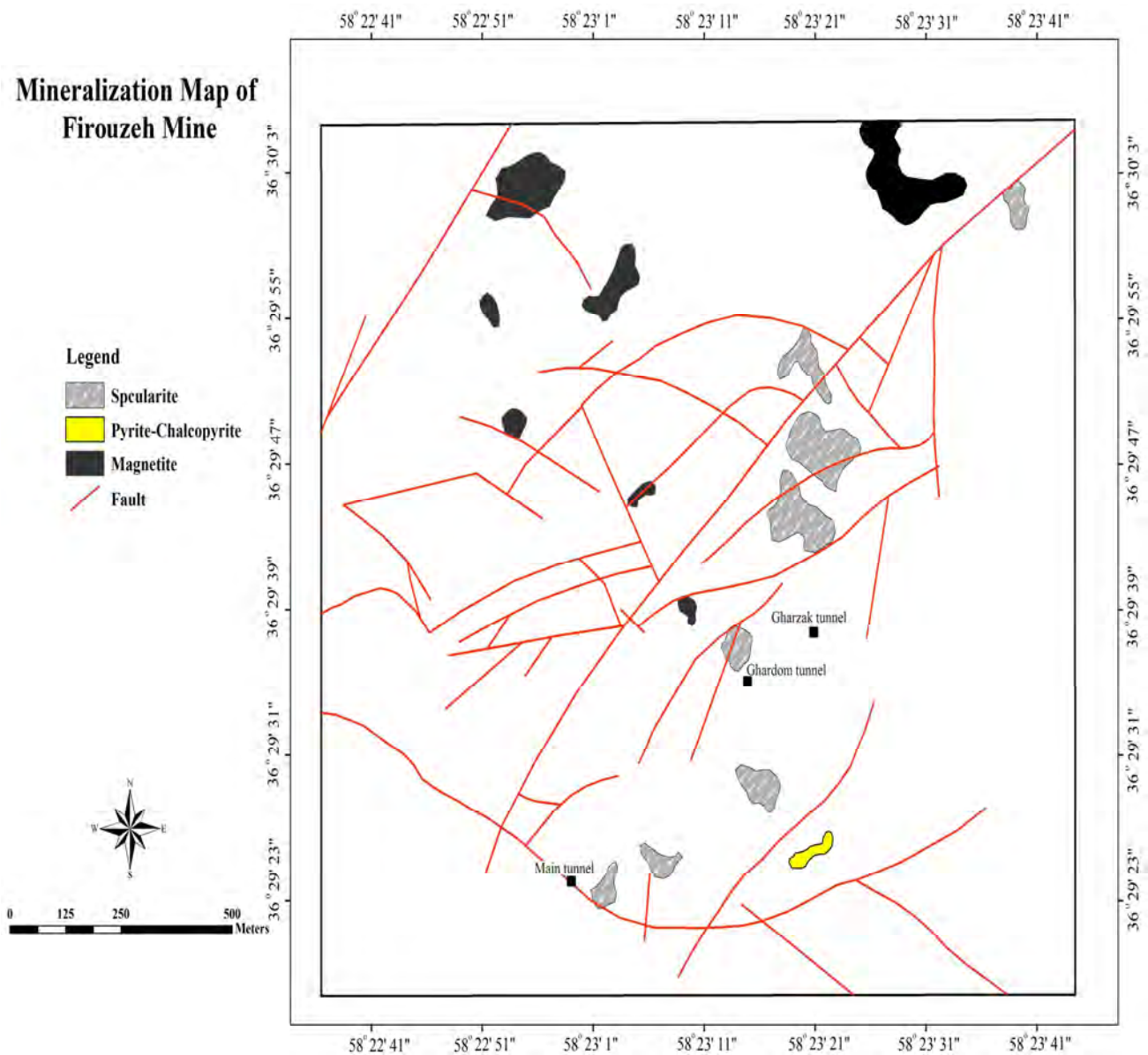


شکل ۴. انواع دگرسانی موجود در معدن فیروزه، A: دگرسانی سیلیسی در کوارتز تراکیت، B: دگرسانی سیلیسی ضعیف در برش با قطعات تراکیتی، C: دگرسانی آرژیلیکی با شدت متوسط در آندزیت، D: دگرسانی آرژیلیک با شدت ضعیف در آندزیت، E: دگرسانی آرژیلیک با شدت متوسط-سیلیسی در تراکیت و F: دگرسانی آرژیلیک با شدت ضعیف-سیلیسی در تراکی آندزیت

Fig. 4. Alteration types of the Firouzeh mine, A: Silicified alteration in quartz-trachyte, B: Weak silicified alteration in breccia with trachytic segments, C: Moderate argillic alteration in andesite, D: Weak argillic alteration in andesite, E: Moderate argillic-silicified alteration in trachyte, and F: Weak argillic-silicified alteration in trachyandesite

کارگران شاغل در تونل‌ها از این لایه به‌عنوان پی و نشانگر حضور فیروزه نام می‌برند. در واقع، رگه-رگه‌های آلونیت کلیدی اکتشافی برای فیروزه در تونل‌های معدن هستند. آلونیت که در بیشتر قسمت‌ها در حاشیه پایینی فیروزه به‌صورت رگه‌ای است (شکل ۶-A)، از سیلیکات‌های آلومین دار سنگ‌های آتشفشانی با تأثیر اسید سولفوریک تشکیل شده است و در نهایت فیروزه از آلونیت به وجود می‌آید.

کانی‌سازی عمده اولیه قابل رؤیت در تونل غاردم شامل مگنتیت و آلونیت است (شکل ۷-D). کانی‌سازی مگنتیت اغلب به‌صورت غیرقابل تفکیک از هماتیت در تمامی تونل دیده می‌شود. عمده کانی‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید همراه است که درون واحد آندزیت دیده می‌شود. کانی‌سازی آلونیت به صورت رگه-رگه‌ای گاهی تا ۳ سانتی‌متر ضخامت در این تونل دیده می‌شود (شکل ۷-D).



شکل ۵. نقشه کانی‌سازی معدن فیروزه

Fig. 5. Mineralization map of Firouzeh mine

کانی‌سازی سولفیدی و اکسیدی در بخش‌های مختلف تونل غارزاک نیز دیده می‌شود. کانی‌سازی اولیه شامل مگنتیت، اسپیکولاریت، پیریت، کالکوپیریت و بورنیت است. عمده کانی‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید و آرژلیک همراه است که درون واحدهای تراکی‌آندزیت و آندزیت دیده می‌شوند.

کانی‌سازی ثانویه: کانی‌سازی ثانویه در محدوده اکتشافی فیروزه شامل فیروزه، آلونیت، کولیت، هماتیت، گوتیت، لیمونیت، ژاروسیت، آنکریت، سیدریت، کریتوملان، باریت، کلسیت، دولومیت و ژیپس است. کانی‌های ژاروسیت، آنکریت، سیدریت و کریتوملان بر اساس بررسی‌های XRD شناسایی شدند. عمده این کانی‌سازی با دگرسانی سیلیسی و آرژلیک همراه است که درون واحدهای تراکیت و برش گرمابی دیده می‌شود. هر جایی که فیروزه در سطح دیده شده، استخراج شده است؛ ولی اکسیدهای آهن با فراوانی بیشتری در سطح منطقه دیده می‌شود.

اکسیداسیون بسیار شدیدی در سطح منطقه اتفاق افتاده و زون گوسان با درصد بالای اکسید آهن که باعث رنگ تیره سنگ‌های آتشفشانی منطقه شده است، در محدوده وسیعی دیده می‌شود (شکل ۸). این موضوع نشان‌دهنده حجم وسیع وجود کانی‌های سولفیدی در منطقه بوده و تأییدی بر گسترده‌گی کانی‌سازی است. به دلیل اکسیداسیون شدید منطقه و از بین رفتن کانی‌های سولفیدی، نقشه توزیع اکسیدهای آهن ثانویه و فیروزه برای منطقه که گویای حضور سولفیدهاست، ترسیم شد (شکل ۸). شکل ۸، پراکندگی اکسیدهای آهن را در چهار بازه درصدی شامل کمتر از ۰/۱ درصد، ۰/۱ تا ۳ درصد، ۳ تا ۶ درصد و بیشتر از ۶ درصد در سطح منطقه معدن فیروزه را نشان می‌دهد. بیشترین میزان اکسیدهای آهن منطبق بر گسل‌های اصلی منطقه و در واحدهای تراکیت و برش گرمابی دیده می‌شود.

کانی‌سازی ثانویه در تونل اصلی اغلب شامل فیروزه، کولیت و اکسیدهای آهن مانند هماتیت (شکل E-۷) است. عمده

کانی‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید، آرژلیک شدید و کربناتی همراه است که درون واحدهای آندزیت، تراکی‌آندزیت، کوارتزموئوسینیت پورفیری و مونزوئودوریت پورفیری دیده می‌شوند. کانی‌سازی اکسید آهن در تمامی تونل اصلی رخ داده؛ ولی کانی‌سازی سولفیدی فقط در بخش‌های ۴۰۰ و ۵۰۰ متری از تونل اصلی به خوبی دیده می‌شود. مقدار زیاد اکسید آهن در زون اکسیدان می‌تواند نشان‌دهنده مقدار زیاد کانی‌های سولفیدی در منطقه باشد که بررسی‌های ژئوفیزیکی (Ghiasiavand et al., 2016) وجود بی‌هنجاری را در اعماق تأیید می‌کند.

تونل‌ها اغلب به صورت دنبال رگه، فیروزه را دنبال کرده‌اند و روند تونل اصلی معدن منطبق بر گسل اصلی محدوده با روند شمال شرق - جنوب غرب است. عمده کانی‌سازی دیده شده فعلی از فیروزه تنها در انتهای چاه آبدار واقع در بخش شرقی تونل اصلی و نیز در تونل غارسبز واقع در بخش غربی تونل اصلی رخ نمون دارند (شکل D-۷). از عوامل کنترل‌کننده مهم کانه‌زایی فیروزه، گسلش و درزه و شکستگی‌هاست (شکل ۶-A). علاوه بر این، کانی‌سازی عمده ثانویه دیده شده در تونل غاردم شامل هماتیت و فیروزه است. کانی‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید همراه است که درون واحد آندزیت دیده می‌شود.

کانی‌سازی ثانویه در تونل غارزاک اغلب شامل فیروزه و اکسیدهای آهن مانند هماتیت است. عمده کانی‌سازی در این تونل با دگرسانی سیلیسی شدید و آرژلیک همراه است که درون واحدهای تراکی‌آندزیت و آندزیت دیده می‌شوند. کانی‌سازی هماتیت گاهی همراه با مگنتیت در تمامی تونل‌های زاک رخ داده؛ ولی کانی‌سازی سولفیدی فقط در بخش‌های انتهایی تونل به خوبی قابل مشاهده است. تونل‌ها اغلب به صورت دنبال رگه، فیروزه را دنبال کرده‌اند و عمده کانی‌سازی دیده شده فعلی از فیروزه نزدیک کانی‌سازی سولفیدی در بخش‌های انتهایی تونل دیده می‌شود.

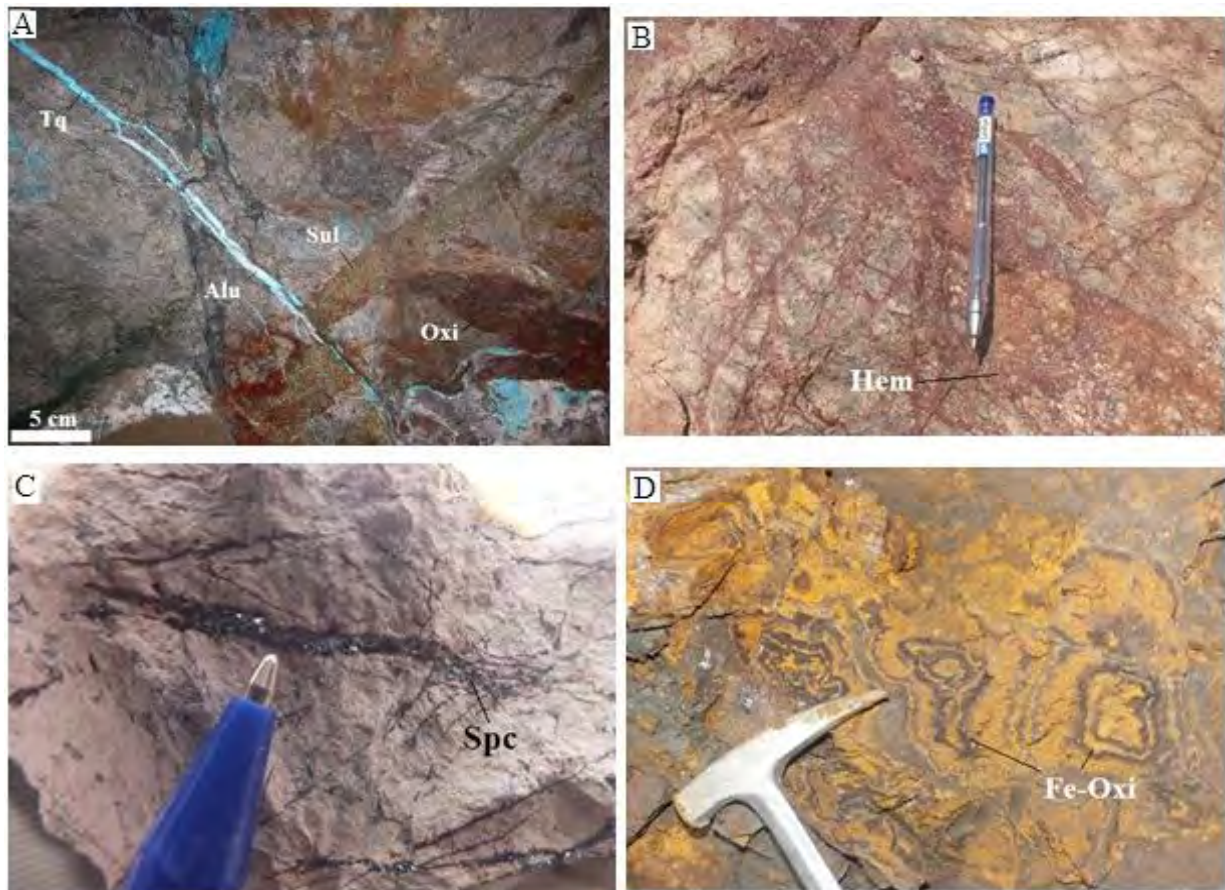
مهم‌ترین و باارزش‌ترین کانی‌سازی اقتصادی شناخته شده در

کانه‌زایی در منطقه تشخیص داده شد (شکل ۶-A و ۷-F). این کانی به دلیل اکسیداسیون وسیع سولفیدهای مس‌دار منطقه و حضور ترکیبات فسفات مانند آپاتیت تشکیل شده است. بافت شاخص فیروزه از نوع بافت‌های کنکرسیونی و اسفروئیدی است که نشان‌دهنده ته‌نشست تدریجی فیروزه در محیط ثانویه هوازده است (Ramdohr, 1970).

شکل ۹، توالی همبرزادی کانی‌سازی را در معدن فیروزه نشان می‌دهد.

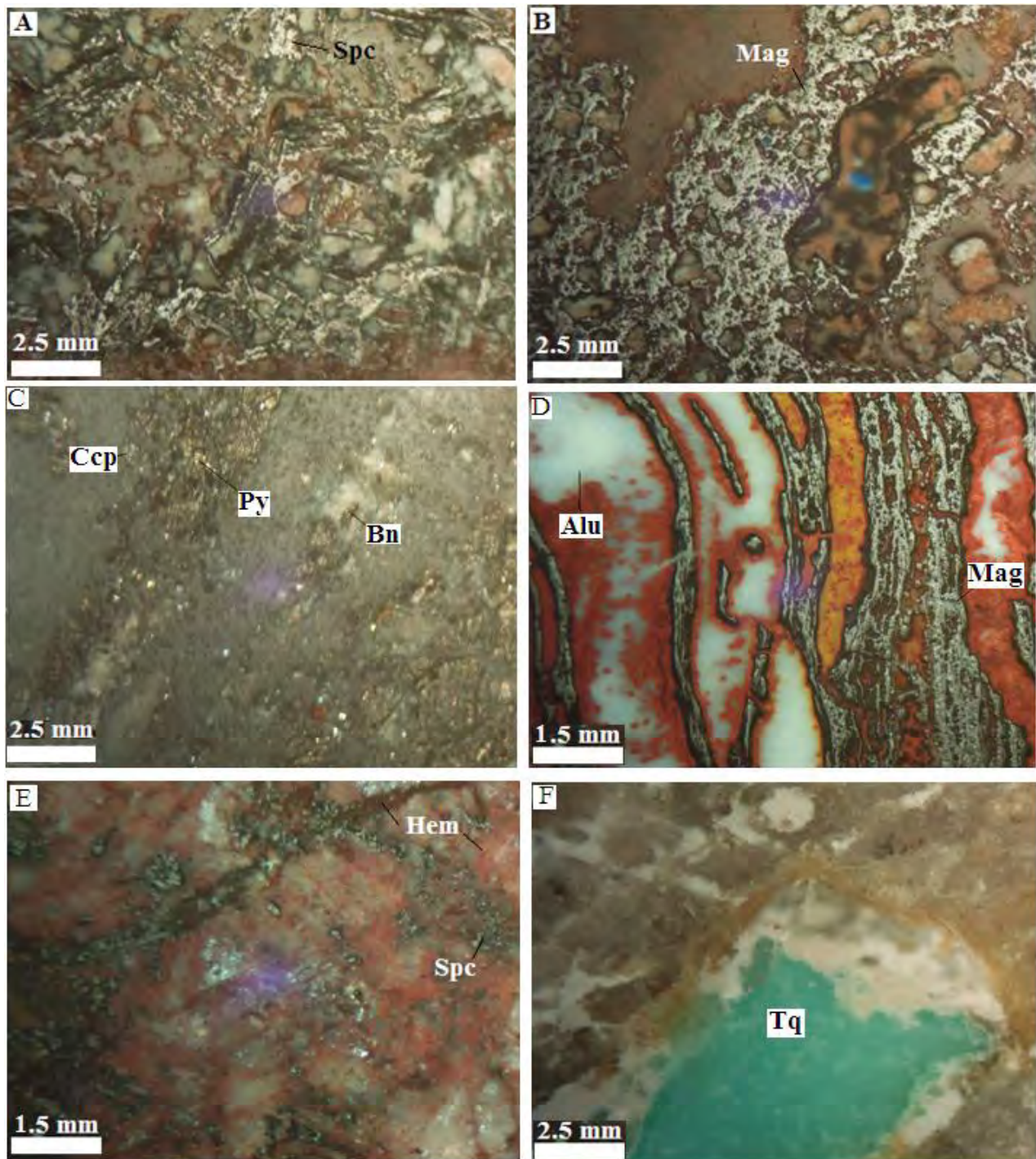
منطقه، فیروزه است که همان فسفات مس و آلومینیوم آبدار با فرمول شیمیایی $CuAl_6 [PO_4(OH)_2]_4 \cdot 4H_2O$ است (شکل ۷-F). در دنیا، فیروزه نیشابور به Persian Turquoise مشهور است. یک کانی ثانویه و کاملاً تأخیری است و در نمونه‌های دستی به رنگ آبی روشن، سبز آبی، سبز، قهوه‌ای و سفید دیده می‌شود.

به دلیل این که رگه‌ها فیروزه کانی‌سازی‌های اولیه سولفیدی-اکسیدی را قطع کرده است، تشکیل فیروزه به عنوان آخرین فاز



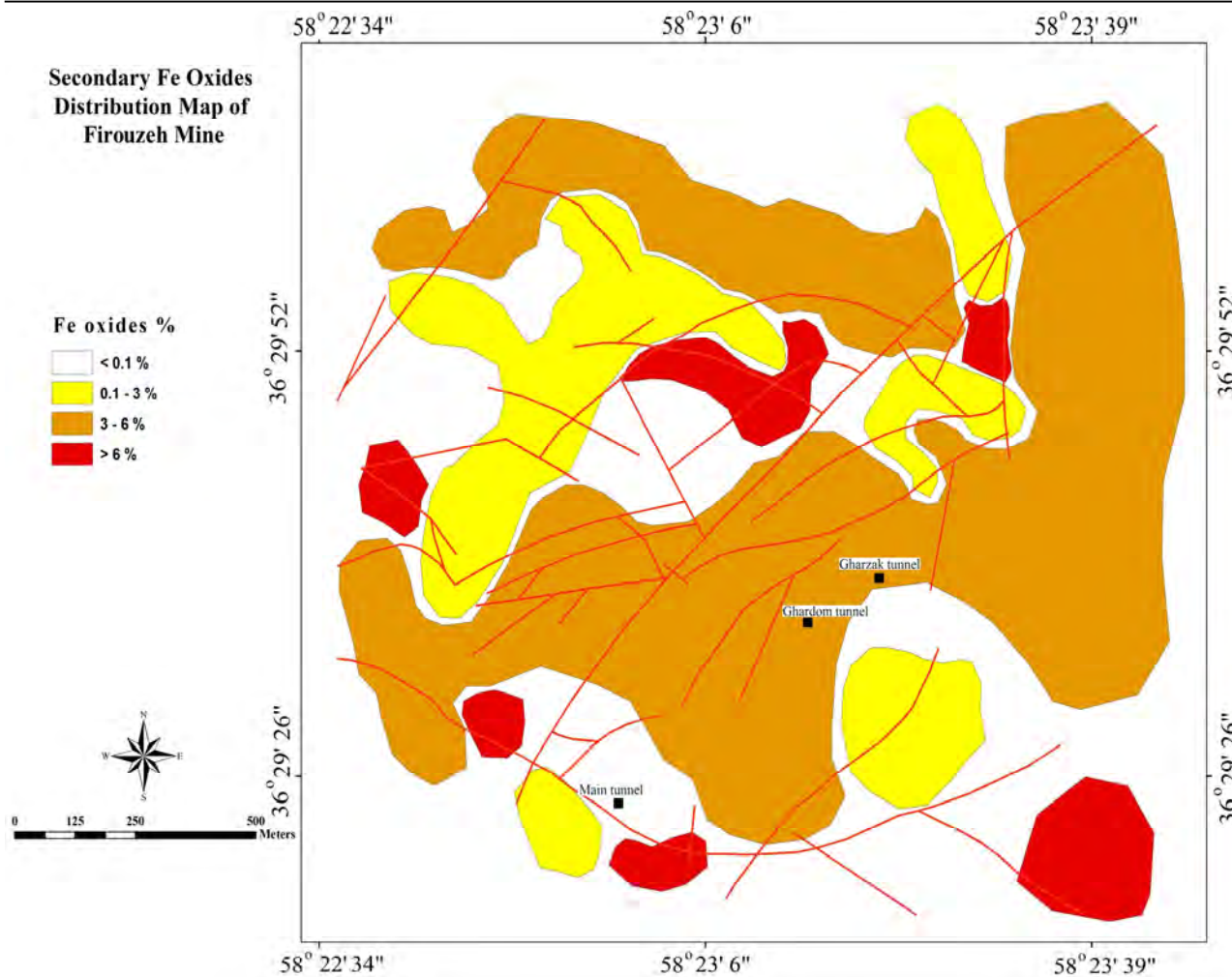
شکل ۶. تصاویر صحرایی از برخی کانی‌سازی‌ها و بافت و ساخت‌های موجود در معدن فیروزه. A: رگه‌چه‌های فیروزه و آلونیت کانی‌سازی‌های سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت) و اکسیدی (هماتیت و مگنتیت) را قطع کرده است، B: برش هماتیته، C: رگه-رگه‌های اسپکیولاریت در سنگ درون‌گیر تراکیت و D: وجود زوناسیون در هیدروکسید آهن، بیانگر وجود پیریت است. Tq: فیروزه، Sul: سولفید، Alu: آلونیت، Oxi: اکسید، Spc: اسپکیولاریت، Fe-Oxi: اکسیدهای آهن، Hem: هماتیت. علایم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 6. Field photos of some mineralizations and their textures in the Firouzeh mine. A: Turquoise and alunite cut the sulphide (pyrite-chalcopyrite) and oxide (hematite and magnetite) mineralizations, B: Hematitic breccia, C: Specularite vein-veinlets in trachyte, and D: Zonation of iron-hydroxide indicates pyrite has existed. Tq: Turquoise, Sul: Sulphide, Alu: Alunite, Oxi: Oxide, Spc: Specularite, Fe-Oxi: Iron Oxides, Hem: Hematite ((abbreviations from Whitney and Evans, 2010)



شکل ۷. تصاویر برخی از کانی‌های موجود در ماده معدنی در معدن فیروزه، A: رگه‌چه‌های اسپکیولاریت، B: رگه‌چه مگنتیت در زمینه‌ای برشی، C: دانه‌های پراکنده پیریت، کالکوپیریت و بورنیت، D: رگه‌چه آلونیتی، E: رگه‌چه اسپکیولاریت-هماتیت و F: فیروزه با بافت کلوئیدی. Spc: اسپکیولاریت، Mag: مگنتیت، Ccp: کالکوپیریت، Py: پیریت، Bn: بورنیت، Alu: آلونیت، Hem: هماتیت، Tq: فیروزه. علایم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 7. Images of some minerals in the Firouzeh mine, A: Specularite veinlets, B: magnetite veinlet in breccia, C: Pyrite-chalcopyrite-bornite disseminated crystals, D: Alunite veinlet, E: Specularite-Hematite veinlet, and F: Turquoise with colloidal texture. Spc: Specularite, Mag: Magnetite, Ccp: Chalcopyrite, Py: Pyrite, Bn: Bornite, Alu: Alunite, Hem: Hematite Tq: Turquoise. (abbreviations from Whitney and Evans, 2010)



شکل ۸. نقشه توزیع اکسیدهای آهن در معدن فیروزه

Fig. 8. The distribution map of iron oxides (%) in Firouzeh mine

زمین‌شیمی

نتایج تجزیه ۵۵ عنصری تعداد ۶۰ نمونه به روش ترکیبی ICP-AES و ICP-MS و نیز نتایج تجزیه همان نمونه‌ها به روش Aqua Regia برای عنصر طلا که در آزمایشگاه SGS کشور کانادا انجام شده در جدول ۱ آمده است.

Au: میزان عنصر طلا از ۱ تا ۶۹۹ میلی گرم در تن متغیر است (جدول ۱). بیشترین مقادیر طلا مربوط به تراکیت با دگرسانی سیلیسی در غرب تونل غاردم واقع در نیمه جنوبی منطقه است (شکل ۱۰). کانی‌سازی به صورت اکسیدهای آهن ثانویه و به شکل رگه و رگه‌چه دیده می‌شود.

Cu: میزان عنصر مس از ۱۰ تا ۱۰۷۴ گرم در تن متغیر است

(جدول ۱). بیشترین مقادیر مس مربوط به برش گرمایی با دگرسانی سیلیسی واقع در جنوب (غرب تونل اصلی) و مرکز (جنوب تونل غارزاک) منطقه است (شکل ۱۱). کانی‌سازی به صورت اسپیکولاریت، هماتیت و به شکل رگه-رگه‌چه و استوک‌ورک دیده می‌شود.

Fe: میزان آهن از ۱/۴۹ تا بیش از ۳۰ درصد متغیر است (جدول ۱). بیشترین مقادیر آهن مربوط به تراکیت با دگرسانی سیلیسی در شمال تونل غارزاک، غرب و جنوب تونل غاردم واقع در نیمه جنوبی منطقه است. کانی‌سازی به صورت اسپیکولاریت، مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت و به شکل رگه-رگه‌چه، استوک‌ورک و افشان دیده می‌شود.

(جدول ۱). بیشترین مقادیر لانتانیم مربوط به تراکیت و برش گرمابی با دگرسانی سیلیسی در جنوب غرب منطقه و تراکیت با دگرسانی آرژیلیک ضعیف-سیلیسی در غرب منطقه است.
 U: میزان اورانیوم از ۳/۰۳ تا ۲۴۳ گرم در تن متغیر است (جدول ۱). بیشترین مقادیر اورانیوم مربوط به تراکیت با دگرسانی سیلیسی در شمال منطقه است.

Ce: میزان سریم از ۳۴/۲ تا ۴۶۴ گرم در تن متغیر است (جدول ۱). بیشترین مقادیر سریم مربوط به تراکیت با دگرسانی آرژیلیک ضعیف-سیلیسی در غرب منطقه و تراکیت با دگرسانی سیلیسی در شمال غرب تونل اصلی واقع در جنوب شرق منطقه است.
 La: میزان لانتانیم از ۱۸/۱ تا ۲۲۷ گرم در تن متغیر است

Mineral	Hypogene	Hydrothermal breccia		Weathering
		Before brecciation	After brecciation	
Magnetite				
Specularite				
Pyrite				
Chalcopyrite				
Bornite				
Quartz				
Calcite				
Dolomite				
Siderite				
Ankerite				
Barite				
Kaolinite				
Illite				
Muscovite				
Montmorillonite				
Cryptomelane				
Jarosite				
Alunite				
Natro-Alunite				
Covellite				
Goethite				
Hematite				
Limonite				
Gypsum				
Turquoise				

شکل ۹. توالی همبزرادی کانی‌سازی در معدن فیروزه

Fig. 9. Paragenetic sequence of mineralization in Firouzeh mine

جدول ۱. نتایج تجزیه ترکیب عنصری به‌روش خرد سنجی در معدن فیروزه

Table 1. Analysis results of elemental composition in rock chip samples of the Firouzeh mine

Sample	Au	La	Ce	Cu	Pb	Zn	U	Th	Fe	P	As	Sb	Ba
Units	ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm
NFC4	223	78	138	16	22	30	6	34	3.13	0.08	54	1.8	989
NFC5	7	109	154	19	105	20	6	30	2.89	0.11	42	6	1935
NFC7	30	83	141	21	80	60	10	23	15	0.1	812	8.3	3154
NFC8	17	75	115	107	40	120	6	21	20.4	0.31	226	10.3	2842
NFC11	15	57	105	209	39	140	7	27	5.06	0.04	214	7.6	3696
NFC12	26	149	272	615	24	40	14	26	>30	0.66	125	7.4	970
NFC16	18	41	58	316	24	200	12	23	24.5	0.17	194	14.3	1459
NFC17	28	161	85	78	31	<5	3	12	20.5	0.23	662	7.7	1857
NFC21	12	206	290	30	44	<5	13	24	3.56	0.26	233	5.8	1901
NFC25	2	137	267	27	12	20	14	31	2.9	0.04	18	10.6	383
NFC29	2	131	271	10	14	10	8	39	2.22	0.03	44	7.2	152
NFC34	<1	149	312	26	32	40	14	73	4.02	0.08	7	9.1	2752
NFC37	2	79	130	25	88	80	6	34	4.86	0.11	20	1.5	725
NFC73	2	62	122	34	24	30	5	22	4.8	0.11	5	3.2	>10000
NFC77	2	227	464	34	28	50	18	97	3.53	0.05	19	15.1	1398
NFC81	1	61	125	28	47	60	6	15	12	0.37	82	13.4	3021
NFC84	2	101	182	22	38	10	6	32	3.15	0.04	12	11.2	387
NFC87	19	166	193	106	139	160	18	16	7.07	0.22	140	19.1	>10000
NFC89	<1	59	113	27	17	70	6	23	4.42	0.13	30	3	1256
NFC92	8	68	124	39	40	160	12	19	14.4	0.17	154	7.7	9499
NFC94	3	116	235	197	49	<5	8	37	3.65	0.1	597	30.1	5133
NFC96	4	129	214	170	108	20	17	38	3.39	0.12	1030	24.1	3029
NFC97	17	97	131	1074	77	640	12	29	17.2	0.18	1022	22.8	2404
NFC99	6	60	91	41	21	120	7	14	20.1	0.31	95	11.1	1452
NFC100	24	70	108	26	28	90	8	12	29.5	0.38	274	9.5	193
NFC102	13	74	110	237	36	40	7	4	19.2	0.34	197	9.9	260
NFC104	11	182	297	29	17	80	10	45	18.6	1.23	137	13.7	2290
NFC106	47	80	120	204	40	50	5	10	17.2	0.28	134	24.9	6110
NFC108	51	94	157	38	62	150	8	18	8.33	0.34	228	4.9	1722
NFC110	13	81	134	43	22	40	243	37	15	0.26	114	15.6	2017
NFC112	7	70	112	24	13	150	7	37	14.7	0.23	94	4	2174
NFC114	302	18	34	16	9	10	9	73	1.49	0.02	12	4.2	1194
NFC115	14	68	95	30	39	40	8	63	4.63	0.25	86	4	930

ادامه جدول ۱. نتایج تجزیه ترکیب عنصری به‌روش خرده سنگی در معدن فیروزه

Table 1 (Continued). Analysis results of elemental composition in rock chip samples of the Firouzeh mine

Sample	Au	La	Ce	Cu	Pb	Zn	U	Th	Fe	P	As	Sb	Ba
Units	ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm
NFC117	3	61	109	35	30	100	5	18	4.93	0.16	37	3.4	1467
NFC119	7	277	386	107	19	10	19	24	16.2	0.24	92	9.9	6817
NFC121	5	50	71	147	26	70	6	29	19	0.32	111	8.2	2285
NFC123	4	51	72	134	21	130	6	48	>30	0.39	156	6.6	2906
NFC125	72	71	102	100	41	30	15	15	19.2	0.18	334	24.2	981
NFC126	699	37	70	250	27	10	8	6	10.6	0.17	382	188	1384
NFC128	23	139	241	106	22	80	18	34	12	0.1	146	16.5	857
NFC130	33	142	184	92	26	10	23	31	6.11	0.1	241	23.3	3710

بیشترین مقادیر سرب در شمال منطقه مربوط به توده نفوذی مونزودپوریت پورفیری با دگرسانی سیلیسی در جنوب منطقه مربوط به برش گرمابی با دگرسانی سیلیسی و تراکی‌اندزیت با دگرسانی آرژیلیک ضعیف-سیلیسی و شمال غرب منطقه مربوط به برش گرمابی با دگرسانی سیلیسی ضعیف است. کانی‌سازی به‌صورت اسپیکولاریت، مگنتیت و اکسیدهای آهن ثانویه و به شکل رگه-رگه‌چه و استوک‌ورک دیده می‌شود.

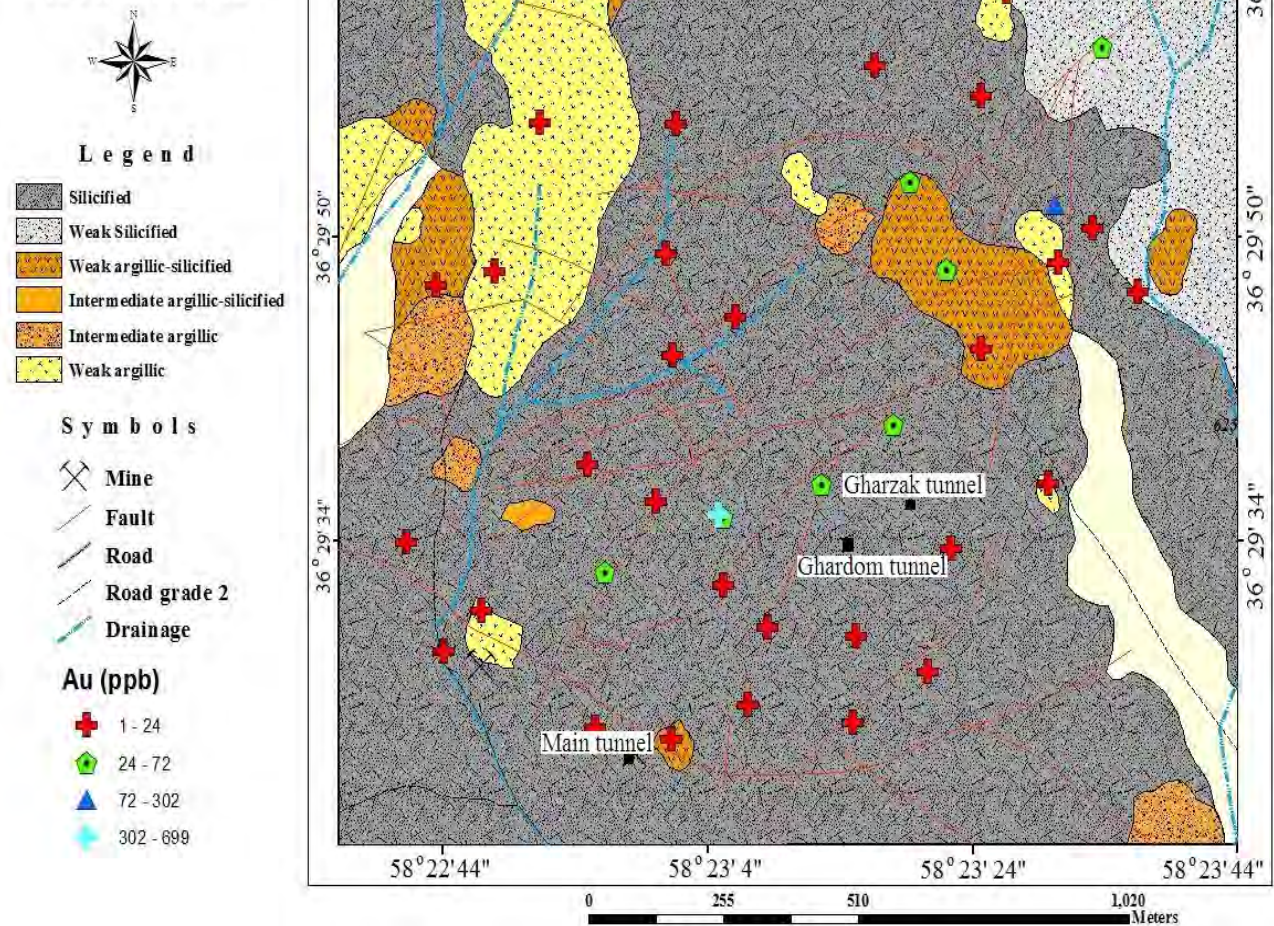
Zn: میزان روی از ۵ تا ۶۴۰ گرم در تن متغیر است (جدول ۱). بیشترین مقادیر روی مربوط به برش گرمابی با دگرسانی سیلیسی در شرق تونل اصلی واقع در جنوب منطقه است. کانی‌سازی به‌صورت اسپیکولاریت و اکسیدهای آهن ثانویه و به شکل رگه-رگه‌چه و استوک‌ورک دیده می‌شود.

Th: میزان توریم از ۴ تا ۹۷/۴ گرم در تن متغیر است (جدول ۱). بیشترین مقادیر توریم مربوط به برش گرمابی با دگرسانی سیلیسی و آرژیلیک ضعیف در شمال شرق منطقه و تراکیت با دگرسانی آرژیلیک ضعیف-سیلیسی در غرب و شمال غرب منطقه است.

Ba: میزان باریم از ۱۹۳ تا بیش از ۱۰۰۰۰ گرم در تن متغیر است (جدول ۱). بیشترین مقادیر باریم مربوط به توده نفوذی مونزودپوریت پورفیری در شمال منطقه، برش گرمابی در جنوب غرب منطقه، اندزیت در غرب منطقه و تراکیت در شمال غرب تونل اصلی با دگرسانی سیلیسی منطقه است. کانی‌سازی به‌صورت مگنتیت و به شکل رگه-رگه‌چه دیده می‌شود.

Pb: میزان سرب از ۹ تا ۱۳۹ گرم در تن متغیر است (جدول ۱).

Geochemical Map of Au in Rock Chip Samples of Firouzeh Mine



شکل ۱۰. نقشه پراکندگی عنصر طلا در معدن فیروزه

Fig. 10. Geochemical map of Au in Firouzeh mine

کوارتز به علت رخداد زمین‌شناسی گسترده، شفافیت و به دام انداختن میان‌بارهای سیال نسبتاً بزرگ، بهترین گزینه برای بررسی سیالات درگیر است (Shepherd et al., 1985). دماسنجی بر روی ۸۵ سیال درگیر و شوری بر روی ۶۷ سیال درگیر از مقاطع دوبرصیقل بررسی شد و نمودارهای مربوط ترسیم و شرایط فیزیکوشیمیایی سیالات درگیر کانه‌ساز تعیین شد (جدول ۲). بررسی‌های پتروگرافی سیالات درگیر اولیه در کوارتز نشان داد که اغلب به شکل‌های بیضوی، مثلثی و کشیده و در اندازه‌های کمتر از ۵ تا ۲۰ میکرون دیده می‌شوند. بر اساس

مطالعه سیالات درگیر

بررسی سیالات درگیر برای تعیین دماسنجی، تعیین نوع املاح، مقدار شوری محلول کانه‌دار و بررسی محیط کانه‌زایی در کانسارهای مختلف به کار می‌رود. برای این منظور لازم است بررسی‌های دقیق همبرزادی انجام شود و کانی‌هایی انتخاب شوند که از محلول کانه‌دار تشکیل شده باشند. برای بررسی سیالات درگیر در معدن فیروزه، ۶ نمونه کوارتز درشت‌بلور شفاف که با کانی‌سازی همراه بوده و در آنها آثار کانی‌سازی دیده شده است، برداشت شد، سپس، مقاطع دوبرصیقل تهیه شد.

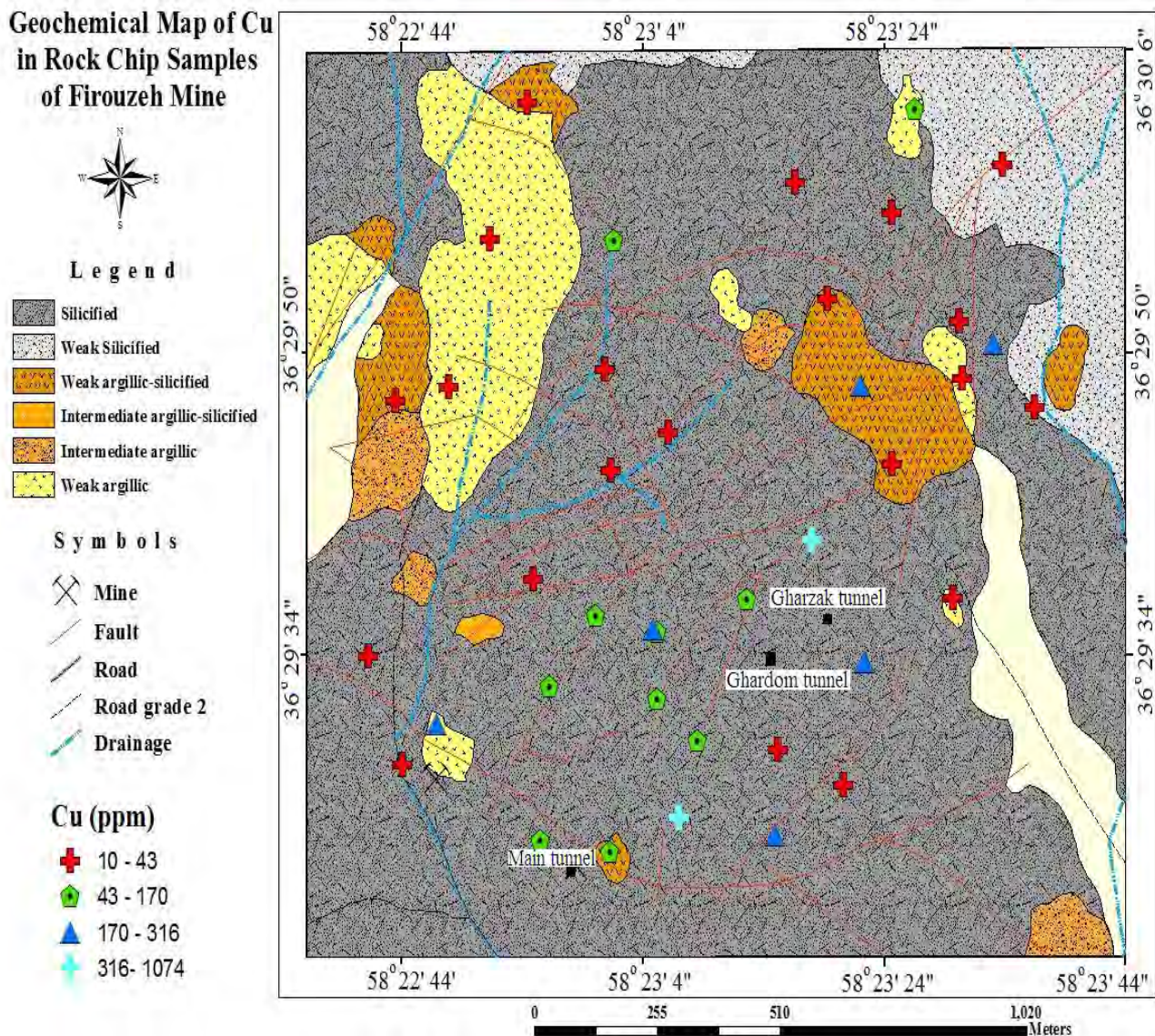
درجه سانتی‌گراد با میانگین دمای ۲۰۳ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۱۲- A).

آزمایش انجماد سیالات درگیر مکمل بررسی‌های دماسنجی است و در صورت امکان باید هر دو آزمایش بر روی یک سیال درگیر انجام شود. از طریق آزمایش انجماد، تعیین ترکیب و چگالی سیال نیز امکان‌پذیر است، به همین دلیل، این بررسی‌ها برای تفسیر داده‌های حاصل از همگن‌شدگی مهم هستند.

تقسیم‌بندی‌های متداول (Roedder, 1984; Shepherd et al., 1985)، آنها از نوع دو فاز غنی از مایع (L+V) و تک فاز مایع (L) هستند.

انواع سیالات درگیر اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب در مقاطع حضور داشته‌اند؛ ولی اندازه‌گیری‌های دماسنجی، تعیین نوع محلول و مقدار شوری بر روی سیالات اولیه نوع L+V انجام شد. تعداد ۸۵ سیال درگیر به روش گرمایی اندازه‌گیری شد. حرارت همگن‌شدن (T_h) سیالات درگیر اولیه بین ۱۴۷ تا ۲۷۸

Geochemical Map of Cu in Rock Chip Samples of Firouzeh Mine



شکل ۱۱. نقشه پراکنندگی عنصر مس در معدن فیروزه

Fig. 11. Geochemical map of Cu in Firouzeh mine

جدول ۲. اطلاعات ریزدماسنجی سیالات درگیر اولیه در معدن فیروزه

Table 2. Microthermometric data of primary fluid inclusions in Firouzeh mine

Sample No.	Mineralization	Fluid inclusion type	Nf	Nh	T _h (°C)	T _{m ice} (°C)	Salinity (wt. % equiv.)	Density (gr/cm ³)	P (bar)
NFTAB7	Mag, Py, Qtz	L + V	10	10	179-278	(-4.9)-(-6.8)	7.73-10.24	0.834-0.955	9-59
NFTP5	Mag, Hem, Alu, Qtz	L + V	13	11	189-250	(-5.6)-(-8.6)	8.68- 12.39	0.880- 0.958	10-37
NFGSP4	Mag, Hem, Tq, Qtz	L + V	13	9	188-248	(-9.3)-(-13.2)	13.18- 17.08	0.956-1.009	11-22
NFTAB5	Py, Ccp, Bn, Qtz	L + V	15	12	157-230	(-4.8)-(-8.5)	7.59-12.28	0.926-0.983	5-21
NFB5	Spec, Qtz	L + V	21	16	147-218	(-3.4)-(-6.5)	556-9.86	0.882-0.990	4-24
NFTGSP4	Mag, Hem, Qtz, Tq	L + V	12	9	165-211	(-8)-(-11.4)	11.7-1537	0.972-1.016	6-17

(T_h: دمای همگن‌شدگی، T_{m ice}: دمای ذوب یخ، L: فاز مایع، V: فاز بخار، Nh: تعداد گرمایش اندازه‌گیری شده، Nf: تعداد سرمایش اندازه‌گیری شده)

(Th: Homogenization temperature, T_{m ice}: Ice melting temperature, V: Vapor, L: Liquid, Nh: Number of heating, Nf: Number of freezing)

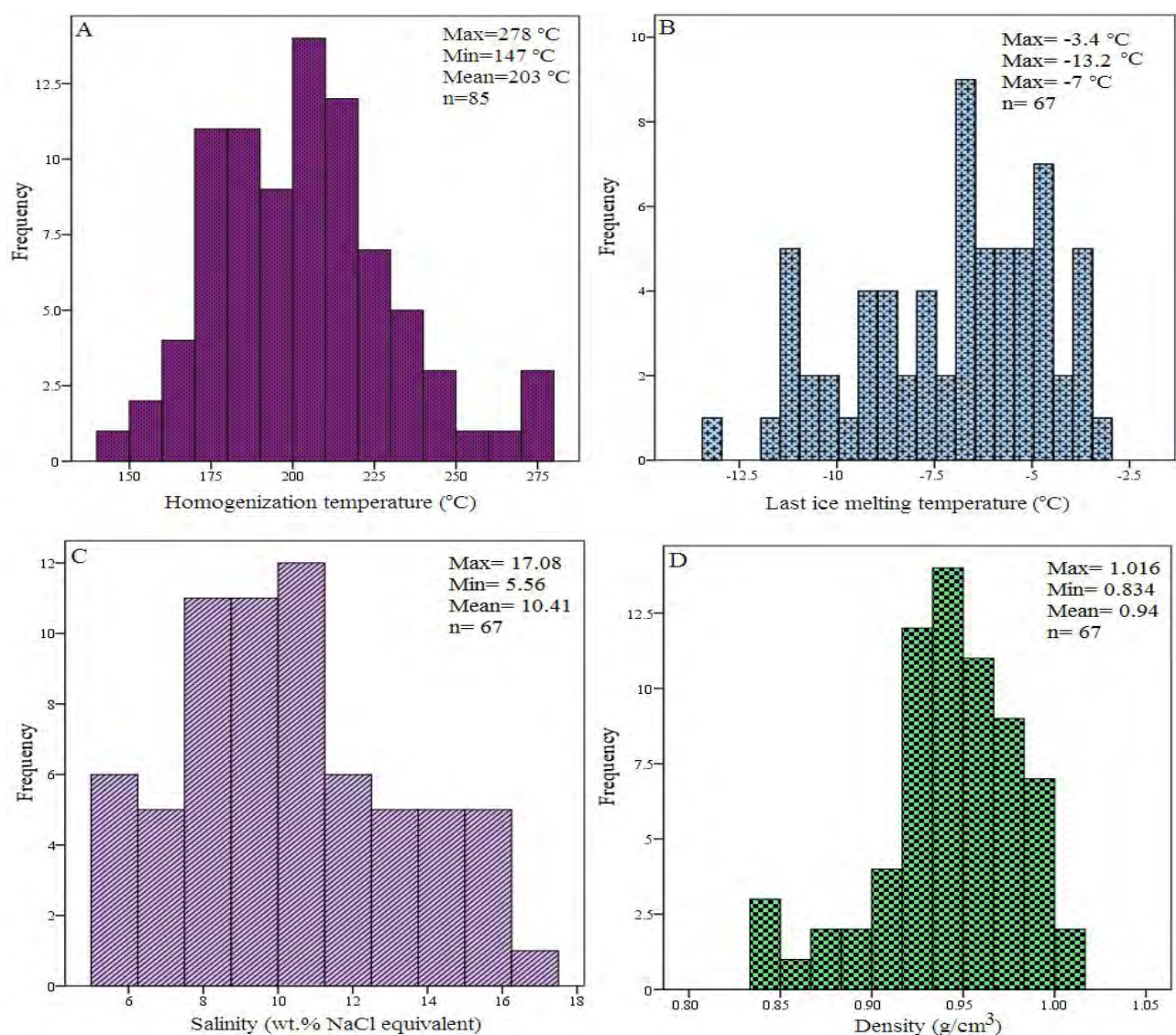
نیز CaCl₂، MgCl₂ و KCl در این سیالات درگیر است. نقطه اوتکتیک ۵۸- نشان‌دهنده سیستم H₂O-NaCl-CaCl₂ است. با ادامه گرم کردن، بلورهای یخ بیشتر ذوب می‌شوند؛ تا جایی که آخرین بلور یخ ذوب می‌شود. دمای نهایی ذوب (T_m) بسته به ماهیت نمک موجود فرق می‌کند. به سخن دیگر، دمای نهایی ذوب نیز مقدار شوری را مشخص می‌کند. مقدار T_m بین ۳/۴- تا ۱۳/۲- درجه سانتی‌گراد با میانگین ۷- درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (شکل ۱۲-B). محدوده دمای ذوب یخ (T_{m ice}) در نمونه‌های بررسی شده بازه ۱۳/۲- تا ۳/۴- درجه سانتی‌گراد معادل شوری‌های در محدوده ۵/۵۶ تا ۱۷/۰۸ درصد وزنی است (شکل ۱۲-C). داده‌های شوری برای سیالات درگیر اولیه دو فازی مایع-بخار (L+V) نشانگر میزان شوری کم تا متوسط این سیالات است. با توجه به داده‌های به‌دست آمده و هیستوگرام شوری در نمونه‌ها حداقل دو محدوده شوری مختلف

برای سامانه‌های آبگین آب و نمک، مطالعات انجماد بهترین روش برای تعیین شوری سیالات درگیر آبگین است؛ زیرا کاهش نقطه انجماد آب خالص با نمک موجود در محلول رابطه‌ای مستقیم دارد. این امر با اندازه‌گیری دمای ذوب نهایی یخ T_m در هنگام حرارت‌دادن مجدد سیال درگیری که قبلاً منجمد شده، قابل حصول است که البته برای نمک‌های مختلف، متفاوت است.

نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) در سیالات نیز بین ۵۸/۶- تا ۵۵- درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. نقطه اوتکتیک در نمونه‌های مورد بررسی حدود ۵۵- درجه سانتی‌گراد است که با سامانه H₂O- NaCl-KCl-CaCl₂ مطابقت دارد. نخستین دمای ذوب‌شدگی رابطه‌ای مستقیم با ترکیب نمک موجود در سیال گرمایی دارد (Shepherd et al., 1985). نقطه اوتکتیک حدود ۵۵- درجه سانتی‌گراد بیانگر حضور نمک‌های NaCl و

همگن‌شدن-شوری سیالات درگیر استفاده شد. همچنین، قرارداد تمامی اندازه‌گیری‌ها در نمودار فشار-حرارت-عمق برای سیالات درگیر بررسی شده نشان می‌دهد که کانی‌سازی در عمق کمتر از یک کیلومتر بر اساس فشار لیتواستاتیک تشکیل شده است. بر اساس این محاسبات، حداقل عمق تشکیل سیالات درگیر بررسی شده حدود ۲۰۰ تا ۹۵۰ متر تخمین زده می‌شود.

دیده می‌شود. در یک گروه محدوده شوری ۵/۵۶ تا ۱۱/۷ درصد وزنی NaCl است و در نمونه‌های گروه دوم محدوده شوری ۱۳/۱۸ تا ۱۷/۰۸ درصد وزنی NaCl است (شکل ۱۲-C). چگالی سیالات درگیر منطقه بر اساس نرم‌افزار FLINCOR، از ۰/۸۳۴ تا ۱/۰۱۶ با بیشترین فراوانی در محدوده ۰/۹۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است (شکل ۱۲-D). برای اندازه‌گیری عمق به تله افتادن سیال درگیر در زمان جوشش احتمالی از نمودار عمق-دمای



شکل ۱۲. نمودار فراوانی ریزدماسنجی برای سیالات درگیر معدن فیروزه، A: نمودار دمای همگن‌شدن، B: نمودار دمای ذوب یخ، C: نمودار شوری و D: نمودار چگالی

Fig. 12. Histogram of microthermometric for fluid inclusions, A: histogram of homogenization temperature, B: histogram of ice melting temperature, C: histogram of salinity, and D: histogram of density

بحث و نتیجه‌گیری

محیط زمین‌شناسی: معدن فیروزه نیشابور در بخشی از نوار آتشفشانی - نفوذی شمال گسل درونه قرار گرفته که قبلاً توسط کریم‌پور (Karimpour, 2004) به‌عنوان منطقه با توانایی بالا برای کانسارهای نوع اکسید آهن و IOCG معرفی شده است. این منطقه در کمان ماگمایی سنوزوئیک سبزوار - قوچان قرار دارد که فعالیت‌های ماگمایی گسترده‌ای طی دوره ائوسن تا پلیستوسن داشته است. مهم‌ترین واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در منطقه شامل گدازه و آذرآواری‌هایی با ترکیب تراکیت، آندزیت، تراکی‌آندزیت، کوارتز تراکیت و بیوتیت تراکی‌آندزیت با سن پالئوسن - ائوسن هستند که توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق با ترکیب کوارتز مونوزوسینیت پورفیری و مونزودوریت پورفیری با سن ائوسن میانی در آنها نفوذ کرده است. سنگ درون‌گیر معدن فیروزه مشابه کانسارهای بزرگ IOCG دنیا برای نمونه کانسارهای مانته ورده شیلی (Vidla et al., 1996; Zamora and Castillo, 2001; Marschik and Leveille, 1998; Marschik et al., 2000) است که سنگ درون‌گیر آنها گدازه‌های آندزیتی - بازالتی است. وجود چندین رخنمون از سنگ‌های نفوذی نیمه‌عمیق در بخش سطحی و تونل‌های معدن فیروزه و وجود انشعابات از سنگ‌های نفوذی در قسمت‌های زیرین که خود دارای کانی‌سازی نیز هستند، می‌تواند منشأ احتمالی کانی‌سازی باشد.

زون‌های دگرسانی: مهم‌ترین دگرسانی‌هایی که واحدهای آتشفشانی و نفوذی منطقه را تحت تأثیر قرار داده شامل سیلیسی، آرژلیک و کربناتی است که دگرسانی سیلیسی بیشترین گسترش را دارد. ذخایر نوع IOCG از لحاظ منشائی با حجم‌های خیلی زیادی از سنگ‌هایی که توسط فرآیندهای هیدروترمالی آلتزه شده‌اند (۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر مربع)، همراه هستند (Hitzman, 2000). این ذخایر از نظر ویژگی انواع دگرسانی مشترکند (Hitzman et al., 1992; Haynes, 2000). دگرسانی سدیک - کلسیک حاوی مگنتیت، دگرسانی

غالب در بیشتر سیستم‌های IOCG است. هماتیت ممکن است جانشین شود یا به‌جای مگنتیت در سیستم‌های از لحاظ ساختاری سطوح بالا تشکیل شود (Hitzman and Valenta, 2005). دگرسانی در گروه IOCG بیشتر به‌صورت سدیک در اعماق، پتاسیک در عمق متوسط و بالاخره سیلیسی در بخش‌های بسیار کم عمق است (Hitzman and Valenta, 2005). با توجه به اینکه در معدن فیروزه، دگرسانی غالب از نوع سیلیسی و پس از آن آرژلیک است، ممکن است دگرسانی پتاسیک در قسمت‌های پایین‌تر از تونل‌ها و زون اکسیدان وجود داشته باشد. گسترش زیاد دگرسانی همراه با کانی‌سازی در محدوده فیروزه بیانگر حضور ذخیره بزرگ معدنی است.

کانه‌زایی: کانه‌زایی در معدن فیروزه را می‌توان به دو زون درون‌زاد و سوپرژن تقسیم کرد. این کانه‌زایی به شکل‌های استوک‌ورک، رگه - رگه‌چه‌ای، افشان و برش گرمابی به‌صورت اولیه و ثانویه در سطح منطقه و تونل‌های معدن فیروزه رخ داده است. کانی‌سازی مرتبط با فرآیندهای ساختاری حاکم بر منطقه است. بافت برشی به‌عنوان بافت غالب در محدوده معدن فیروزه تشابه زیادی با کانسار ارنست هنری استرالیا (Craske, 1995) دارد. کانی‌سازی اولیه شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، اسپیکولاریت و مگنتیت است. وجود رگه‌چه‌های اسپیکولاریت نشان‌دهنده شرایط اکسیداسیونی بالای محلول کانه‌دار است. کانی‌سازی ثانویه شامل فیروزه، آلونیت، کولیت، هماتیت، گوتیت، لیمونیت، ژاروسیت، آنکرایت، سیدریت، کریپتوملان، باریت، کلسیت، دولومیت و ژیپس است. مقدار زیاد اکسیدهای آهن در زون گوسان و وجود زوناسیون در اکسیدهای آهن در تونل اصلی، نشان‌دهنده مقدار زیاد کانی‌های سولفیدی در منطقه است. کانه‌زایی معدن فیروزه در مقایسه با کانسارهای IOCG دنیا، بیانگر تشابه آن با کانسار کاندلاریا شیلی (Marschik and Craske, 1995; Marschik et al., 2000; Leveille, 1998; Marschik et al., 2000) است. فیروزه آخرین فاز کانه‌زایی است که بر اساس مدل گیلبرت و پارک (Guilbert and Park, 1986)، با تأثیر

توجه به بررسی‌های زمین‌شیمیایی، معدن فیروزه از عناصر Fe، Cu، Au، LREE، U، Co، Nb و P غنی‌شدگی نشان می‌دهد که شاخص ذخایر IOCG است.

تکامل سیال کانه‌زا: بر مبنای بررسی سیالات درگیر معدن فیروزه، سیالات درگیر اولیه آن از نوع L+V با دماهای همگن شدن ۱۴۷ تا ۲۷۸ با میانگین ۲۰۳ درجه سانتی‌گراد و شوری ۵/۵۶ تا ۱۷/۰۸ درصد وزنی معادل نمک طعام بوده و از محلولی شامل نمک‌های KCl، CaCl₂، MgCl₂ و NaCl به وجود آمده است. چگالی سیالات درگیر ۰/۸۳۴ تا ۱/۰۱۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب با بیشترین فراوانی در محدوده ۰/۹۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و کانی‌سازی در عمق حدود یک کیلومتر تشکیل شده است.

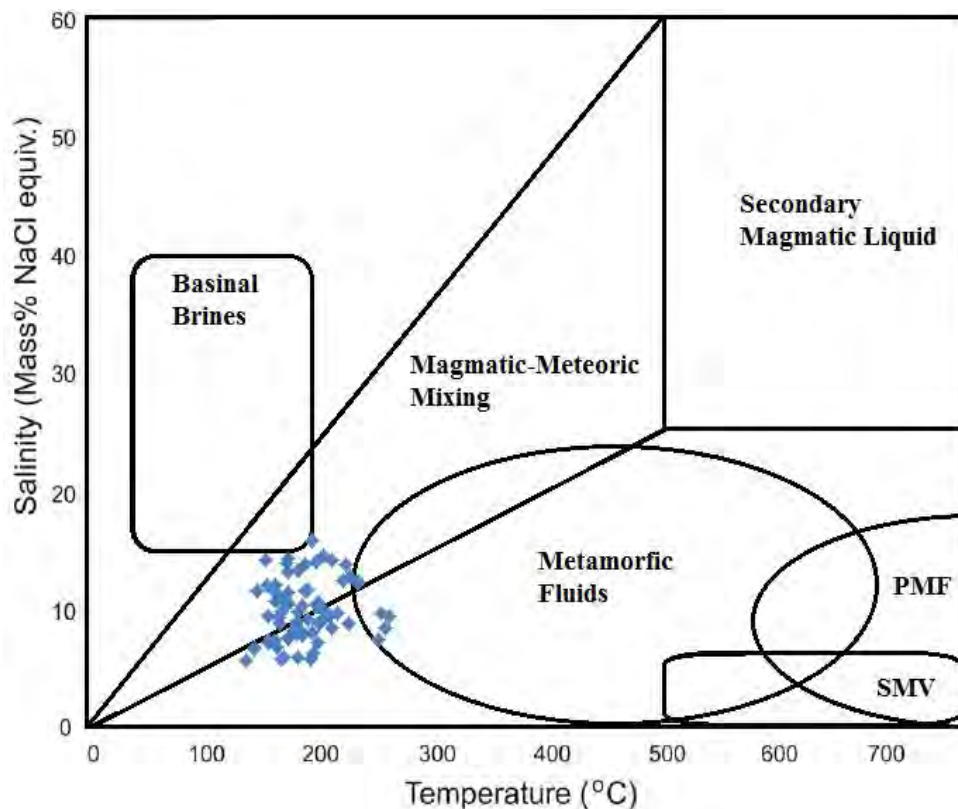
همزیستی بین سیالات درگیر دو فاز غنی از مایع و غنی از بخار در کوارتز نشان‌دهنده وقوع پدیده جوشش احتمالی در زمان تشکیل کانی‌سازی است. جوشش زمانی اتفاق می‌افتد که یک سیال تک فاز با شوری بالا به حالت دو فاز روی نقطه طرف مایع منحنی بحرانی می‌رسد. در این حالت تعدادی فاز بخار با شوری کمتر از آن جدا می‌شود و باعث تولید حباب می‌شود (Ulrich et al., 2001). به وقوع پیوستن پدیده جوشش باعث تغییراتی در شرایط فیزیکی شیمیایی محلول کانه‌دار مثل کاهش دما، افزایش pH و غیره می‌شود که لازمه ته‌نشست فلزات و ناپایداری کمپلکس‌ها و تشکیل کانی‌هاست. همچنین، فرایند اختلاط بین محلول ماگمایی گرم و شور و محلول جوی سرد و کم شور می‌تواند باعث کاهش دما، ناپایداری کمپلکس‌ها و ته‌نشینی فلزات شود (Simard et al., 2006). نمودار دمای همگن شدن در برابر میزان شوری (Zarasvandi et al., 2001; Wilkinson, 2015)، نشان‌دهنده فرایند اختلاط برای سیال به وجود آورنده کانی‌سازی در معدن فیروزه است (شکل ۱۳). ویلیامز (Williams, 2010) معتقد است که در بخش‌های بالایی ذخایر IOCG، آب‌های سرد سطحی با محلول‌های داغ ماگمایی سرچشمه گرفته از عمق مخلوط می‌شوند. به‌طور معمول، توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی IOCG در اعماق

آب‌های جوی بر پیریت و کالکوپیریت، اسید سولفوریک تشکیل و با تأثیر آن بر کانی آپاتیت، اسید فسفریک حاصل می‌شود و در نهایت از تأثیر محلول‌های حاوی فسفر و مس بر آلونیت‌ها، فیروزه به وجود می‌آید.

بی‌هنجاری‌های حاصل از اکتشافات زمین‌شیمیایی: بر اساس نتایج حاصل از بررسی‌های زمین‌شیمیایی، ناهنجاری‌های عناصر مس (تا ۱۰۷۴ ppm)، طلا (تا ۶۹۹ ppb)، آهن (تا ۳۰ درصد)، سریم (تا ۴۶۴ ppm)، لانتانیم (تا ۲۲۷ ppm)، اورانیوم (تا ۲۴۳ ppm)، کبالت (تا بیش از ۱۰۰۰۰ ppm)، توریم (تا ۹۷/۴ ppm)، فسفر (تا ۱/۲۳ درصد)، نیویوم (تا ۴۲۸ ppm)، باریوم (تا ۱۰۰۰۰ ppm)، منگنز (تا ۳/۹۲ درصد)، وانادیم (تا ۵۸۰ ppm)، سرب (تا ۱۳۹ ppm)، روی (تا ۶۴۰ ppm) و آرسنیک (تا ۱۰۳۰) در معدن فیروزه دیده می‌شود. ناهنجاری‌ها اغلب مربوط به تراکیست، برش گرمایی، تراکی‌آندزیت و توده نفوذی مونزودپوریت پورفیری با دگرسانی عمدتاً سیلیسی و گاهی آرژیلیک است که در نیمه جنوبی منطقه قرار دارند. بررسی‌های ژئوفیزیکی به‌روشنی مغناطیس‌سنجی زمینی (Ghiasvand et al., 2016) حضور بی‌هنجاری مغناطیسی را در بخش جنوبی منطقه را تأیید کرده که منطبق بر ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی حاصل از این پژوهش است. در کانسارهای IOCG عناصر Cu، Au، Ag، U، REE، Bi، Co، Nb و P غنی‌شدگی نشان می‌دهند (Corriveau, 2007). عناصر مس و طلا در تمامی ذخایر IOCG مهم وجود دارند. برای نمونه مس در کاندلاریا (شیلی) و مانتوورده (شیلی) به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۵۵ درصد و طلا در این ذخایر به ترتیب ۲۲۰ و ۱۱۰ میلی‌گرم در تن است (Marschik et al., 2000; Zamora and Castillo, 2001). همین‌طور، مس در کانسارهای المپیک‌دم و پرومونت‌هیل به ترتیب ۱ و ۰/۸۹ درصد و طلا در این ذخایر به ترتیب ۵۰۰ و ۸۱۰ میلی‌گرم در تن است. عنصر U در محدوده‌های المپیک‌دم (Fe-Cu-Au-REE-U-Ag) و آک‌دم (Cu-Au-U) و نیز عنصر Co در محدوده کلانکاری (Cu-Co-Au) به‌عنوان عنصر همراه وجود دارد. بنابراین، با

مشابهی با کوه‌زر تشکیل شده است (Almasi et al., 2017). در نمودار میزان شوری در برابر دمای همگن‌شدگی (Beane, 1983)، اختلاط سیالات ماگمایی - جوی منشأ سیالات کانه‌ساز در معدن فیروزه است (شکل ۱۴)، البته، بررسی ایزوتوپ‌های اکسیژن و گوگرد برای اثبات این موضوع ضروری است. در شکل ۱۴، هم‌پوشانی سیالات دگرگونی نیز وجود دارد؛ ولی شواهدی از سنگ‌های دگرگونی یا دگرگونی ناحیه‌ای در منطقه وجود ندارد.

حدود ۱ تا ۱۵ کیلومتری تشکیل شده‌اند (Pollard, 2006). بر اساس پلارد (Pollard, 2006)، کانسارهایی مانند المپیک‌دم، مانته‌ورده، کاندلاریا و آله‌ماتو از اعماق نزدیک به سطح زمین تا عمق تقریبی ۵ کیلومتری و کانسارهایی مانند ارنست هنری، سالوبو و لایتینگ کریک در اعماق تقریبی بالای ۵ کیلومتر تشکیل شده‌اند. کانی‌سازی طلا در کوه‌زر در بخش‌های بسیار کم عمق در سیستم IOCG و در سنگ‌های آتشفشانی و دور از توده‌های نفوذی عامل تشکیل شده است (Mazlumi, 2009). کانسارهای کمرمرد در تراز ارتفاعی



شکل ۱۳. نمودار میزان شوری در برابر دمای همگن‌شدگی (Beane, 1983) برای سیالات درگیر معدن فیروزه

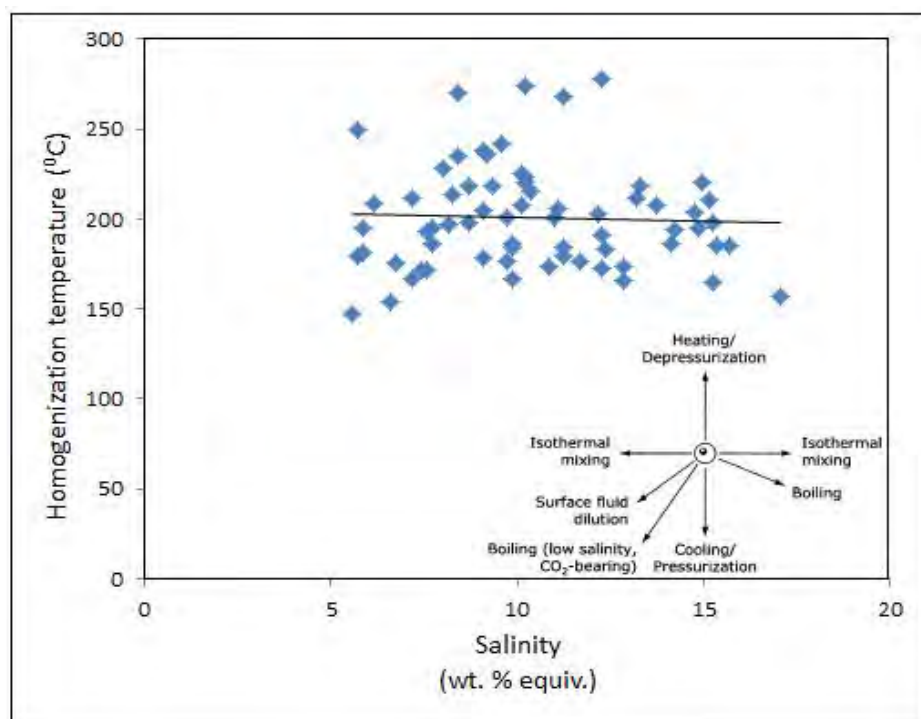
Fig. 13. Homogenization vs. salinity diagram (Beane, 1983) for fluid inclusions of Firouzeh mine

را نشان می‌دهند. مجموعه کانیایی شامل دو گروه ۱- مگنتیت- کالک‌سیلیکات- آلکالی فلدسپار و سولفیدهای آهن- مس و ۲- هماتیت- سریسیت- کلریت- کربنات، سولفیدهای آهن- مس و کانی‌های U و REE دار است. کانی‌های مجموعه هماتی

بر اساس شواهد زمین‌شناسی، دو مرحله فعالیت گرمایی در سیستم‌های IOCG در محدوده المپیک‌دم شناخته شده است (Bastrakov et al., 2007). دگرسانی‌های گرمایی غنی از اکسید آهن در منطقه المپیک‌دم، دماهای بالا، متوسط تا پایین

این، بر اساس پلارد (Pollard, 2001; Pollard, 2006)، فو و همکاران (Fu et al., 2003) و رایگر و همکاران (Rieger et al., 2012)، تشکیل کانسارهای IOCG با سیالات ماگمای-گرماپی با دو نوع دامنه دمای تشکیل متفاوت مرتبط هستند، برخی از آنها با دمای متوسط تا بالا (حدود ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد)، شوری بالا و محتوی CO₂ است (Pollard, 2001; Fu et al., 2003; Pollard, 2006; Rieger et al., 2012) و برخی از کانسارهای IOCG به‌ویژه آنهایی که در مرحله تشکیل کانی‌سازی مس-طلا هستند، مرتبط با محلول‌های دما متوسط تا کم (کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، شوری متوسط تا پایین و مقادیر متغیر CO₂ هستند. نتایج بررسی سیالات درگیر منطقه فیروزه، نشان‌دهنده آن است که دما و شوری سیالات کانه‌ساز در این منطقه مشابه سیالات فاز هماتیتی (گروه ۲) منطقه المپیک‌دم است.

(گروه ۲) جایگزین مجموعه غنی از مگنتیت (گروه ۱) شده‌اند و کانی‌سازی عمده مس-طلا با مجموعه هماتیتی (گروه ۲) همراه است. بررسی سیالات درگیر در مجموعه کانیایی غنی از مگنتیت بیانگر آن است که مقادیر مس کمتر از ۵۰۰ گرم در تن به‌وسیله مرحله آغازی سیالات دما بالا (بیش از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) حمل شده که دگرسانی غنی از مگنتیت را ایجاد کرده‌اند. این سیالات به‌صورت چندفازی (مایع، بخار و جامدهای چندتایی) و در برخی موارد حاوی کالکوپیریت هستند. در مقابل، سیالات فاز هماتیتی (گروه ۲) شامل انواع مایع-بخار ساده با دماهای همگن شدن ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند (Bastrakov et al., 2007). دامنه تغییرات میزان شوری در کانسارهای منطقه المپیک‌دم شامل مجموعه هماتیتی و مجموعه غنی از مگنتیت، از ۷ تا ۴۲ درصد وزنی معادل نمک طعام است (Hitzman et al., 1992; Haynes, 2001; Pollard, 2001; et al., 1995). علاوه بر



شکل ۱۴. نمودار شوری در برابر دمای همگن‌شدن در معدن فیروزه که نشان‌دهنده فرایند اختلاط برای سیال کانه‌زا با آب‌های جوی است (Wilkinson, 2001)

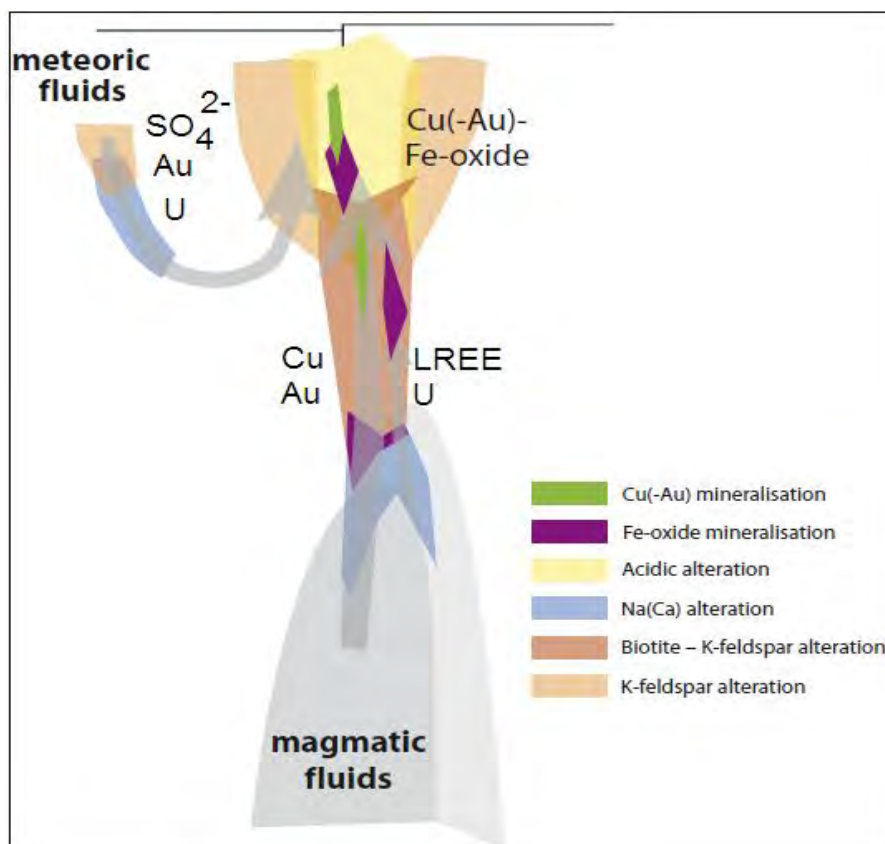
Fig. 14. Salinity vs. homogenization temperature diagram of Firouzeh mine indicates mixing for ore-bearing fluids with meteoric fluids (Wilkinson, 2001)

مدل تشکیل ذخیره: چندین مدل زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی برای تشکیل ذخایر IOCG ناحیه المپیک دم ارائه شده؛ ولی دو مدل در اغلب آنها مشترک است: ۱- مدل نسبتاً احیایی، مگنتیت غالب و سیال دما بالا و ۲- مدل اکسیده، هماتیت غالب و سیال دما پایین (Oreskes and Einaudi, 1990; Reeve et al., 1990; Oreskes and Einaudi, 1992; Gow et al., 1994; Haynes et al., 1995; Gow, 1996; Bastrakov et al., 2007).

سیالات اکسیده همراه با کانی‌سازی مس- اورانیوم- طلا و برش هماتی در دماهای نسبتاً پایین با واکنش سیال- سنگ، تشکیل سیالات کانه‌دار اکسیده غنی از مس- اورانیوم- طلا را موجب شده‌اند. احیای سیالات اکسیده غنی از مس- طلا سازوکار تشکیل معدن فیروزه نیشابور است. بارتون و جانسون (Barton

and Johnson, 2004)، سه مدل برای منشأ سیالات در تشکیل ذخایر IOCG ارائه داده‌اند. این سه مدل شامل ۱- سیالات با منشأ سطحی- حوضه رسوبی، ۲- سیالات با منشأ دگرگونی و ۳- سیالات با منشأ ماگمایی و با اختلاط با سیالات جوی هستند. بر اساس بررسی‌های انجام شده، گزینه ۳ مدل تشکیل ذخایر منطقه فیروزه است (شکل ۱۵).

ویژگی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و سیالات در گیر در محدوده معدن فیروزه نیشابور نشانگر حضور کانی‌سازی بزرگی از نوع اکسید آهن مس- طلا- اورانیوم- عناصر نادر خاکی سبک، مشابه بخش هماتیت- غالب کانسار IOCG المپیک دم استرالیا است.



شکل ۱۵. مدل شماتیک منشأ سیالات و نحوه تشکیل معدن فیروزه. با اقتباس از هاینز و همکاران (Haynes et al., 1995)، باستراکوف و همکاران (Bastrakov et al., 2007)، کولب و استنگارد (Kolb and Stensgaard, 2009) و بارتون و جانسون (Barton and Johnson, 2004)

Fig. 15. Schematic model for fluid source and genesis of Firouzeh mine (Bastrakov et al., 2007; Haynes et al., 1995; Kolb and Stensgaard, 2009; Barton and Johnson, 2004)

قدردانی

این مقاله در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۳/۱۸۳۰۳ و با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. از همکاری صمیمانه سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (به‌ویژه مرکز فرآوری مواد معدنی ایران) و

مساعدت آزمایشگاه‌های زراژما کانسارن بینالود در ایران و ACME و SGS در کانادا سپاسگزاری می‌کنیم. همچنین از مساعدت شرکت تعاونی روستایی معدن فیروزه نیشابور در هنگام بازدیدهای صحرائی قدردانی می‌شود.

References

- Akrami, M.A. and Asgari, A., 2000. Geological map of Soltanabad, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Almasi, A., Karimpour, M.H., Hattori, K., Santos, J.F., Ebrahimi Nasrabadi, K. and Rahimi, B., 2016. Au-bearing magnetite mineralizaion in Kashmar (alteration, mineralization, geochemistry, geochemistry and fluid inclusions); and Tectono-magmatism of northeast of Iran. *Journal of Economic Geology*, 8(2): 569–592. (in Persian with English abstract)
- Barton, M.D. and Johnson, D.A., 2004. Footprints of Fe-oxide (-Cu-Au) systems. Centre for Global Metallogeny, The University of Western Australia, Australia, Report 33, 116 pp.
- Bastrakov, E.N., Skirrow, R.G. and Davidson, G.J., 2007. Fluid evolution and origins of Iron Oxide Cu-Au prospects in the Olympic Dam district, Gawler craton, South Australia. *Economic Geology*, 102(8): 1415–1440.
- Beane, R.E., 1983. The Magmatic-Meteoric Transition. Geothermal Resources Council, California, Report 13, 253 pp.
- Berberian, M., Qorashi, M., Shoja-Taheri, J. and Talebian, M., 2000. Seismotectonics and Earthquake-Fault Hazard Investigations in the Mashhad-Neyshabour Region. Geology Survey of Iran, Tehran, 233 pp. (in Persian)
- Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683–684.
- Brown, P.E. and Lamb, W.M., 1989. P-V-T properties of fluids in the system H₂O±CO₂±NaCl: new graphic presentations and implications for fluid inclusion studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(6): 1209–1221.
- Corriveau, L., 2007. Iron oxide copper gold deposits: A Canadian perspective. In: W. Goodfellow (Editor), *Mineral deposit of Canada: A synthesis of major deposit- types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Geological Association of Canada Mineral deposits Division, Vancouver, pp. 307–328.
- Craske, T.E., 1995. Geological aspects of discovery of the Ernest Henry Cu-Au deposit, northwest Quinsland. *Australian Institute of Geoscientist Bulletin*, New South Wales, Report 16, 109 pp.
- Fatehi, H., 2014. Geology, mineralization and geochemistry of Jalambadan deposit, NW Sabzevar. M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 240 pp. (in Persian)
- Fu, B., Williams, P.J., Oliver, N.H.S., Dong, G., Pollard, P.J. and Mark, G., 2003. Fluid mixing and unmixing as an ore-forming process in the Cloncurry Fe-oxide-Cu-Au district, NW Queensland, Australia. Evidence from fluid inclusions. *Journal of Geochemical Exploration*, 78(9): 617–622.
- Ghiasvand, A., Karimpour, M.H., Heidarian Shahri, M.R. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2016. Mineralization and ground magnetic survey for mineralization prospecting and identify of intrusive bodies in the Neyshabour Firouzeh mine, Khorasan Razavi province. *Journal of Advanced Applied Geology*, 20(6): 86–103. (in Persian)
- Gholami, S., 2009. Geology, mineralization, geochemistry and magnetometry of Shotorsang iron deposit, NE Sabzevar. M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 174 pp. (in Persian)
- Gow, P.A., 1996. Geological evolution of the

- Stuart Shelf and Proterozoic iron oxide-associated mineralization: Insights from regional geophysical data. Ph.D. Thesis, Monash University, Melbourne, Australia, 151 pp.
- Gow, P.A., Wall, V.J., Oliver, N.H.S. and Valenta, R.K., 1994. Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits: Further evidence of hydrothermal origins. *Geology*, 22(7): 633–636.
- Guilbert, J.M. and Park, C.F., 1986. *The Geology of Ore Deposits*. W.H. Freeman and Company, New York, 985 pp.
- Haynes, D.W., 2000. Iron oxide copper (-gold) deposits: Their position in the ore deposit spectrum and modes of origin. In: T.M. Porter (Editor), *Hydrothermal iron oxide-copper-gold and related deposits: A global perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp. 71–90.
- Haynes, D.W., Cross, K.C., Bills, R.T. and Reed, M.H., 1995. Olympic Dam ore genesis: A fluid-mixing model. *Economic Geology*, 90(2): 281–307.
- Hitzman, M.W., 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when, and why? In: T.M. Porter (Editor), *Hydrothermal iron oxide-copper-gold and related deposits: A global perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, Australia, pp. 9–25.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N. and Einaudi, M.T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits. *Precambrian Research*, 58(1–4): 241–287.
- Hitzman, M.W. and Valenta, R.K., 2005. Uranium in iron oxide-copper-gold (IOCG) systems. *Economic Geology*, 100(8): 1657–1661.
- Karimpour, M.H., 2004. Mineralogy, alteration, country rock and tectonic setting of Iron oxides Cu-Au and examples of Iran. *Proceedings of the 11th Conference of Iranian society of crystallography and mineralogy*, University of Yazd, Yazd, Iran. (in Persian)
- Karimpour, M.H., Farmer, L., Ashouri, C. and Saadat, S., 2006. Trace and REE geochemistry of Paleo-Tethys collision-related granitoids from Mashhad, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 17(2): 127–145.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Sfandiarpour, A. and Mohammadnejad, H., 2011. Neyshabour turquoise mine: The first IOCG-U-REE. *Journal of Economic Geology*, 2(3): 193–216. (in Persian)
- Kimiaghalam, J. and Iranmanesh, M.H., 1974. Geophysical exploration report of Firouzeh mine of Neyshabour. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 58, 12 pp. (in Persian)
- Kolb, J. and Stensgaard, B.M., 2009. Iron oxide copper-gold mineralising systems in Greenland. *The Geological Survey of Denmark and Greenland, Copenhagen, Report 13*, 12 pp.
- Marschik, R. and Leveille, R.A., 1998. The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide copper-gold deposits, Chile. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, A: 371.
- Marschik, R., Leveille, R.A. and Martin, W., 2000. La Candelaria and the Punta del Cobre district, Chile, Early Cretaceous iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) mineralization. In: T.M. Porter (Editor), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits, A global perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp. 163–175.
- Mazlumi Bajestani, A., Karimpour, M.H., Rasa, I., Rahimi, B. and Vosoghi Abedini, M., 2009. Kuhe-Zar gold deposit of Torbat-e-Hydariyeh: new model of gold mineralization. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 16 (3): 364–376. (in Persian)
- Mohammadnejad, H., 2011. Geology, alteration, mineralization and geochemistry of Firouzeh mine of Neyshabour (Zak tunnel prospecting area). M.Sc. Thesis, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran, 123 pp. (in Persian)
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 109 pp. (in Persian)
- Oreskes, N. and Einaudi, M.T., 1990. Origin of rare earth element-enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, South Australia. *Economic Geology*, 85(1): 1–28.
- Oreskes, N. and Einaudi, M.T., 1992. Origin of hydrothermal fluids at Olympic Dam: Preliminary results from fluid inclusions and stable isotopes. *Economic Geology*, 87(1): 64–90.
- Pollard, P.J., 2001. Sodic (-calcic) alteration associated with Fe oxide Cu-Au deposits: An origin via unmixing of magmatic derived H₂O-CO₂-salt fluids. *Mineralium Deposita*, 36(1):

- 93–100.
- Pollard, P.J., 2006. An intrusion-related origin for Cu-Au mineralization in iron oxide-copper-gold (IOCG) provinces. *Mineralium Deposita*, 41(2): 179–187.
- Ramdohr, P., 1970. The ore minerals and their intergrowth. Pergamon Press, University of Michigan, Michigan, 1174 pp.
- Reeve, J.S., Cross, K.C., Smith, R.N. and Oreskes, N., 1990. Olympic Dam copper-uranium-gold-silver deposit. In: F.E. Hughes (Editor), *Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea*. Australian Institute of Mining and Metallurgy, Australia, pp. 1009–1035.
- Rieger, A.A., Marschik, R. and Díaz, M., 2012. The evolution of the hydrothermal IOCG system in the Mantoverde district, northern Chile: New evidence from microthermometry and stable isotope geochemistry. *Mineralium Deposita*, 47(4): 359–369.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Mineralogical Society of America*. Chantilly, USA, 644 pp.
- Sabzi, M.H., Semsarilar, A. and Ahmadian, A., 1984. Geochemical exploration proposal of radioactive material in Firouzeh mine of Neyshabour, block III and IV. Atomic energy organization of Iran, Tehran, Report 160, 28 pp. (in Persian)
- Sahandi, M.R., Soheily, M., Sadeghi, M., Delavar, T., Jafarirad, A.R., Allahmadadi, Sh. and Mohammadi Aragh, Sh., 2002. Geological map of Iran, 1:1,000,000. Geological Survey of Iran, Tehran. (in Persian)
- Sfandiarpour, A., 2011. Geology, alteration, mineralization and geochemistry of Firouzeh mine of Neyshabour (Ghardom prospecting area). M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 99 pp. (in Persian)
- Shabanian, E., Bellier, O., Siame, L., Arnaud, N., Abbassi, M.R. and Cochemé, J., 2009. New tectonic configuration in NE Iran: Active strike-slip faulting between the Kopeh Dagh and Binalud mountains. *Tectonics*, 28(5): 1–29.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. London, Blackie, 239 pp.
- Simard, M., Beaudoin, G., Bernard, J. and Hupe, A., 2006. Metallogeny of the Mont-de-l'Aigle IOCG deposit, Gaspé Peninsula, Québec, Canada. *Mineralium Deposita*, 41(6): 607–636.
- Spies, O., Lensch, G. and Mihm, A., 1983. Geochemistry of the post-ophiolitic Tertiary volcanics between Sabzevar and Quchan/NE Iran, Geodynamic project (geotraverse) in Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 51, 519 pp.
- Tadayon Slami, A., 1974. Geochemical exploration report of Firouzeh mine of Neyshabour. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 27, 18 pp. (in Persian)
- Ulrich, T., Gunther, D. and Heinrich, C.A., 2001. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*, 97(8): 1743–1774.
- Vidla, T., Lindsay, N. and Zamora, R., 1996. Geology of the Mantoverde copper deposit, northern Chile: A specularite-rich, hydrothermal- tectonic breccia related to the Atacama Fault Zone. In: F. Camus, R.H. Sillitoe and R. Petersen (Editors), *Andean copper deposits: New discoveries, mineralization styles and metallogeny*. Society of Economic Geology, Littleton, USA, pp. 157–169.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272.
- Williams, P.J., 2010. Classifying IOCG deposits. In: L. Corriveau and Mumin H. (Editors), *Exploring for iron-oxide copper gold deposits: Canada and global analogues*, Québec. Geological Association of Canada, Quebec, pp. 11–19.
- Zamora, R. and Castillo, B., 2001. Mineralización de Fe-Cu-Au en el distrito Mantoverde, Cordillera de la Costa, III Región de Atacama, Chile. Proc 2nd Congr Int de Prospectores y Exploradores, Inst de Ingenieros de Minas del Perú, Lima, Peru.
- Zarasvandi, A., Asadi, F., Pourkaseb, H., Ahmadnejad, F. and Zamanian, H., 2015. Hydrothermal Fluid evolution in the Dalli porphyry Cu-Au Deposit: Fluid Inclusion microthermometry studies. *Journal of Economic Geology*, 2(7): 277–306. (in Persian)

Zarei, A., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2016. Geochemistry and genesis of iron-apatite ore in Khanlogh

deposit, eastern Cenozoic Quchan-Sabzevar magmatic arc, NE Iran. *Acta Geologica Sinica*, 90(1): 121–137.



Alteration, mineralization, geochemistry and fluid inclusion study of the Firouzeh mine, NW Neyshabour

Alireza Ghiasvand¹, Mohammad Hassan Karimpour^{1&2*}, Azadeh Malekzadeh Shafaroudi^{1&2} and Mohammad Reza Haidarian Shahri¹

1) Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2) Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Submitted: Mar. 5, 2017

Accepted: Dec. 13, 2017

Keywords: Mineralization, Geochemical exploration, Fluid inclusions, IOCG, Neyshabour Firouzeh mine

Introduction

The Firouzeh mine is located in the Northwest of Neyshabour in the Khorasan Razavi province, Northeast of Iran, and eastern side of the Quchan-Sabzevar Cenozoic magmatic arc. Widespread magmatic activity in the Quchan-Sabzevar arc, is spatially and temporally associated with several types of mineralizations such as IOCG, Cu-Au porphyry and Kiruna types (Ghiasvand et al., 2016; Karimpour et al., 2011; Fatehi, 2014; Zarei et al., 2016). The aim of this investigation is to provide an understanding of the geology, alteration, mineralization, geochemistry, fluids evolution and genesis of the Firouzeh mine.

Materials and methods

Two hundred and fifty thin and polished sections were prepared for microscopic study. Twenty-nine samples were analyzed by X-ray fluorescence (XRF) method at the laboratory of Zar Azma company, Tehran, Iran. Twenty-one samples were analyzed by the X-ray Diffraction (XRD) method at the laboratory of Kansaran Binalood company, Tehran, Iran. Sixty samples were selected for 55-elemental analysis by composition of ICP-AES (Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy) and ICP-MS (Inductively coupled plasma Mass Spectrometry). Moreover, Sixty samples were selected for Au analysis by Aqua Regia Digestion at the SGS Laboratories, Canada. Six doubly polished sections of quartz mineralization were prepared for

microthermometric analysis. Homogenization and last ice-melting temperatures were measured using a Linkam THMSG 600 combined heating and freezing stage at the Ferdowsi University of Mashhad.

Result

The Firouzeh mine contains various Middle-Eocene subvolcanic rocks as dykes which have intruded into Paleocene-Eocene volcanic rocks. Important alterations consist of silicified, argillic and carbonate among which silicified is the most extensive. Primary minerals are magnetite, specularite, pyrite, chalcopyrite and bornite and secondary minerals are hematite, alunite, covellite, turquoise and limonite. Mineralization has occurred in the cracks and fractures at the surface and in tunnels, mainly as disseminated, stockwork, vein-veinlet and hydrothermal breccia. Geochemical explorations showed anomalies of copper (up to ppm 1074), gold (up to ppb 699), iron (up to over percent 30), cerium (up to ppm 464), lanthanum (up to ppm 227), uranium (up to ppm 243) and cobalt (up to over ppm 10000) that has many similarities with IOCG type deposits (Corriveau, 2007; Zamora and Castillo, 2001; Marschik et al., 2000). Fluid inclusions are relatively simple liquid+vapor types, with homogenization temperature from 147 to 278°C and average temperature of 203°C and Salinity containing 5.56 to 17.08 wt. percent NaCl equiv. which has resulted from fluids with KCl, CaCl₂,

*Corresponding authors Email: karimpur@um.ac.ir

MgCl₂ and NaCl compositions. Mixing process between hot and saline fluid with cold and low saline fluid and also, boiling process can caused deposition of elements.

Discussion

Firouzeh mineral deposit has magmatic-hydrothermal source and is related to tertiary magmatic activities of subduction of Neothetys Sabzevar oceanic crust beneath the Turan crust. Fluid mixing has played an important role for precipitation during mineralization and includes the source of hot and saline magmatic fluids with high contents of metallogenic elements and the mixing with cold and low saline meteoric waters resulting in the formation of deposit (Bastrakov et al., 2007; Simard et al., 2006; Wilkinson, 2001; Beane, 1983). Based on geological characteristics, alteration, mineralization, geochemistry, geophysics and fluid inclusion studies, Firouzeh mine is a great mineralization of iron oxide copper-gold-U-LREE which has similarities to the hematite-dominant section of Olympic Dam IOCG deposit.

Acknowledgments

The Research Foundation of the Ferdowsi University of Mashhad, Iran, supported this study (Project No. 3/18303). We would like to thank the Iranian mineral processing research center and laboratories of Zar Azma, Kansaran Binalood, ACME and SGS. We also thank rural cooperation of Firouzeh mine for its liaison in field survey.

References

- Bastrakov, E.N., Skirrow, R.G. and Davidson, G.J., 2007. Fluid evolution and origins of Iron Oxide Cu-Au prospects in the Olympic Dam district, Gawler craton, South Australia. *Economic Geology*, 102(8): 1415–1440.
- Beane, R.E., 1983. The Magmatic-Meteoric Transition. Geothermal Resources Council, California, Report 13, 253 pp.
- Corriveau, L., 2007. Iron oxide copper gold deposits: A Canadian perspective. In: W. Goodfellow (Editor), *Mineral deposit of Canada: A synthesis of major deposit- types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Geological Association of Canada Mineral deposits Division, Vancouver, pp. 307–328.
- Fatehi, H., 2014. Geology, mineralization and geochemistry of Jalambadan deposit, NW Sabzevar. M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 240 pp. (in Persian)
- Ghiasvand, A., Karimpour, M.H., Heidarian Shahri, M.R. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2016. Mineralization and ground magnetic survey for mineralization prospecting and identify of intrusive bodies in the Neyshabour Firouzeh mine, Khorasan Razavi province. *Journal of Advanced Applied Geology*, 20(6): 86–103. (in Persian)
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Sfandiarpour, A. and Mohammadnejad, H., 2011. Neyshabour turquoise mine: The first IOCG-U-REE. *Journal of Economic Geology*, 2(3): 193–216. (in Persian)
- Marschik, R., Leveille, R.A. and Martin, W., 2000. La Candelaria and the Punta del Cobre district, Chile, Early Cretaceous iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) mineralization. In: T.M. Porter (Editor), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits, A global perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp. 163–175.
- Simard, M., Beaudoin, G., Bernard, J. and Hupe, A., 2006. Metallogeny of the Mont-de-l’Aigle IOCG deposit, Gaspé Peninsula, Québec, Canada. *Mineralium Deposita*, 41(6): 607–636.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272.
- Zamora, R. and Castillo, B., 2001. Mineralizacio’n de Fe-Cu-Au en el distrito Mantoverde, Cordillera de la Costa, III Regio’n de Atacama, Chile. *Proc 2nd Congr Int de Prospectores y Exploradores, Inst de Ingenieros de Minas del Peru’*, Lima, Peru.
- Zarei, A., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2016. Geochemistry and genesis of iron-apatite ore in Khanlogh deposit, eastern Cenozoic Quchan-Sabzevar magmatic arc, NE Iran. *Acta Geologica Sinica*, 90(1): 121–137.