



## کانی‌شناسی و نحوه پیدایش فیروزه در کانسار مس پورفیری علی‌آباد

سعیده جدیدی اردکانی<sup>۱</sup>، محمدعلی مکی‌زاده<sup>۱\*</sup> و فریماه آیتی<sup>۲</sup>

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۹، پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶

### چکیده

در کانسار مس پورفیری علی‌آباد واقع در شمال‌غرب باتولیت گرانیتی شیرکوه یزد، ماسه‌سنگ‌های آرکوزی و کنگلومراهای کرتاسه زیرین، تحت تأثیر نفوذ توده لوکوگرانیتی (بعد از کرتاسه)، متحمل دگرسانی‌های گرمابی اغلب فلیک و کانی‌سازی مس پورفیری در توده نفوذی همراه شده‌اند. تنها در یک نقطه کانی‌سازی اسکارن بدون مس نیز شکل گرفته است. کانی‌های پهنه دگرسانی فلیک با همبندی زیر مشخص هستند:

Sericite + quartz + pyrite + alunite + turquoise + goethite + jarucite

فیروزه به شکل‌های رگچه‌ای، گرهک‌های کم‌ویش مدور تا بی‌شکل و پوششی در رنگ‌های آبی، سبز و آبی متمایل به سفید در آرکوزهای دگرسان مشاهده می‌شود. هم‌پوشانی هوازدگی جوی بر پهنه فلیک، سبب اکسیداسیون پیریت و کالکوپیریت و شکل‌گیری سیال اسیدی شده که فروشت Al، Cu و P را از سنگ میزبان شکل داده است. عملکرد این سیال بر سنگ میزبان ضمن مراحل چندگانه سبب رخداد فیروزه شده است. خاستگاه و رخداد فیروزه ناشی از دگرسانی کانی‌های سنگ میزبان فلیک-آرژلیک (کائولینیت) است. همچنین همیافتی نزدیک آلونیت با فیروزه در برخی موارد، خاستگاه آن را به خرج آلونیت (فسفاتی شدن) نیز ممکن می‌سازد.

**واژه‌های کلیدی:** فیروزه، آلونیت، مس پورفیری، علی‌آباد، ایران مرکزی

### مقدمه

Taggart, 1998 and). کلسیم (Ca<sup>2+</sup>) و روی (Zn<sup>2+</sup>) در جایگاه A و همچنین سیلیس (Si<sup>3+</sup>) در جایگاه B می‌توانند برای برخی از اعضای کمیاب پیدا شوند.

فیروزه که اغلب مخفی بلور بوده و تشکیل آگرگات‌های آبی تا آبی-سبز می‌دهد، یک کانی ثانویه است که در رگه‌های موجود در ولکانیک‌های دگرسان‌شده، رخ می‌دهد (Wenk and Bulakh, 2004). این کانی از جمله کانی‌های عمومی پهنه اکسیدی کانسارهای مس پورفیری شناخته شده است (John et al., 2010). مشهورترین معدن فیروزه ایران که جهانی نیز

فیروزه یک کانی فسفات با فرمول شیمیایی  $CuAl_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$  است. این کانی یکی از شش عضو گروه فیروزه است (Hull et al., 2008). فرمول عمومی این گروه به شرح زیر است:

$A_{0-1}B_6(PO_4)_{4-X}(PO_3OH)_X(OH)_8 \cdot 4H_2O$   
 مس (Cu<sup>2+</sup>) و آهن فرو (Fe<sup>2+</sup>) عادی‌ترین جانشین در جایگاه A و آلومینیم (Al<sup>3+</sup>) و آهن فریک (Fe<sup>3+</sup>) نیز عادی‌ترین جانشین جایگاه B هستند. برای فیروزه X=0 است (Foord)

Amidi, 1983)، کهن‌ترین واحد زمین‌شناسی منطقه را واحدی تیره‌رنگ با تناوبی از شیل، ماسه‌سنگ‌ها، کوارتزیت و سنگ‌آهک موسوم به سازند نایبند (تریاس) تشکیل می‌دهد. این واحد بعد از ژوراسیک زیرین متأثر از جای‌گیری باتولیت گرانیت-گرانودیوریتی شیرکوه اندکی دگرگون‌شده است. نبوی (Nabavi, 1972)، سن این گرانیت را در نقشه یزد، ژوراسیک در نظر گرفته و نفوذ گرانیت را سبب دگرگونی سنگ‌های رسوبی ژوراسیک زیرین دانسته است. فورستر (Forster, 1978) با استفاده از روش Rb-Sr بر روی چهار نمونه گرانیت شیرکوه، سن آن را  $10 \pm 175$  میلیون سال تعیین کرده است. بعد از سپری شدن یک فاصله زمانی، رسوبات کرتاسه زیرین شامل ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراهای ارغوانی‌رنگ (سازند سنگستان) و سنگ‌آهک به صورت دگرشیب بر روی پی‌سنگ باتولیت شیرکوه و رسوبات دگرگون‌شده هاله آن قرار می‌گیرند (شکل ۱-۱-B).

مشارکت گسترده خرده‌های گرانیت-گرانودیوریت شیرکوه در ماسه‌سنگ‌های سازند سنگستان به شکل‌گیری ماسه‌سنگ‌های آراکوزی خاکستری تا ارغوانی‌رنگ به صورت میان‌لایه در این سازند منجر شده است. نفوذی‌های لوکو گرانیتی منسوب به ماگماتیسیم باتولیت شیرکوه (Sabzei et al., 1986) که در این منطقه دیده می‌شود، سازند سنگستان را تحت تأثیر قراردادده است. این تأثیر بیشتر با رخداد دگرسانی به‌طور فراگیر همراه است. در ادامه رسوب‌گذاری دریای کرتاسه، سنگ‌های آهکی خاکستری‌رنگ حاوی میکروفسیل اربیتولینا (کرتاسه زیرین) تشکیل شده‌اند. این واحد به سازند تفت مشهور است. در نهایت دایک‌ها، آپوفیزهای کوچک داسیتی تا آندزیتی کم‌وبیش دگرسان متعلق به نئوژن، سازند تفت و سنگستان را قطع کرده‌اند (شکل‌های ۱ و ۲). زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2005) با استفاده از روش پتاسیم-آرگون، سن مطلق ۳۰ میلیون سال را برای گرانیت‌ها و سن بخش‌های جوان‌تر کوارتز موزونیت-گرانودیوریت را  $4/6 \pm 14$  میلیون سال تعیین کرده‌اند. توده‌های نفوذی منطقه در مناطقی که سازندهای ژوراسیک را قطع کرده‌اند، ایجاد متاسدیمنت تا هورنفلس کرده

هست، در نیشابور واقع شده است. این معدن قدیمی‌ترین معدن فیروزه دنیاست که در شمال غرب نیشابور و بخش غربی زون ساختاری بینالود و بخش شرقی کمان ماگمایی سنوزوئیک سبزواری-قوچان واقع شده است (Ghiasvand et al., 2018). سایر معادن فیروزه ایران عبارتند از: معدن طلا-مس-فیروزه کوه‌زر دامغان (باغو) و معدن مس پورفیری میدوک (شهر بابک).

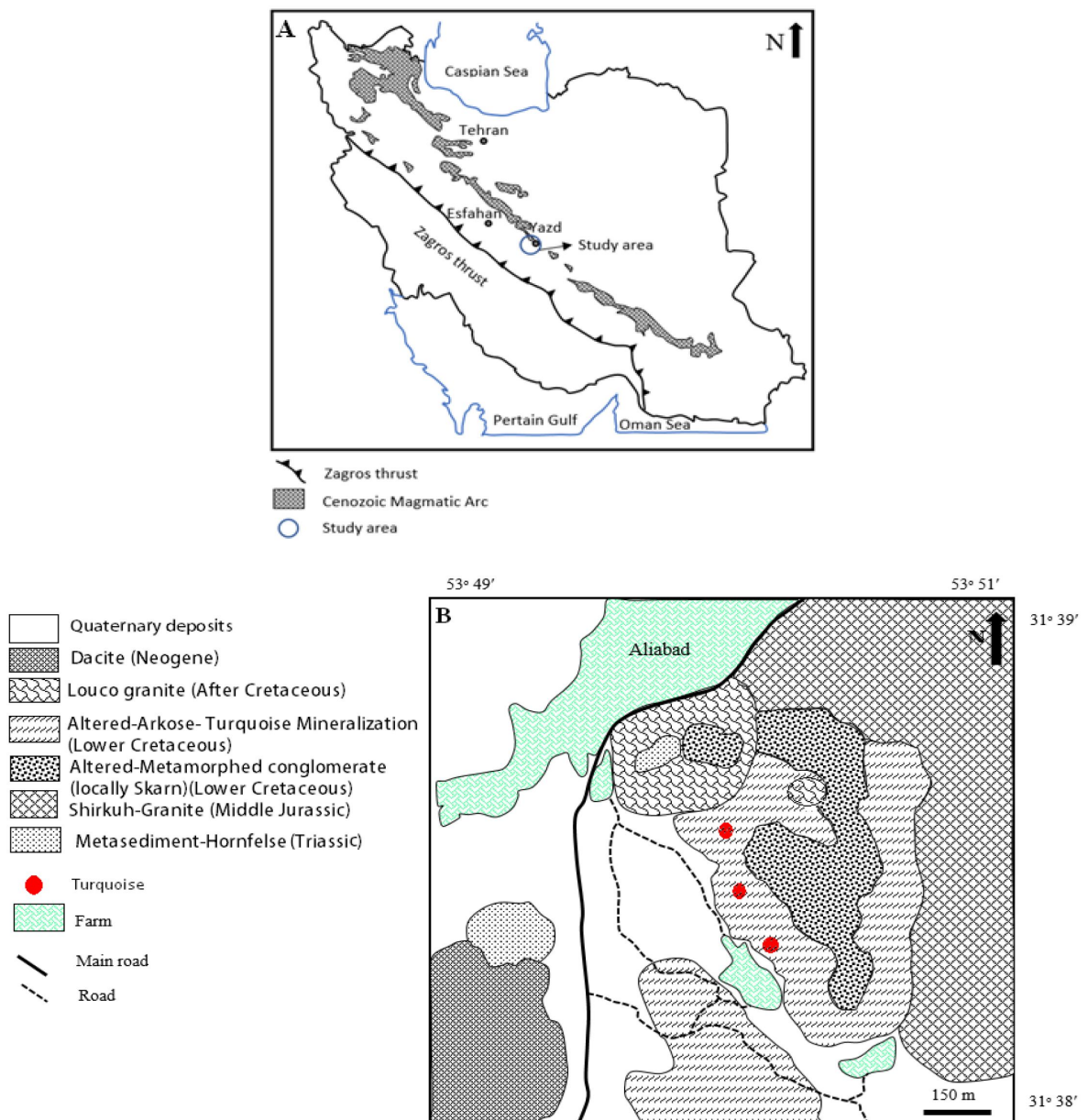
بر اساس نتایج پژوهشگرانی از جمله اسلامی‌زاده (Eslamizadeh, 2004)، زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2005) و رضائیان و همکاران (Rezaian et al., 2003)، معدن علی‌آباد-دره‌زرشک به‌عنوان یک سامانه مس پورفیری معرفی شده است. نخستین گزارش منتشرشده در مورد رخداد فیروزه در اطراف علی‌آباد تفت توسط مؤمن‌زاده و همکاران (Momenzadeh et al., 1988) ارائه شده است. نخستین بار رضائیان و مکی‌زاده (Rezaian and Mackizadeh, 1997) به پژوهش مقدماتی زمین‌شناسی منطقه، توصیف و پیشنهاد فرایندهای مؤثر در شکل‌گیری فیروزه پرداخته‌اند. در ادامه رضائیان و همکاران (Rezaian et al., 2003) به خاستگاه فیروزه با مستندات کانی‌شناسی پرداخته‌اند. مکی‌زاده (Mackizadeh, 2008) در پایان‌نامه دکتری خود به رخداد دگرسانی گرمایی-دگرگونی مجاورتی و ارتباط آن با فیروزه‌زایی با تأکید بر اسکارن‌زایی در منطقه علی‌آباد اشاره کرده است. این پژوهش با استفاده از آخرین داده‌های کانی‌شناسی و بررسی محیط‌های ژئوشیمیایی هوازدگی، تلاش می‌کند، واکنش‌های شکل‌گیری و خاستگاه این کانی را بازسازی و بررسی کند.

### زمین‌شناسی منطقه علی‌آباد

منطقه مورد بررسی در ۳۵ کیلومتری جنوب غرب تفت و ۵۷ کیلومتری جنوب غرب یزد، در حاشیه شرقی کمان ماگماتیسیم سنوزوئیک ایران مرکزی (شکل ۱-۱) و در گوشه شمال غرب باتولیت گرانیتی شیرکوه واقع شده است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی خضرآباد و آباد (Haj Molla Ali, 1993)؛

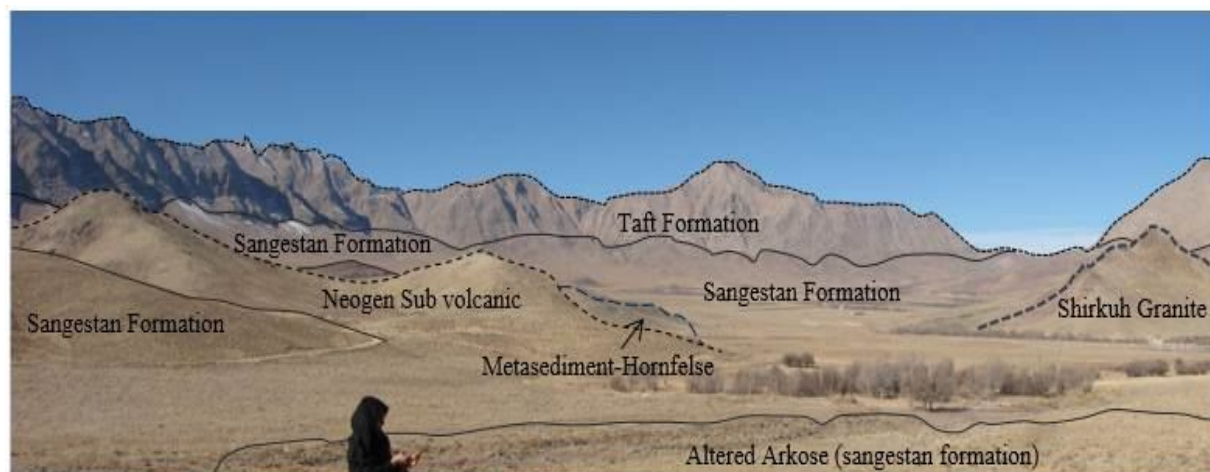
است. این دگرسانی‌ها اغلب شامل سرپستی، آرژلیک پیشرفته، کائولینیتی و سیلیسی بوده است. مجموعه دگرسانی‌ها نشان‌دهنده وجود سامانه مس پورفیری در علی‌آباد است (Rezaian et al., 2003; Zarazvandi et al., 2005).

و در مناطقی که آرکوزهای متخلخل کرتاسه زیرین را قطع کرده‌اند، علاوه بر هورنفلس، دگرسانی گرمابی با شدت زیاد نیز ایجاد کرده‌اند. دگرسانی‌های به‌وقوع پیوسته علاوه بر رخداد در این توده‌های نفوذی (نئوژن)، در سنگ میزبان ماسه‌سنگ‌های آرکوزی و میکروکنگلو‌مراهای سازند سنگستان نیز رخ داده



شکل ۱. A: موقعیت کمان ماگمایی ارومیه دختر در ایران (با تغییرات از زراسوندی و همکاران (Zarazvandi et al., 2005)) و جایگاه منطقه علی‌آباد در ارتباط با این کمان و B: نقشه زمین‌شناسی علی‌آباد

**Fig. 1.** A: The position of Urumieh-Dokhtar magmatic belt in Iran (after Zarazvandi et al., 2005) and the location of Ali Abad area in relation to this magmatic belt, and B: Geologic map of Ali Abad



شکل ۲. نمای کلی واحدهای زمین‌شناسی منطقه علی‌آباد  
**Fig. 2.** Overview of the geological units of the Ali-Abad area

فیروزه در زمینه سنگ دگرسان (زون دگرسانی فلیک) به وضوح قابل مشاهده است. هندسه متقاطع رگچه‌ها که از اکسید آهن تشکیل شده‌اند، زون استوک‌ورک کانی‌سازی در سامانه‌های مس پورفیری را تداعی می‌کند.

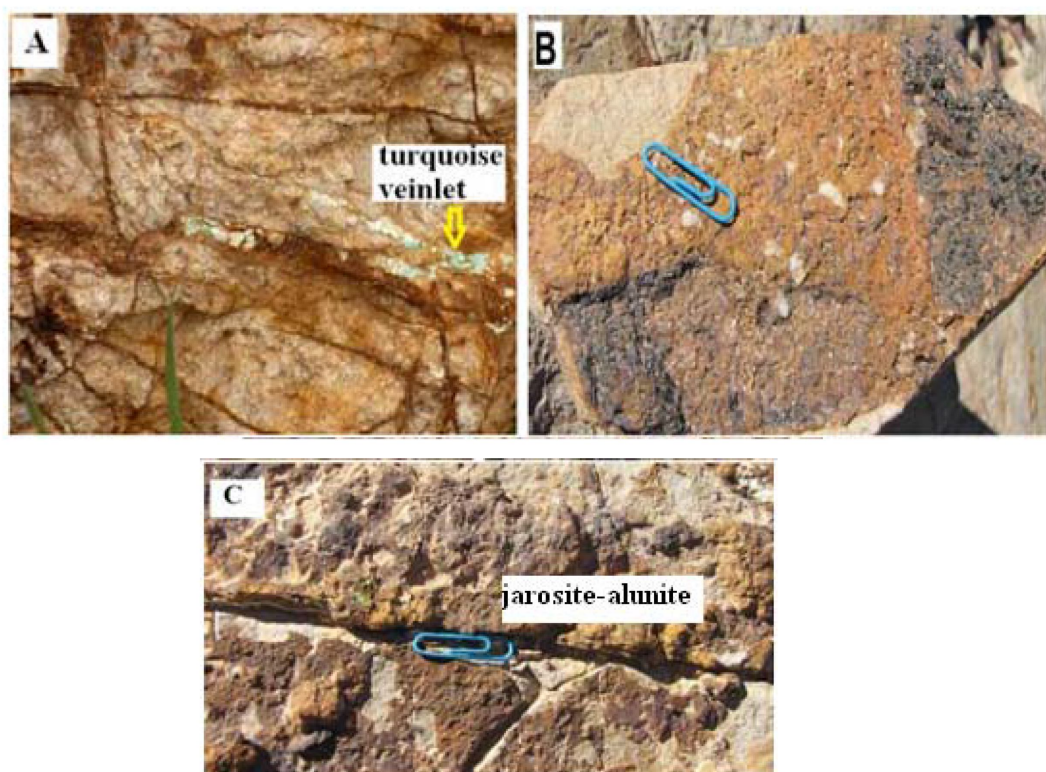
### روش مطالعه

در این پژوهش بعد از انجام بررسی‌های صحرائی و نمونه‌برداری، نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۵۰۰۰ تهیه شد. از مجموع ۵۵ نمونه صحرائی برداشت شده، تعداد ۳۵ نمونه از توده‌های نفوذی، ماسه‌سنگ‌ها و سنگ‌های دگرسان شده برای تهیه مقاطع نازک و صیقلی انتخاب شد. بررسی‌های پتروگرافی و مینرالوگرافی توسط میکروسکوپ پلاریزان مدل BH2 (نور عبوری و انعکاسی) انجام شد. پس از جدایش کانی فیروزه، برای تأیید بررسی‌های کانی‌شناسی و شناسایی ترکیب شیمیایی فازها از دیفراکتومتری پرتو ایکس (۴۱ نمونه انجام شده در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان-مدل D8 Advance، بروکر) و تجزیه‌های نقطه‌ای<sup>۲</sup> (۱۰ نقطه انجام شده در دانشگاه اکلاهامای امریکا) کمک گرفته شد.

شواهد صحرائی، رخداد فیروزه را به شکل رگچه‌ای، دانه‌ها و گرهک‌های کم‌ویش مدور تا بی‌شکل و پوششی در رنگ‌های آبی، آبی-سبز و آبی متمایل به سفید نشان می‌دهد. سنگ میزبان اصلی، ماسه‌سنگ‌های آرسوزی و کنگلومراهای سازند سنگستان است (شکل ۳-A). در همراهی با فیروزه، ژاروسیت قهوه‌ای تا خنایی‌رنگ (شکل ۳-B)، آلونیت سفیدرنگ (شکل ۳-C)، کوارتز و اکسیدهای آهن یافت می‌شود. رخداد ژاروسیت-آلونیت به‌طور مستقل در شکستگی‌ها و به صورت پوششی<sup>۱</sup>، دور از مناطق کانی‌سازی فیروزه امری عادی است. حضور اکسیدهای آهن و پیریت‌های مکعبی کاملاً تجزیه شده به گوتیت به همراه کوارتز، نشان‌دهنده حضور کلاهیک آهنی (گوسان) در منطقه است. در زون‌های گوسانی که نشان‌دهنده وجود زون اکسیدان است، پیریت‌های درشتی دیده می‌شوند که یا به‌طور کامل اکسید شده‌اند (شکل دروغین گوتیت) و یا اینکه در مرکز گوتیت‌ها، بازمانده پیریت دیده می‌شود. کوارتز، مالاکیت و آزوریت از دیگر کانی‌های رخنمون گوسان‌ها در منطقه هستند. در حقیقت رخداد مس در مشاهدات صحرائی فقط به صورت مالاکیت و آزوریت در منطقه مشخص است. رخداد رگچه‌های تشکیل شده از گوتیت و گرهک‌های منفرد تا به هم پیوسته

1. Coating

2. EDS



شکل ۳. A: رگچه فیروزه در زمینه آרקوز دگرسان‌شده و شبکه‌ای از رگچه‌های متقاطع گوتیتی (زون استوک‌ورک) در منطقه علی‌آباد، B: رخداد ژاروسیت، گوتیت و کوارتز در منطقه علی‌آباد و C: رخداد آلونیت و ژاروسیت در همراهی گسترده با گوتیت در منطقه علی‌آباد

**Fig. 3.** A: Turquoise veinlet in the field of altered arkose associated with crossover veins of goethite (stockwork zone) in Ali-abad area, B: jarosite, goethite and quartz occurrence in Ali abad area, and C: occurrence of alunite and jarosite in extensive companion with goethite in Ali abad area

### پتروگرافی و مینرالوگرافی

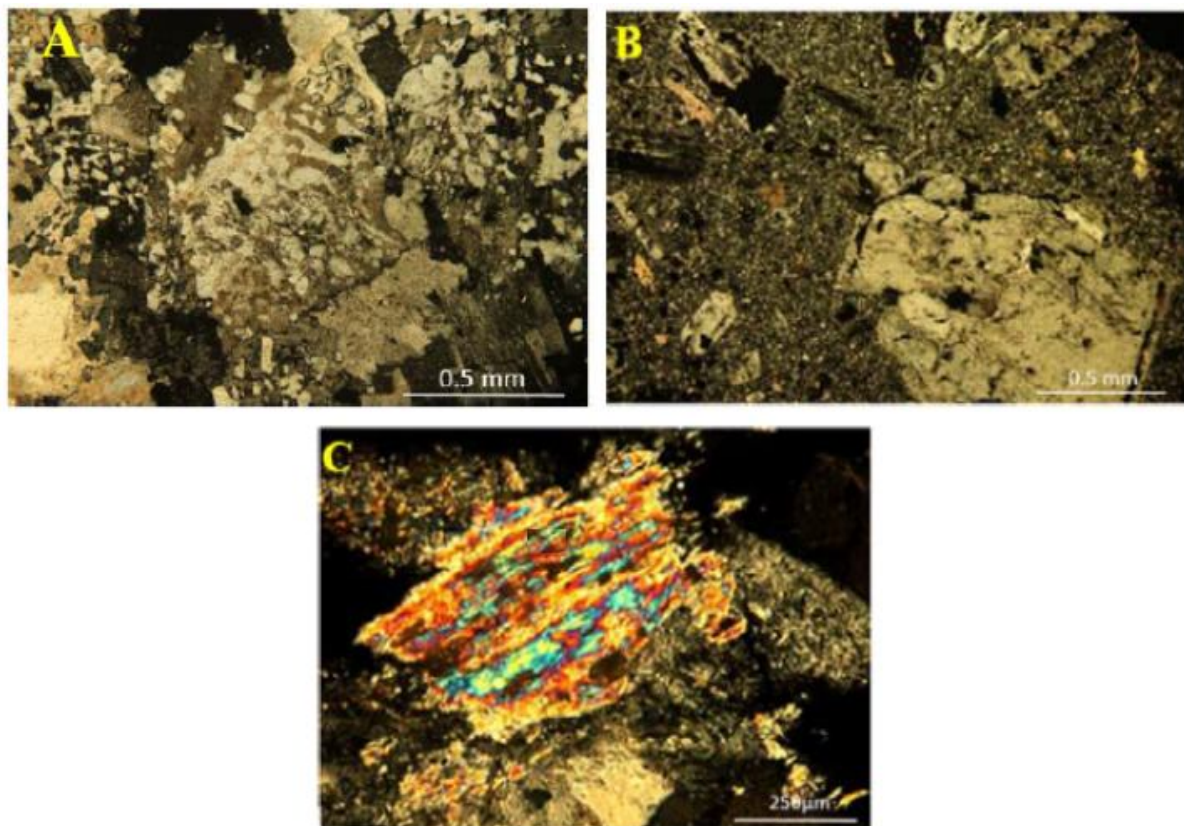
توده‌های نفوذی نئوژن در منطقه مورد بررسی به روشنی دو سازند عمده منطقه یعنی ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌های تریاس-ژوراسیک و کنگلومراها-ماسه‌سنگ‌های سازند سنگستان) را قطع کرده‌اند و باعث رخداد دگرسانی‌های گرمابی در این واحدها (به‌خصوص سازند سنگستان) شده‌اند. توده‌های نفوذی مورد بررسی با ترکیب گرانیت تا گرانودیوریت، اغلب لوکوکرات و دارای دگرسانی و شکستگی فراوان در منطقه به چشم می‌خورند. در مشاهدات میکروسکوپی با مجموعه کانایی کوارتز، پلاژیوکلاز و ارتوکلاز، بیوتیت، آمفیبول به میزان کمتر به همراه مسکویت (سریسیت‌های ثانویه) مشخص

است. در بخش‌های مافیک‌تر، کلینوپیروکسن نیز مشاهده می‌شود. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت، اسفن، زیرکن و کانی‌های اوپیک است. بافت‌های گرانولر دانه‌ریز، میکروگرافیک (شکل ۴-A) پورفیروئید و برشی در آن عادی است. همچنین وفور آلینت با ماکل شطرنجی<sup>۱</sup> از ویژگی‌های بافتی این سنگ‌هاست. به‌طور کلی هم‌رشدی گرانوفیری تا میکروگرافیک کوارتز و آلکالی‌فلدسپار، بافت پورفیروئید، طبیعت نیمه‌عمیق<sup>۲</sup> توده نفوذی مورد بررسی را نشان می‌دهد. دگرسانی‌های مشاهده‌شده در منطقه اغلب شامل فلیک، پروپیلیتیک، آرژیلیک پیشرفته و است (Mackizadeh, Moore et al., 2008). بر اساس پژوهش مر و همکاران (

1. chessboard  
2. sub volcanic

همراه با بیوتیت در زمینه دانه‌ریز اغلب فلیسک شناورند و نمودی از بیوتیتی شدن یا متاسوماتیسم پتاسیم است. پلاژیوکلازها کم‌وبیش دچار دگرسانی از نوع کائولینیتی شدن-سرسیستی شدن ضعیف شده‌اند. علاوه بر این، بیوتیت‌های درشت با حفظ قالب (سوئیدومرف) به‌طور بخشی توسط مسکویت جانشین شده‌اند. (شکل ۴-۲). در مرز توده نفوذی مورد بررسی با سنگ میزبان کنگلومرایبی، همراهی گارنت، کلسیت، کوارتز، اپیدوت و پیریت (همیافت اسکارنی) مشاهده می‌شود که این رخداد بیشتر به شکل محلی و در بخش قلوه‌سنگ‌های آهکی کنگلومراها بوده و در ماسه‌سنگ‌ها مشاهده نمی‌شود.

Taghipour and (2011) و تقی‌پور و مکی‌زاده (Mackizadeh, 2011)، زون فلیک با رنگ سفید تا کرمی بیشترین بخش دگرسانی منطقه را به‌خود اختصاص داده است. زون آرژیلیک با حضور کائولینیت و سایر کانی‌های رسی با گسترش کمتر در منطقه مشخص می‌شود. زون آرژیلیک پیشرفته با حضور کانی‌های آلونیت-ژاروسیت و با حضور فیروزه، درون زون فلیک پراکنده است. فیروزه به‌صورت رگچه‌ای و قلوه‌ای همراه با آلونیت، ژاروسیت و کوارتز مشاهده می‌شود. توده‌های کوچک سابلوکائیک منطقه با بافت پورفیری (شکل ۴-۲) نیز تا حدودی متحمل دگرسانی شده است. در این مجموعه سنگ‌ها، فنوکریست‌های پلاژیوکلاز

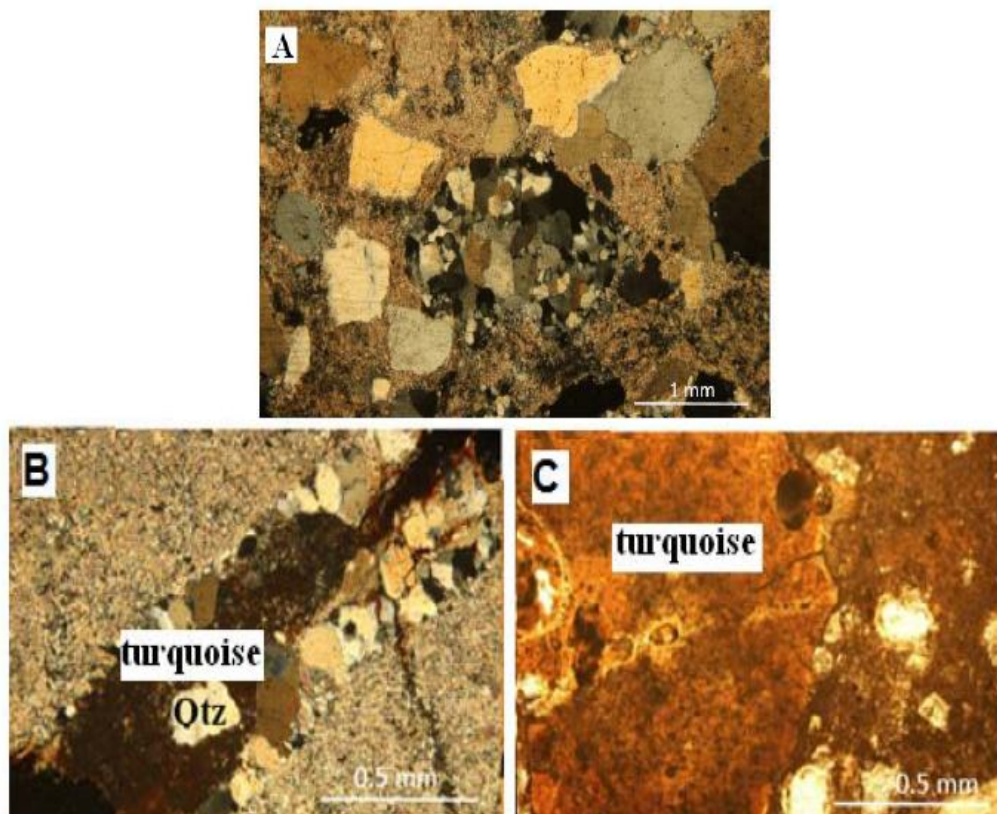


شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی کانی‌های موجود در آذرین‌های منطقه علی‌آباد در نور XPL، A: بافت میکروگرافیک، هم‌رشدی کوارتز و آلکالی‌فلدسپار، B: بافت پورفیری، فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و بیوتیت در زمینه دانه‌ریز کوارتز و فلدسپار و کانی‌های اوپک و C: جانشینی کامل بیوتیت توسط مسکویت

**Fig. 4.** Microphotographs of minerals in Ali-abad igneous rocks (XPL), A: micrographic texture, intergrowth of quartz and alkali-feldspar, B: porphyry texture, plagioclase and biotite phenocrysts in quartz and feldspar matrix associated with opaque, and C: Complete substitution of biotite by muscovite

در رخداد صحرایی توسعه دگرسانی در ماسه‌سنگ‌های آركوزی سازند سنگستان با تغییر رنگ از زرشکی به کرمی تا سفید مشخص است. در برخی موارد میکروکنگلومرایی که به صورت بین انگشتی با ماسه‌سنگ‌ها قرار گرفته‌اند، نیز دستخوش دگرسانی شده‌اند. در توصیف میکروسکوپی، این ماسه‌سنگ‌ها اغلب از قطعات تخریبی گرانیت شیرکوه و کمتر پی سنگ تخریبی (شیل، ماسه‌سنگ تریاس-ژوراسیک) تشکیل شده‌اند. عمده‌ترین نمود دگرسانی میکروسکوپی، جانشینی کامل تا بخشی فلدسپارها توسط سریسیت است که به همراه خرده‌های تخریبی کوارتز مصون از دگرسانی در مقاطع قابل مشاهده هستند (شکل ۵-A). علاوه بر این، نمود

سیلیسی شدن همراه با سریسیتی شدن با رگچه‌های کوارتز دانه‌ریز تا دانه‌های پراکنده کوارتز جانشینی در زمینه ماسه‌سنگ نیز به چشم می‌خورد. کلریت و اپیدوت نیز به عنوان کانی‌های ثانویه هم به شکل مستقل و هم جانشینی کانی‌های مافیک اولیه (پیریت) تشکیل شده است. در زمینه ماسه‌سنگ آركوزی دانه‌ریز سریسیتی شده، رگچه‌هایی متشکل از کوارتز، گوتیت و فیروزه نیز مشاهده می‌شود (شکل ۵-B). در شکل ۵-C، رخداد گرھکی کانی فیروزه مشاهده می‌شود که توسط گوتیت کاملاً احاطه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، فیروزه در نور پلاریزه عبوری بسیار دانه‌ریز تا نهان بلورین است و با رنگ تداخلی ضعیف و انبوه فشرده بلورهای ریز مشخص است.

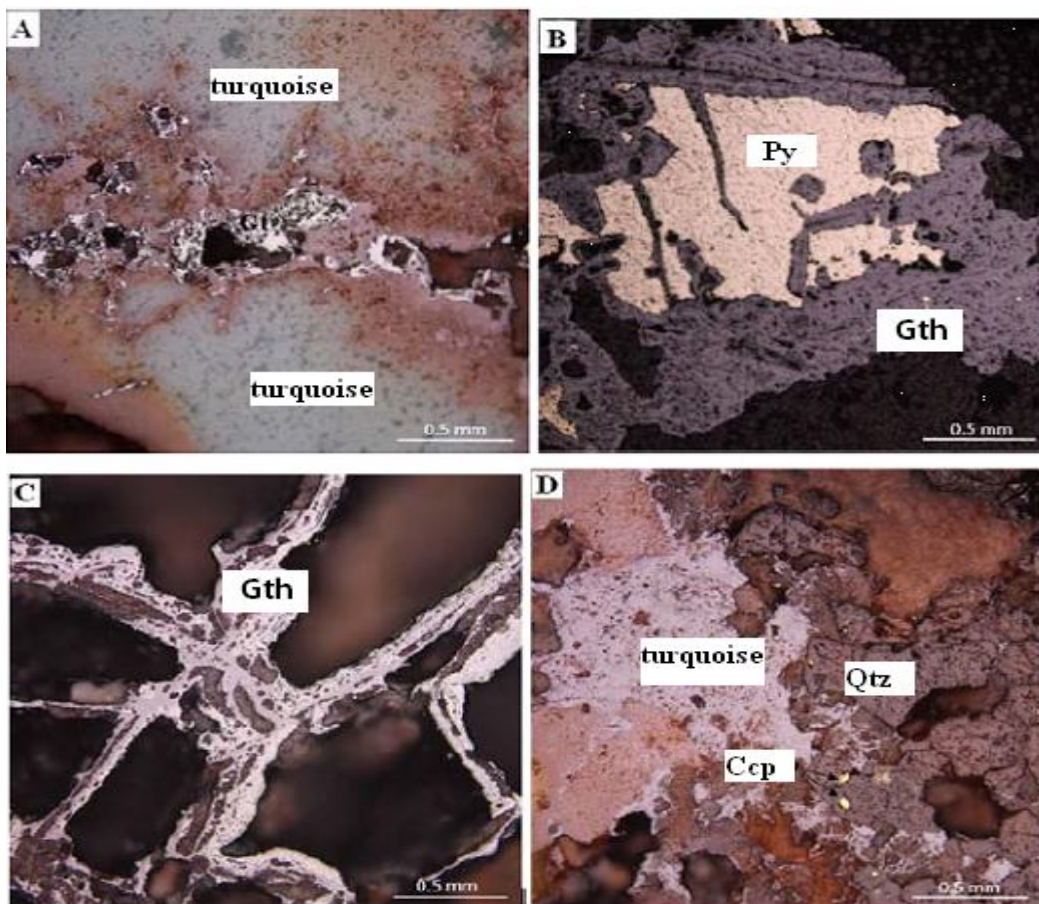


شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی کانی‌های مشاهده شده در ماسه‌سنگ‌های منطقه علی‌آباد در نور XPL، A: ماسه‌سنگ آركوزی دگرسان. یک قطعه تخریبی بزرگ از کوارتزیت با بافت پلی‌گونال در مرکز تصویر مشاهده می‌شود، B: رگچه کوارتز، گوتیت و فیروزه و C: رخداد گرھکی فیروزه در آركوزهای علی‌آباد. علامت اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qtz: کوارتز).

**Fig. 5.** Microphotographs of minerals in Ali-abad sandstone (XPL), A: Altered arkosic sandstone. A large fragment of quartzite with a polygonal texture is observed in the center of image, B: quartz, goethite and turquoise veinlet, and C: Turquoise nodules occurrence in Ali-abad arkose. Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (Qtz: Quartz).

توسط گوتیت است. از بافت‌های مشاهده شده در بخش توده‌ای و گوسانی منطقه، بافت جعبه‌ای<sup>۲</sup> گوتیت است. همچنین بافت ضعیف کلوفرم در تجمعات تیغه‌مانند گوتیت قابل مشاهده است. دانه‌های ریز و پراکنده کالکوپیریت به مقدار بسیار کم درون کوارتز مشاهده می‌شود و همیافتی نزدیکی با گوتیت و فیروزه نشان می‌دهد (شکل ۶- A، B، C و D).

در مقاطع صیقلی، فیروزه با زونینگ ضعیفی مشخص است که احتمالاً ناشی از تراوش یا رنگ آمیزی محلی اکسیدهای آهن یا آغستگی از گوتیت‌های مجاور به شکل رنگ‌دانه<sup>۱</sup> گوتیت در مقاطع مشاهده شده همیافتی بسیار نزدیکی با فیروزه نشان می‌دهد. بازمانده پیریت که توسط گوتیت احاطه شده است، در مقاطع به چشم می‌خورد. خورده شدگی یا تحلیل رفتن پیریت، ویژگی اکسیداسیون تدریجی این کانی تا جانشینی نهایی آن



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی از انواع کانه‌های موجود در منطقه علی‌آباد در نور XPL، A: همیافتی گوتیت (بازمانده اکسیداسیون پیریت) و فیروزه، B: بازمانده پیریت درون گوتیت، C: بافت جعبه‌ای در گوتیت (گوتیت‌ها بافت نواری و کلوفرم نیز نشان می‌دهند) و D: رخداد دانه‌های ریز و گرد شده کالکوپیریت به شکل ادخال درون کوارتز و همیافتی نزدیک آن با فیروزه و گوتیت در آرکوزهای علی‌آباد. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Gth: گوتیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Qtz: کوارتز).

**Fig. 6.** Microphotographs of ore minerals in Ali-abad (XPL), A: association of goethite (relict of oxidized pyrite) and turquoise, B: relict of pyrite as inclusions in goethite, C: Box work texture of goethite as well as banded and colloform textures, and D: The occurrence of finely grains of chalcopyrite as inclusion within quartz and its close proximity to turquoise and quartz in Ali-abad arkose. Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (Gth: Goethite, Py: Pyrite, Ccp: Chalcopyrite, Qtz: Quartz).

1. pigment
2. box work



**ژئوشیمی**

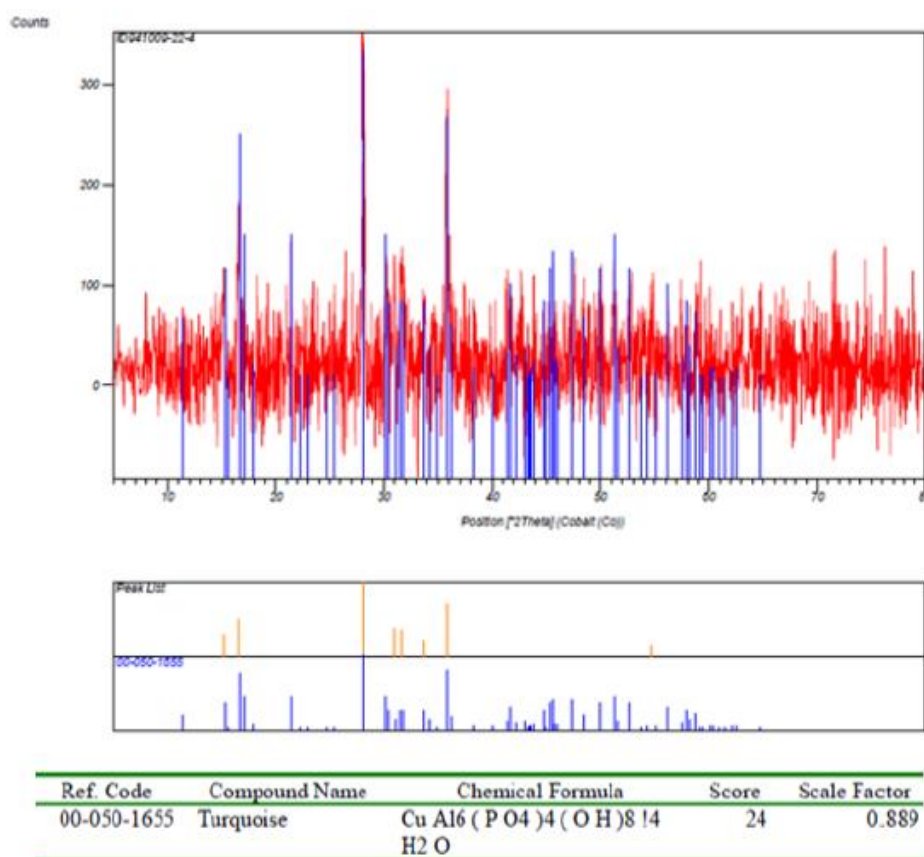
برای تأیید مشاهدات نمونه دستی و میکروسکوپی، از تجزیه نقطه‌ای و دیفراکتومتری پرتو ایکس استفاده شد (شکل‌های ۷ و ۸ و جدول ۱). تجزیه‌های یادشده حضور فاز فیروزه را به اثبات می‌رسانند. همان‌گونه که بیان شد، سنگ میزبان دگرسانی‌های گرمابی و فیروزه در منطقه علی‌آباد، ماسه‌سنگ‌های آרקوزی سازند سنگستان هستند. این ماسه‌سنگ‌های دگرسان‌شده با همبندی کانی‌شناسی زیر متمایز هستند:

فلدسپار + کوارتز + سریسیت + اکسیدهای آهن + کائولینیت ( $\pm$  پیریت، کالکوپیریت).

این همبندی بر اساس کوک و همکاران (Cooke et al., 2005) شاخص دگرسانی فلیک (کوارتز - سریسیت  $\pm$  پیریت)

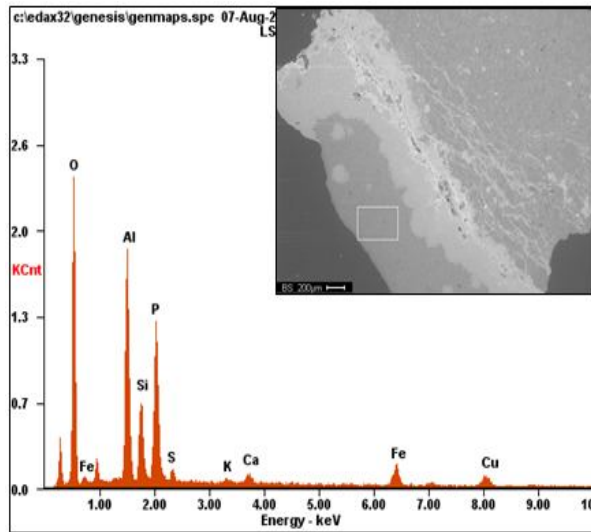
است. در بعضی از آنالیزهای نقطه‌ای انجام‌شده بر روی فاز کانیاپی فیروزه، وجود پتاسیم و سیلیسیم احتمالاً نشان‌دهنده مرحله انتقالی تبدیل سریسیت و یا آلونیت به‌عنوان پیش‌زمینه<sup>۱</sup> به فیروزه است (شکل ۸).

ژاروسیت دارای محلول جامد با آلونیت است. حضور آنومالی آلومینیم به مقدار کم نشان‌دهنده وجود سازه آلومینیم در ژاروسیت است. آنومالی ژاروسیت غالب است؛ ولی حضور آلومینیم می‌تواند نشان از حضور محلول جامد آلونیت - ژاروسیت باشد و از طرفی حضور پتاسیم با آلومینیم و سیلیسیم می‌تواند نشان‌دهنده ناخالصی‌های سریسیت از سنگ میزبان درون ژاروسیت باشد (شکل ۹).



شکل ۷. تأیید حضور فاز فیروزه در منطقه علی‌آباد توسط تجزیه XRD

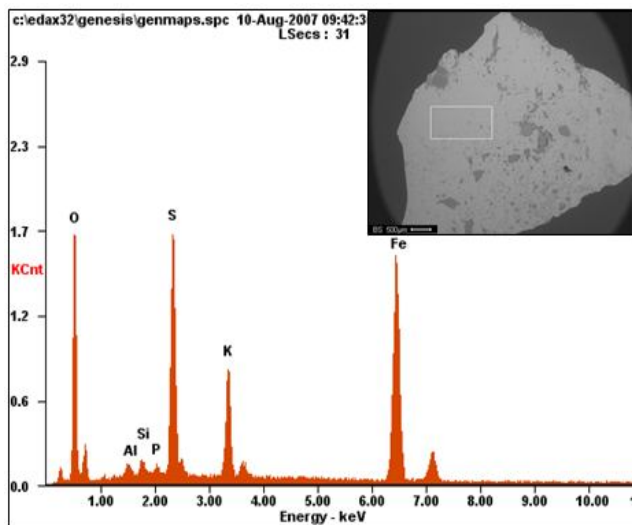
**Fig. 7.** Confirmation of turquoise phase presence in Ali-abad area by XRD



| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>OK</i>      | 45.63      | 63.26      |
| <i>AlK</i>     | 17.56      | 14.44      |
| <i>SiK</i>     | 07.22      | 05.70      |
| <i>PK</i>      | 14.25      | 10.20      |
| <i>SK</i>      | 01.02      | 00.70      |
| <i>KK</i>      | 00.58      | 00.33      |
| <i>CaK</i>     | 01.27      | 00.70      |
| <i>FeK</i>     | 06.29      | 02.50      |
| <i>CuK</i>     | 06.19      | 02.16      |
| <i>Matrix</i>  | Correction | ZAF        |

شکل ۸. نتایج تجزیه EDS همراه با تصویر BSE از فاز فیروزه در منطقه علی‌آباد

Fig. 8. EDS analysis results with BSE image of turquoise phase in Ali-abad area



| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>OK</i>      | 40.22      | 64.77      |
| <i>AlK</i>     | 01.12      | 01.07      |
| <i>SiK</i>     | 01.08      | 00.99      |
| <i>PK</i>      | 00.59      | 00.49      |
| <i>SK</i>      | 14.56      | 11.70      |
| <i>KK</i>      | 07.18      | 04.73      |
| <i>FeK</i>     | 35.25      | 16.26      |
| <i>Matrix</i>  | Correction | ZAF        |

شکل ۹. نتایج آنالیز EDS همراه با تصویر BSE از فاز ژاروسیت همراه با فیروزه در منطقه علی‌آباد

Fig. 9. EDS analysis results with BSE image of the jarosite phase with turquoise in Ali-abad area

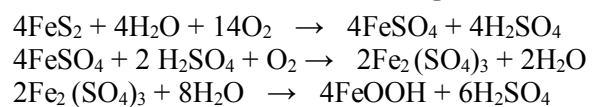
جدول ۱. نتایج تجزیه XRD در روی نمونه‌های منطقه علی‌آباد

Table 1. The results of XRD analyses in samples of Ali-abad area

| sample   | Mineral assemblage |
|--|--------------------|
| Sky blue turquoise from veinlet (handpicked)               | Turquoise          |
| Brown and spongy type gossans                              | Goethite + Quartz  |
| White and cryptocrystalline mass with concoidal fracturing | Alunite            |
| Altered host rock arkoses                                  | Muscovite + Quartz |

## بحث

در کانسار مس پورفیری علی‌آباد زون دگرسان فلیک که بیشترین گستردگی را دارد، با کانی‌سازی سولفیدی (پیریت + کالکوپیریت) مشخص است. پهنه‌های دگرسانی در یک سامانه پورفیری به‌طور ایده‌آل شامل: پروپلیتیک، سرپیتیک، سدیک-کلسیک، پتاسیک و آرژیلیک پیشرفته هستند (Pirajno, 2009). اغلب فرایندهای هوازدگی می‌توانند سبب تغییرات کانی‌شناسی و ژئوشیمی در پهنه‌های ذکر شده شوند. به این صورت که واکنش‌های آب‌شویی<sup>۱</sup> و پیامد نهایی آن، یعنی غنی‌شدگی ثانویه<sup>۲</sup>، یک منطقه‌بندی عمودی ثانویه در نیم‌رخ دگرسانی‌های گرمابی را سبب می‌شوند. در کانسارهای مس پورفیری، کانی‌های سولفیدی مناطق سطحی در محیط اکسیدان، جوی تخریب‌شده و سیالات اسیدی همراه اکسیدهای آهن ایجاد می‌کنند. این فرایندهای اکسیداسیون، آغازگر واکنش‌های تأمین سازه‌های فیروزه (P, Cu, Al) هستند. در ادبیات نوین کانی‌شناسی کانسارهای مس پورفیری (Chavez, 2000; John et al., 2010)، فیروزه محصول اکسیداسیون سوپرژن در نظر گرفته شده است. بدیهی است، هوازدگی جوی کانی‌های سولفیدی که شروع واکنش‌های وابسته به این فرایند است، در محیط اسیدی (Ph بالا) با فوگاسیته بالای اکسیژن رخ داده است. در ابتدا اسیدیته پایین آب‌های جوی (احتمالاً CO<sub>2</sub> محلول در آب و یا اسیدهای هومیک موجود در خاک) برای آغاز فروپاشی سولفیدها کافی بوده است. با شروع دگرسانی پیریت و کالکوپیریت، اسید سولفوریک حاصله می‌تواند محیط را اسیدی‌تر و باعث پیشرفت واکنش (به شکل سامانه بازخورد<sup>۳</sup>) شود. متلاشی‌شدن پیریت در شرایط اکسیدان حاصل از تأثیر آب‌های جوی و ایجاد گوتیت و اسیدسولفوریک مطابق واکنش‌های زیر رخ داده است:



(رابطه ۱)

$4\text{FeS}_2$  (pyrite) +  $10\text{H}_2\text{O}$  +  $7\text{SO}_2 \rightarrow 4\text{FeOOH}$  (Goethite) +  $8\text{H}_2\text{SO}_4$   
کالکوپیریت نیز مانند همه کانی‌های سولفیدی زون اکسیدان، ناپایدار می‌شود (Milovsky and Kononov, 1985).

(رابطه ۲)

$\text{CuFeS}_2$  (Chalcopyrite) +  $4\text{O}_2 \rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{CuSO}_4$   
همچنین سولفات فریک ایجاد شده در واکنش فروپاشی پیریت می‌تواند به شکل عامل اکسیدان قوی، انحلال کالکوپیریت را موجب شود. در این راستا پیریت‌های بازمانده نیز می‌تواند مطابق یک سامانه بازخورد تأثیر پذیرند و سولفات فریک بیشتری تولید کنند.

(رابطه ۳)

$\text{CuFeS}_2 + 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow \text{CuSO}_4 + 5\text{FeSO}_4 + 2\text{S}$   
(رابطه ۴)

$\text{FeS}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow 3\text{FeSO}_4 + 2\text{S}$   
با در نظر گرفتن شکل تفکیکی سولفات آهن فریک، می‌توان تشکیل هماتیت در زون اکسیدان را مطابق رابطه زیر در نظر گرفت.

(رابطه ۵)

$2\text{Fe}^{3+}(\text{aqueous}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{solid}) + 6\text{H}^+$   
بدیهی است، مطابق واکنش بالا، pH سیالات کاهش می‌یابد. پیدایش و فراوانی اکسیدها و اکسی هیدروکسیدهای آهن سبب توسعه گوسان خواهد شد. به‌طور کلی در گوسان‌های تحول یافته در pH پایین (<4) مس شدیداً محلول است (Samama, 1986)؛ لذا تحول گوسان، علاوه بر تأمین مس مورد نیاز سبب ایجاد سیالات اسیدی برای ادامه واکنش‌ها می‌شود. پیشنهاد می‌شود که در شرایط اسیدی، شسته‌شدن فسفات از آركوزها (سازند سنگستان) می‌تواند مطابق واکنش زیر صورت گیرد. آپاتیت کانی فرعی باتولیت گرانیتی شیرکوه است که بعد از فرسایش در ماسه‌سنگ‌های آركوزی جای گرفته است.

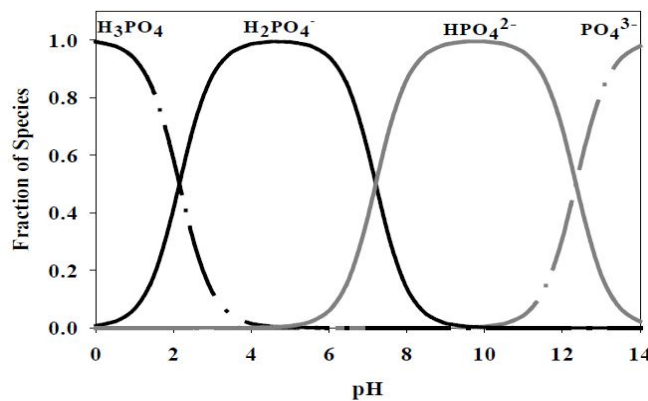
(رابطه ۶)

$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$  (Apatite) +  $5\text{H}_2\text{SO}_4$  +  $9/2\text{O}_2 \rightarrow 5\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (gypsum) +  $3\text{H}_3\text{PO}_4$

1. leaching
2. supergene enriching
3. Feedback system

تولید غیرآلی فسفر معدنی در محیط‌های بدون اکسیژن<sup>۱</sup> به احیای Fe(III) و در نتیجه انحلال هیدروکسیدفریک و گونه‌های فسفر غیرارگانیک (PI) جذب شده آن، وابسته است. بر پایه سازوکار ذکر شده می‌توان پیشنهاد کرد که هیدروکسید فریک در فرایند شکل‌گیری زون اکسیدان توانسته است، مقادیری PI را از شست‌وشوی کانی‌های سنگ مادر جذب کند. احتمالاً مواجه شدن با شرایط احیا، آزاد شدن PI را برای واکنش‌های فیروزه به دنبال داشته است.

بر اساس پژوهش باربر (Barber, 2002)، گونه‌های مختلف فسفات در محیط‌های زمین‌شناسی گزارش شده‌اند (شکل ۱۰). در پیرامون pH خنثی،  $\text{HPO}_4^{2-}$  و  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  از آنیون‌های مهم هستند. در شرایط اندکی آلكالین  $\text{HPO}_4^{2-}$  غالب است و  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  در محیط‌های نسبتاً اسیدی پایدار است (Barber, 2002). بر پایه پژوهش‌های پیشینان، تقسیم‌بندی جدیدی برای انواع خاستگاه فسفر معدنی (غیرارگانیک) توسط املسون (Omelson, 2015) ارائه شده است. وی معتقد است سازوکار

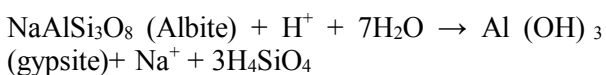
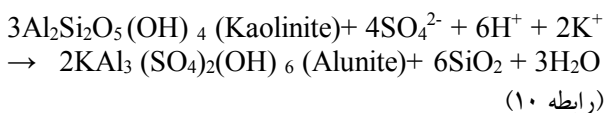


شکل ۱۰. گونه‌سازی فسفات به‌عنوان تابعی از اسیدیته محیط (Barber, 2002)

Fig. 10. Phosphate speciation as a function of the environment acidity (Barber, 2002)

$3\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{Kaolinite}) + 2\text{K}^+$   
با حضور بنیان سولفات و پتاسیم آزاد شده از دگرسانی فلدسپارها مطابق واکنش‌های زیر احتمال تشکیل آلونیت و فیروزه وجود دارد:

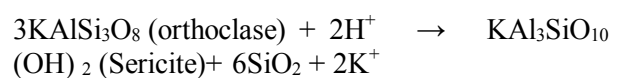
(رابطه ۹)



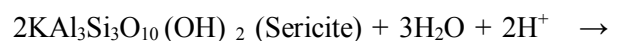
واکنش بالا نشان‌دهنده تشکیل آلونیت نوع سوپرژن در کانسار مس پورفیری است (که ویژه زون‌های هوازده سولفیدهاست). پیدایش آلونیت آغازگر رویداد هوازدگی و تمرکز آلومینیم

برای تشکیل فیروزه، علاوه بر فسفات و مس، مهم‌ترین سازه آلومینیم است. آلومینیم عنصر عمده سنگ‌ساز است و انحلال‌پذیری پایین آن در شرایط سطحی این عنصر را در واکنش‌های داخلی سیال-سنگ، غیرمهاجر نشان می‌دهد. در محیط اسیدی، سربیسیت، کائولینیت و ژیبسیت به خرج فلدسپات‌های آرکوزها و توسط واکنش‌های هیدرولیز در طی دگرسانی شکل خواهند گرفت. برخی از این واکنش‌ها به شرح زیر هستند:

(رابطه ۷)

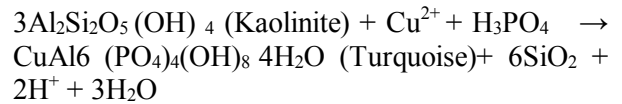


(رابطه ۸)



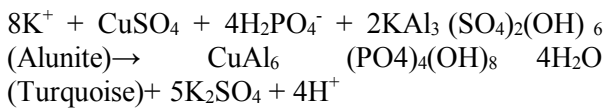
برای تشکیل کانی‌های غنی از آلومینیو است (Corbett, 2009).

(رابطه ۱۱)



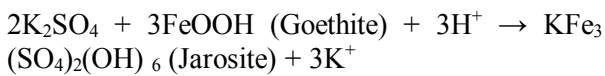
واکنش بالا شکل‌گیری فیروزه به خرج زمینه سنگ دگرسان شده فیلیک-آرژیلیک را نشان می‌دهد. دگرسانی فیلیک-آرژیلیک سنگ میزبان شکل گرفته، در ارتباط با سامانه مس پورفیری منطقه (علی‌آباد) (Zarasvandi et al., 2005) است. در تأیید واکنش پیشنهادی بالا، علاوه بر شواهد کانی‌شناسی و سنگ‌شناختی این پژوهش، در امریکای جنوب‌غربی و امریکای میانی، در رخنمون‌های سطحی هوازدگی و دگرسانی فیروزه به کانی‌های سفید رسی مشاهده شده است (Hull et al., 2005; Hull, 2012)؛ به عبارت دیگر، رابطه ناپایدار همبندی فیروزه-کائولینیت واکنشی منطقی است. علاوه بر این، همبندی آلونیت-فیروزه پیدایش آن را به خرج آلونیت محتمل می‌سازد (Espahbod, 1976). بدین صورت که از واکنش پتاسیم موجود در سیال، سولفات مس و آنیون فسفات با آلونیت، فیروزه شکل خواهد گرفت:

(رابطه ۱۲)

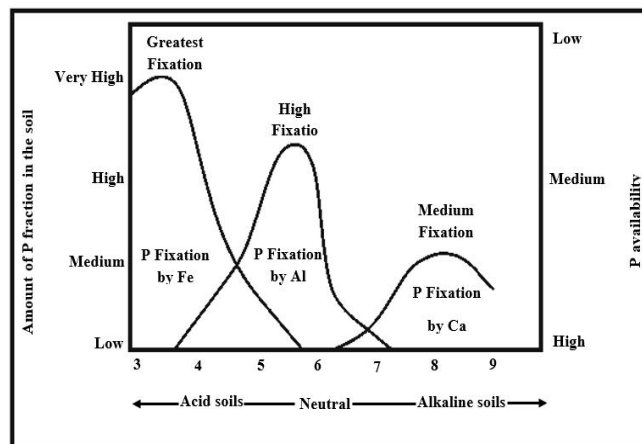


بدیهی است، یون هیدروژن آزاد شده در این واکنش، PH محیط را پایین‌تر می‌آورد و زمینه را برای پیشرفت واکنش‌های هیدرولیز آماده می‌کند و سرانجام از برهم‌کنش  $\text{K}^+$ ، بنیان سولفات و  $\text{Fe}^{3+}$ ، ژاروسیت شکل می‌گیرد:

(رابطه ۱۳)



از مجموع واکنش‌های فیروزه‌زایی، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که وجود یک زمینه یا فاز کانیایی غنی از آلومینیم برای تثبیت فسفات و مس محلول لازم است. پژوهش‌های آمرسون (Amorsson, 1999) نشان داده است که در آب‌های طبیعی، یون آلومینات (گونه  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ )، حدود ۹۷ تا ۹۸ درصد فراوانی آلومینیم حل شده را دارد. در این ارتباط چنان‌که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، فسفات در محیط‌های اسیدی هوازدگی (خاک‌ها)، توسط Fe و Al رسوب داده می‌شود. در pH بین ۵/۵ تا ۰/۵ آلومینیم فعال‌ترین ته‌نشین‌کننده فسفات است. آهن به‌خصوص در  $\text{pH} < 4$ ، در جایی که فسفات به‌طور قوی تثبیت شده است، فعال است (Fixen and Ludwick, 1982).



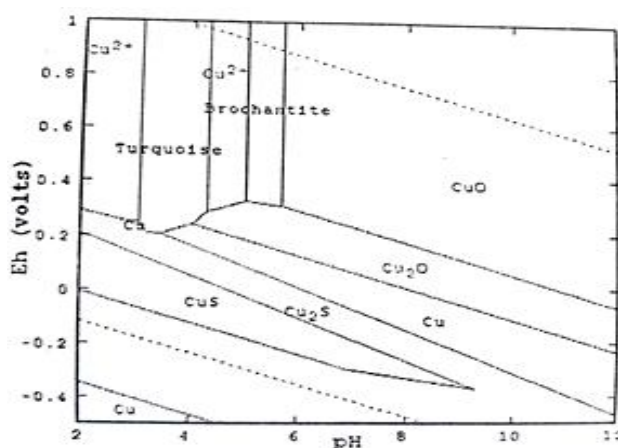
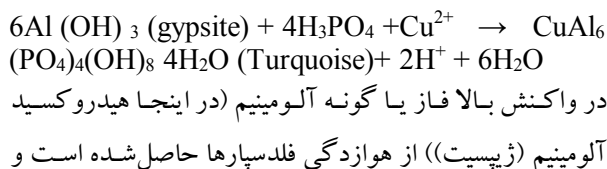
شکل ۱۱. قابلیت دسترسی و تثبیت فسفات توسط آهن، آلومینیم و کلسیم تحت تأثیر pH محیط (Fixen and Ludwick, 1982)

Fig. 11. Availability and fixation of phosphate by iron, aluminum and calcium under the influence of the pH of environment (Fixen and Ludwick, 1982)

سازه‌های موردنیاز به محل رگچه‌ها حمل و ترسیب فیروزه انجام شده است. از دیدگاه گوهرشناسی، این گونه فیروزه‌ها با استحکام بیشتر، رنگ آبی شاخص فیروزه‌ای<sup>۱</sup> و بدون همراهی با اکسیدهای آهن هستند. در شکل ۱۲، نمودار Eh-Ph سامانه P-Al-S-Cu (Eastman, 2017) آورده شده است. در مجموع، بنابر پژوهش‌های انجام شده، می‌توان توالی همیافتی زیر را برای کانی‌های موجود در نظر گرفت (شکل ۱۳):

همچنین شواهد صحرایی نشان می‌دهد که فیروزه به شکل رگچه‌های مستقل در سنگ میزبان نادرگرسان نیز رخمون‌دارد. در این خصوص، خاستگاه آن در رگچه‌ها و در محیط کمتر هوازده تا غیرهوازده می‌تواند مطابق رابطه زیر باشد:

(رابطه ۱۴)



شکل ۱۲. نمودار Eh-Ph برای سیستم P-Al-S-Cu در ۲۵ درجه سانتی‌گراد. داده‌های ترمودینامیکی برای تشکیل فیروزه از نریاگو (Nriagu, 1984) گرفته شده است (شرایط: P=1ppm, Al:100ppm, S:100ppm, Cu:100ppm).

**Fig. 12.** Eh-Ph diagram for P-Al-S-Cu system in 25°C. All thermodynamic data for turquoise formation is taken from Nriagu, 1984.

| Mineralization Stage | Argillic-Phyllic alteration | Sulphide Mineralization | Meteoric Oxidation   | Turquoise genesis |
|----------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|
| Sericite             | ██████████                  |                         |                      |                   |
| Quartz               | ████████████████████        |                         |                      |                   |
| Kaolinite            | ██████████                  |                         |                      |                   |
| Pyrite               | ██████████                  |                         |                      |                   |
| Chalcopyrite         | ██████████                  |                         |                      |                   |
| Goethite             |                             | ████████████████████    |                      |                   |
| Hematite             |                             | ████████████████████    |                      |                   |
| Malachite            |                             | ████████████████████    |                      |                   |
| Alunite              |                             | ████████████████████    |                      |                   |
| Turquoise            |                             |                         | ████████████████████ |                   |
| Jarosite             |                             | ████████████████████    |                      |                   |

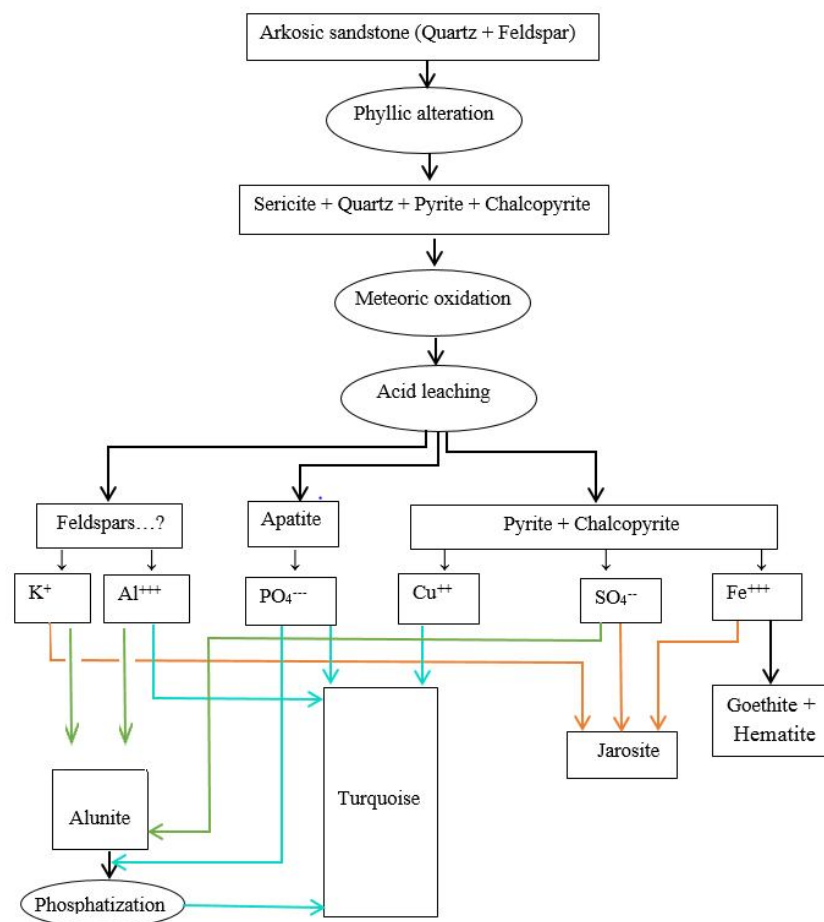
شکل ۱۳. روابط پاراژنتیکی کانی‌ها در منطقه کانی‌سازی شده علی‌آباد

**Fig. 13.** Minerals paragenetic relationship in mineralized area of Ali-abad

**نتیجه‌گیری**

علی‌آباد در گوشه شمال‌غرب باتولیت گرانیتی شیرکوه یزد در حاشیه شرقی کمان ماگماتیسیم سنوزوئیک ایران مرکزی واقع شده است. برای دستیابی به نحوه تشکیل فیروزه در منطقه علی‌آباد، بررسی‌های صحرایی، میکروسکوپی و زمین‌شیمی صورت گرفت. بر پایه پژوهش‌ها و بررسی‌های انجام‌شده، نتایج این بحث به شرح زیر است:

(۱) در پدید آمدن فیروزه، چند فرایند به شکل زنجیره‌ای درگیر بوده‌اند: آغازگر واکنش‌ها، شکل‌گیری محیط اکسیدان (گوسان) بوده‌است که در آن سولفیدهای فلزی (Cu, Fe) پهنه فلیک کانسار مس پورفیری نقش بنیادی ایفا کرده‌اند. در کل می‌توان گفت، فرایندهای شکل‌گیری فیروزه خاستگاهی چندزایشی (پلی‌ژنتیک) برای این کانی فسفات‌ها نشان می‌دهد. در شکل ۱۴، مدل فرضی فرایندهای فیروزه‌زایی در کانسار علی‌آباد نشان‌داده شده است.



شکل ۱۴. مدل فرضی فرایندهای فیروزه‌سازی در کانسار مس پورفیری علی‌آباد

Fig. 14. The hypothesized model of turquoise formation processes in porphyry copper deposit of Ali-abad

دیگری به شکل جانشینی و پراکنده در دگرسانی‌ها. لازم به ذکر است، سنگ میزبان سریسیتی کائولینیتی شده برای جانشینی لازم

(۲) فیروزه در این منطقه به دو گونه رخمون‌دارد. یکی به صورت ته‌نشست مستقیم در رگچه‌ها به دور از دگرسانی سنگ میزبان و

فیروزه، مجموعه کانایی زون هوازده را نشان می‌دهد. از این رو، می‌توان گفت فیروزه‌سازی مرتبط یا منسوب به این گونه پهنه دگرسانی است. علاوه بر این، نگاهی به شیمی کانی، درصد بالای تمرکز آلومینیم که از ویژگی‌های کانی‌های زون هوازده (تا تشکیل کانی‌های غنی از آلومینیم) است، را نشان می‌دهد.

است.

۳) چنان‌که در شکل ۱۳ (روابط پاراژنتیکی کانی‌ها) مشخص شد، رخداد آلونیت و همراهی آن با فیروزه تنگاتنگ است؛ به طوری که پیدایش فیروزه را به خرج آلونیت (فسفاتی شدن) محتمل می‌سازد.

۴) رخداد آلونیت سوپرژن در پهنه دگرسانی و همراهی آن با

## References

- Amidi, S.M., 1983. Geological map of Abadeh, Scale 1: 250,000. Geological Survey of Iran.
- Amorsson, S., 1999. The relative abundance of Al-sepecies in natural waters in Iceland. In: H. Armannsson (Editor), *Geochemistry of the Earths surface*. Balkema, Rotterdam, pp. 421–424.
- Barber, T.M., 2002. Phosphate adsorption by mixed and reduced iron phases in static and dynamic system. M.Sc. Thesis, Stanford University, Stanford, California, 112 pp.
- Chavez, W.X.Jr., 2000. Supergene oxidation of copper deposits: zoning and distribution of copper oxide minerals. *Society of Economic Geologists*, 2(41):10–21.
- Cooke, D.R., Hollings, P. and Walshe, J.L., 2005. Giant Porphyry Deposits: Characteristic, Distribution and Tectonic Controls. *Economic Geology*, 100(5): 801–818.
- Corbett, G., 2009. Anatomy of porphyry related Au-Cu-Mo mineralized systems: some exploration implications. North Queensland Exploration and Mining Conference, Australian institute of geoscientists, Townsville, Australia.
- Eastman, K., 2017. Supergene mineralization of the Continental Pit, Butte, Silver Bow County, Montana. M.Sc. Thesis, Montana University, Montana, Canada, 218 pp.
- Eslamizadeh, A., 2004. Petrology of Ali-Abad-Darreh Zereshk igneous rocks and related copper mineralization. Ph.D. Thesis, Islamic Azad University, Tehran, Iran, 231 pp. (in Persian with English abstract)
- Espahbod, M.R., 1976. Le District minier de la mine de Turquoise de Kuh-e-madan (Neychabur, Iran): Mineralisations et caracteres geologiques, geochemiques et metallogeniques de l'uranium, du cuivre et du molybdene. Ph.D. Thesis, Univesite de Nancy, Nancy, France, 191 pp.
- Fixen, P.E., and A.E. Ludwick. 1982. Residual available phosphorus in near-neutral and alkaline soils: II, Perspective and quantitative estimation. *Soil Science Society of America Journal*.46(2):335–338.
- Foord, E.E. and Taggart Jr.J.E., 1998. A reexamination of Turquoise group: the mineral aheylite, planerite (rede fined), Turquoise and Coeruleolactite. *Mineralogical Magazine*. 62(1): 93–111.
- Forster, H., 1978. Mesozoic-Cenozoic metallogenesis in Iran. *Journal of the Geological society*, 135(4): 443–445.
- Ghiasvand, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Haidarian Shahri, M.R., 2018. Alteration, mineralization, geochemistry and fluid inclusion study of the Firouzeh mine, NW Neyshabour. *Journal of Economic Geology*, 10(2): 325–354. (in Persian with English abstract)
- Haj Molla Ali, A., 1993. Geological map of Khezh-Abad, Scale 1: 100,000. Geological Survey of Iran.
- Hull, S., 2012. Turquoise Exchange and Procurement in the Chacoan World. Ph.D. Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Canada, 295 pp.
- Hull, S., Fayek, M., Anovits, L.M., Mathien, F.J.,



- Shelley, P. and Durand, K.R., 2005. The effects of alteration on sourcing archaeological Turquoise. Annual Meetings of Geological Society of America, Salt Lake City, Utah, America.
- Hull, S., Fayek, M., Mathien, F.J., Shelley, P. and Durand, K.R., 2008. A New approach to determining the geological provenance of Turquoise artifacts using hydrogen and copper stable isotopes. *Journal of Archaeological Science*, 35(5): 1355–1369.
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, F., Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D. and Vikre, P.G., 2010. Porphyry copper deposit model. Chap. B of Mineral deposit models for resource assessment. U.S. Geological Survey Scientific Investigations, United State of America, Report 2010-5070, 169 pp.
- Mackizadeh, M.A., 2008. Mineralogical and petrological studies of Central Iranian skarns (Yazd Province). Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 190 pp. (in Persian with English abstract)
- Milovsky, A.V. and Kononov, O.V., 1985. *Mineralogy*. Mir Publishers, Moscow, 320 pp.
- Momenzadeh, M., Farjad Bastani, M. and Rashid Nejad Omran, N., 1988. Primary study on Yazd Province Ore Deposits. Proceedings of ore deposits and mining potential of Yazd Province, Yazd University, Yazd, Iran. (in Persian)
- Moore, F., Deymar, S. and Taghipour, B., 2011. Genetic relation between skarn mineralization and petrogenesis of the Darreh Zerreshk granitoid intrusion, southwest of Yazd. *Journal of Economic Geology*, 3(2):97–110. (in Persian with English abstract)
- Nabavi, M.H., 1972. Geological quadrangle map of Yazd, Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Nriagu, J.O., 1984. Formation and stability of base metal phosphates in soils and sediments. In: J.O. Niragu and P.B. Moore (Editors), *Phosphate Minerals*. Speinger Verlag, Berlin Heidelberg, PP. 318–329.
- Omelson, S., 2015. Phosphorous paths to phosphate minerals. 25th Goldschmidt Geochemistry Conference, Prague Congress Center, Prague, Czech Republic.
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer, Berlin, 1250pp.
- Rezaian, K. and Mackizadeh, M.A., 1997. Contact metamorphism and mineralization in middle Jurassic granites, South west Yazd, Yazd University, Yazd, Report 8, 114 pp. (in Persian)
- Rezaian, K., Noghrehiyan, M., Mackizadeh, M.A. and Sherafat, Sh., 2003. Geology and genesis of Turquoise in the Ali-Abad index (Taft-Yazd). *Research Journal of University of Isfahan "Science"*, 18(2): 138–145. (in Persian with English abstract)
- Sabzeii, M., Roshan Ravan, J., Nazemzadeh Shoaii, M. and Alaii-Mahabady, S., 1986. Feldspar and Kaolin exploration in Yazd region, Geological Survey of Iran, Geological Management of the Southeast Region of Kerman, Kerman, Report 5, 62 pp. (in Persian)
- Samama, J.C., 1986. *Ore fields and continental weathering*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 329 pp.
- Taghipour, B. and Mackizadeh, M.A., 2011. Petrogenesis of skarn related Cu-porphyry intrusion deposit, Ali-Abad- Darreh Zerreshk, Yazd. *Journal of Economic Geology*, 3(1):79–92. (in Persian with English abstract)
- Wenk, H.R. and Blakh, A., 2004. *Minerals: Their Constitution and Origin*. Cambridge University Press, New York, 640 pp.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S. and zentill, M., 2005. Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad Porphyry Copper Deposits, Central Iran. *International Geology Review*, 47(6): 620–646.



## Mineralogy and Formation Conditions of Turquoise in Ali Abad Cu Porphyry Deposit

Saeide Jadidi Ardekani<sup>1</sup>, Mohammad Ali Mackizadeh<sup>1\*</sup> and Farimah Ayati<sup>2</sup>

1) Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2) Department of Geology, Payame Noor University, Iran

Submitted: Apr. 18, 2018

Accepted: Feb. 05, 2019

**Keywords:** *Turquoise, Alunite, Cu-porphyry, Ali Abad, Central Iran*

### Introduction

In porphyry copper deposits, turquoise is considered to be a supergene oxidation product (John et al., 2010; Chavez, 2000). Based on Rezaian et al., 2003; Zarasvandi et al., 2005 and Eslamizadeh, 2004, the Aliabad index is introduced as a porphyry copper system. The first published report on turquoise events around Ali-Abad was presented by Momenzadeh et al., 1988. This area is located 57 km southwest of Yazd. Alterations often include sericitization, advanced argillization. Kaolinization and silicification have occurred frequently in the arkose and microcan glomerate of the Sangestan formation. The aim of this research study is to try to reconstruct and investigate the formation and origin of turquoise by using the latest mineralogical and geochemical data. Field evidence shows occurrence of turquoise in the form of a veinlet and nodules, with blue-green and blue-white colors. Jarosite, alunite, quartz and iron oxides are found together with turquoise.

### Materials and Methods

A geological map of the area with a scale of 1/15000 was prepared. 35 samples of intrusive bodies, sandstones and altered rocks were selected to produce thin and polished sections. XRD and the EDS analyses were carried out at the central laboratory of Isfahan University and the University of Oklahoma, USA, respectively in order to identify the chemical composition of phases.

### Results

Based on the studies, several chain processes have been involved in the form of turquoise: the initiator of the reactions is the formation of an oxidant environment (gossan), in which metal sulfides (Cu, Fe) in the phyllic zone of porphyry copper deposit have played a fundamental role. Turquoise has two species in this area. One is in the form of direct deposition in the veinlets, away from the alteration of the host rock and the mineralization center, and the other one is in the form of substitution. It is undeniable that the host rock with Kaolinite-sericite alteration is required for substitution. The close association of alunite-turquoise may imply that turquoise is a product of the phosphatization process of alunite. The Alunite Supergene event in the alteration zone and its accompaniment with turquoise indicates the mineral complex of advanced argillic alteration. The mineral chemistry highlighted the high percentages of aluminum concentration which is a property of minerals in advanced argillic zone.

### Discussion

The phyllic zone has the largest part of the region's alteration (Taghipour and Mackizadeh, 2011; Moore et al., 2011). An advanced argillic zone with the presence of alunite-jarosite with turquoise is scattered inside the phyllic zone. To confirm microscopic observations, XRD and EDS analyses were used. These analyses prove the presence of the turquoise phase.

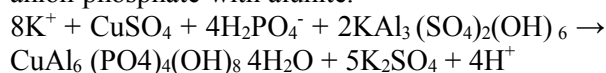
In some analyses performed on the turquoise

\*Corresponding author Email: ma.makizadeh@sci.ui.ac.ir

mineral phase, the presence of potassium and silicon probably indicates the transitional phase of conversion of sericite or alunite to turquoise. Pyrite in the oxidant condition has been disrupted by the effects of atmospheric water and created goethite and sulfuric acid. The produced ferric sulfate can induce dissolution of chalcopyrite. The occurrence of iron oxides and oxy-hydroxides will lead to the development of the gossan zone. Gossan's transformation, in addition to supplying copper, causes acidic fluids to continue the reaction. Under acidic conditions, the phosphate leaching from the arkose has been subjected to the following reaction:



In addition to phosphate and copper, aluminum is the most important element in the structure of turquoise. Under an acidic environment, arkose feldspars and hydrolysis reactions during alteration will be used for the formation of sericite, kaolinite and gypsum. With the presence of sulfate and potassium released from the alteration of feldspars, alunite and turquoise can be formed. The alunite-turquoise paragenesis confirms formation of turquoise by alunite (Espahbod, 1976). Turquoise will be formed by the reaction of potassium, copper sulfate and anion phosphate with alunite:



The hydrogen ions released in this reaction will lower the pH of the environment and cause progression of hydrolysis reactions. Finally, jarosite will be formed by the interaction of  $\text{K}^+$ , sulfate and  $\text{Fe}^{3+}$ . Based on these reactions, an aluminum-rich phase is needed for stabilizing phosphate and soluble copper.

## References

- Chavez, W.X.Jr., 2000. Supergene oxidation of copper deposits: zoning and distribution of copper oxide minerals. *Society of Economic Geologists*, 2(41):10–21.
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, F., Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D. and Vikre, P.G., 2010. Porphyry copper deposit model. Chap. B of Mineral deposit models for resource assessment. U.S. Geological Survey Scientific Investigations, United State of America, Report 2010-5070, 169 pp.
- Eslamizadeh, A., 2004. Petrology of Ali-Abad-Darreh Zereshk igneous rocks and related copper mineralization. Ph.D. Thesis, Islamic Azad University, Tehran, Iran, 231 pp. (in Persian with English abstract)
- Espahbod, M.R., 1976. Le District minier de la mine de Turquoise de Kuh-e-madan (Neychabur, Iran): Mineralisations et caracteres geologiques, geochemiques et metallogeniques de l'uranium, du cuivre et du molybdene. Ph.D. Thesis, Univesite de Nancy, Nancy, France, 191 pp.
- Momenzadeh, M., Farjad Bastani, M. and Rashid Nejad Omran, N., 1988. Primary study on Yazd Province Ore Deposirs. Proceedings of ore deposits and mining potential of Yazd Province, Yazd University, Yazd, Iran. (in Persian)
- Moore, F., Deymar, S. and Taghipour, B., 2011. Genetic relation between skarn mineralization and petrogenesis of the Darreh Zerreshk granitoid intrusion, southwest of Yazd. *Journal of Economic Geology*, 3(2):97–110. (in Persian with English abstract)
- Rezaian, K., Noghrehian, M., Mackizadeh, M.A. and Sherafat, Sh., 2003. Geology and genesis of Turquoise in the Ali-Abad index (Taft-Yazd). *Research Journal of University of Isfahan "Science"*, 18(2): 138–145. (in Persian with English abstract)
- Taghipour, B. and Mackizadeh, M.A., 2011. Petrogenesis of skarn related Cu-porphyry intrusion deposit, Ali-Abad- Darreh Zereshk, Yazd. *Journal of Economic Geology*, 3(1):79–92. (in Persian with English abstract)
- Zarasvandi, A., Liaghat, S. and zentill, M., 2005. Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad Porphyry Copper Deposits, Central Iran. *International Geology Review*, 47(6): 620–646.