



زمین‌شناسی و خاستگاه کانه‌زایی مس در کانسار دهنه، شمال خاور زنجان

معصومه محمدی^۱، قاسم نباتیان*^۱، مریم هنرمند^۲ و محمد ابراهیمی^۱

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

(۲) دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کدپستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۳

چکیده

کانسار مس دهنه در فاصله ۸۴ کیلومتری شمال خاور زنجان، در پهنه البرز باختری-آذربایجان و زیرپهنه طارم قرار گرفته است. سنگ‌های رخنمون‌یافته در منطقه دهنه، مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن (معادل سازند کرج) شامل واحدهای توف و گدازه‌های بازالت پورفیری و بازالت آمیگدالوئیدال هستند. بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که سنگ‌های آتشفشانی منطقه دهنه دارای ترکیب بازالتی با ماهیت شوشونیتی بوده و در محیط زمین‌ساختی مرتبط با فرورانش تشکیل شده‌اند. کانه‌زایی مس در منطقه دهنه به صورت رگه-رگچه‌ای در درون واحدهای گدازه بازالتی رخ داده است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی انجام‌شده، کانه‌های موجود در منطقه مورد بررسی شامل مس طبیعی، نقره طبیعی، کوپریت و به مقدار کمتر مالاکیت و آزوریت است. عمده‌ترین دگرسانی‌های موجود در این منطقه شامل کربناتی، کلریتی-اپیدوتی، سریسیتی و ژئولیتی است. بافت کانه‌ها شامل رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی، بازماندی (جزیره‌ای) و جانیشینی است. بررسی‌های انجام‌شده در محدوده دهنه نشان می‌دهد که فرایند دیاژنز و دگرگونی تدفینی در توالی آتشفشانی میزبان کانه‌زایی، سبب ایجاد سیال‌های نسبتاً داغ شده است که با چرخش این سیالات، مس و نقره از سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن شسته شده و تحت شرایط اکسیدی در واحدهای بازالتی ته‌نشست شده‌اند. در ادامه و در اثر فرایندهای سوپرژن و هوازگی، کانی‌های معدنی اولیه (مس طبیعی) به کانی‌های ثانویه از جمله کوپریت، مالاکیت و آزوریت تبدیل شده‌اند. با توجه به نوع سنگ میزبان، کانی‌شناسی و دگرسانی می‌توان اظهار داشت که کانه‌زایی مس در کانسار دهنه شباهت زیادی با کانسارهای مس مرتبط با سنگ‌های بازالتی (نوع میشیگان) دارد.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی مس، نوع میشیگان، پهنه البرز باختری-آذربایجان، زیرپهنه طارم، دهنه، زنجان

مقدمه

شمالی، در بخش شمالی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ طارم (Amini, 2000) واقع شده است. این رخداد معدنی بر اساس تقسیمات پهنه‌های زمین‌ساختی-رسوبی ایران زمین (Aghanabati, 2005) در پهنه البرز باختری-آذربایجان و

کانسار مس دهنه در فاصله ۸۴ کیلومتری شمال خاور زنجان، در منطقه‌ای با طول‌های جغرافیایی ۴۸° ۴۶' ۱۶" تا ۴۸° ۵۱' ۳۲" شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶° ۴۹' ۲۵" تا ۳۶° ۵۲' ۱۶"

بخش‌های کانه‌دار تهیه و بررسی شد. برای انجام بررسی‌های ژئوشیمیایی از واحدهای سنگی میزبان کانه‌زایی تعداد ۶ نمونه برای انجام تجزیه‌های ICP-MS و XRF به ترتیب به شرکت زراژما و مرکز تحقیقات و فراوری مواد معدنی ایران ارسال شد. نمونه‌های ژئوشیمیایی با استفاده از روش ذوب قلیایی مورد تجزیه قرار گرفته‌اند. همچنین تعداد ۴ مقطع برای تجزیه دستگاهی الکترون میکروپروب و SEM برای بررسی و شناسایی کانی‌های مختلف در این کانسار به مرکز فراوری مواد معدنی کرج ارسال و مورد تجزیه قرار گرفته‌اند.

زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری

محدوده معدنی دهنه با گسترشی در حدود ۳۸/۷۵ کیلومتر مربع در بخش باختری پهنه البرز قرار دارد. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ تهیه‌شده از محدوده معدنی دهنه (شکل ۲) و همچنین بررسی‌های صحرایی انجام‌شده، واحدهای سنگی موجود در محدوده معدنی دهنه شامل مجموعه سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی سازند کرج هستند. این واحدها اغلب از گدازه‌های بازالتی به همراه واحدهای لیتیک کریستال توف بازالتی و کریستال لیتیک توف بازالتی تشکیل شده‌اند (شکل ۳- A و B). در منطقه طارم، سازند کرج را به دو عضو آمند و کردکندی تقسیم می‌کنند که عضو کردکندی در بخش زیرین عضو آمند قرار دارد (Hirayama et al., 1966). واحدهای موجود در منطقه مورد بررسی مربوط به عضو کردکندی سازند کرج هستند. عضو کردکندی در منطقه طارم، توسط گروهی از توده‌های نفوذی با ترکیب دیوریت، کوارتز مونزودیوریت، گرانودیوریت، مونزونیت، کوارتز مونزونیت و مونزوگرانیت به سن ائوسن پایانی (Nabatian et al., 2014b; 2016) قطع شده است. این واحدها در مجاورت توده‌های نفوذی، دگرسان شده و کانی‌سازی‌های مختلفی از جمله مگنتیت-آپاتیت، مس-طلا و سرب-روی و مس در داخل توده نفوذی و واحدهای اطراف تشکیل شده‌اند (Nabatian, 2008; Nabatian, 2012; Nabatian et al., 2016; Saeedi, 2015). واحدهای

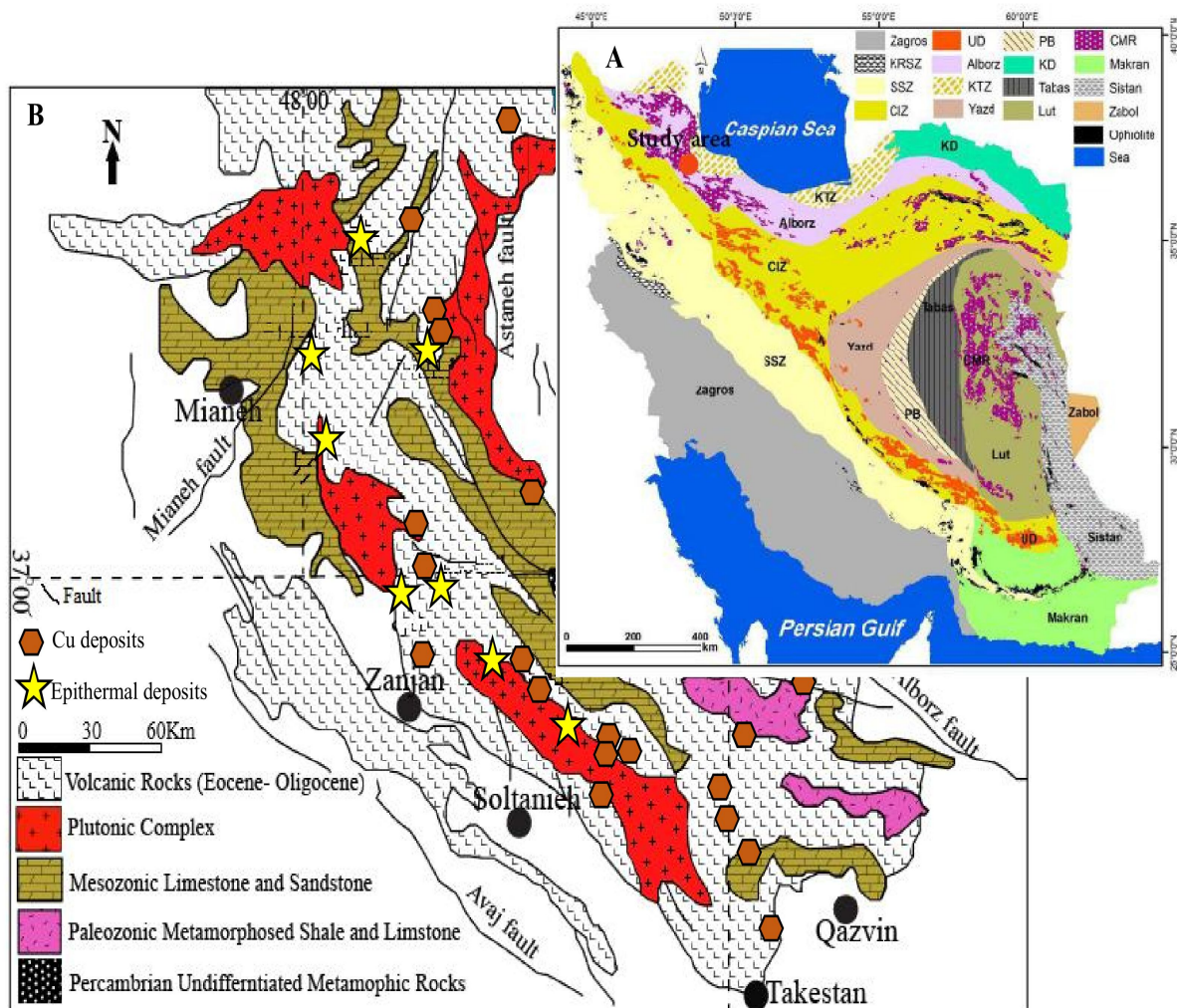
زیرپهنه طارم قرار دارد (شکل ۱-A و B). زیرپهنه طارم از لحاظ ویژگی‌های زمین‌شناسی اغلب دارای واحدهای آتشفشانی-نفوذی است. سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی موجود در این زیرپهنه اغلب مربوط به سازند کرج هستند که در زمان ائوسن در این بخش از ایران تشکیل شده‌اند. واحدهای آتشفشانی-رسوبی در این زیرپهنه دارای ترکیب بازالتی، آندزیتی، آندزیت-بازالت، توف و ماسه‌سنگ است. واحدهای یادشده در زمان ائوسن پایانی توسط یک گروه توده‌های نفوذی با ترکیب مونزونیتی قطع شده‌اند (Nabatian et al., 2014b; 2016). توده‌های نفوذی یادشده اغلب در راستای خاوری-باختری گسترش داشته و باعث تشکیل کانه‌زایی‌های متعددی در این ناحیه شده‌اند. از رخدادهای کانسارهای معدنی مس در زیر پهنه طارم می‌توان به کانسارهای مگنتیت-آپاتیت ناحیه زنجان (Nabatian et al., 2010; 2014a; 2016) مس علی‌آباد موسوی-خان‌چای (Saeedi, 2015)، مس آق‌کند (Fayzi et al., 2017)، مس-طلای لهنه (Zamanian et al., 2016)، مس ماری (Hosseinzadeh et al., 2016) و مس قشلاق (Abbaspour, 2017) اشاره کرد (شکل ۱-B). تا قبل از این پژوهش، موسوی مطلق و همکاران (Mousavi Motlagh et al., 2009) بر روی سنگ میزبان این کانسار پژوهش‌هایی را انجام داده بودند. در این پژوهش ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، ژئوشیمیایی و خاستگاه این رخداد معدنی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی دقیق این کانسار از لحاظ زمانی و مکانی می‌تواند به‌عنوان الگوی اکتشافی در کمربند فلززایی طارم-هشتجین قرار گیرد.

روش مطالعه

برای بررسی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و کانه‌زایی در محدوده مورد مطالعه، علاوه بر بررسی‌های صحرایی و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰، تعداد ۲۶ عدد مقطع میکروسکوپی شامل ۲ نمونه مقطع صیقلی، ۱۴ نمونه مقطع نازک-صیقلی و ۱۰ نمونه مقطع نازک از واحدهای سنگی و

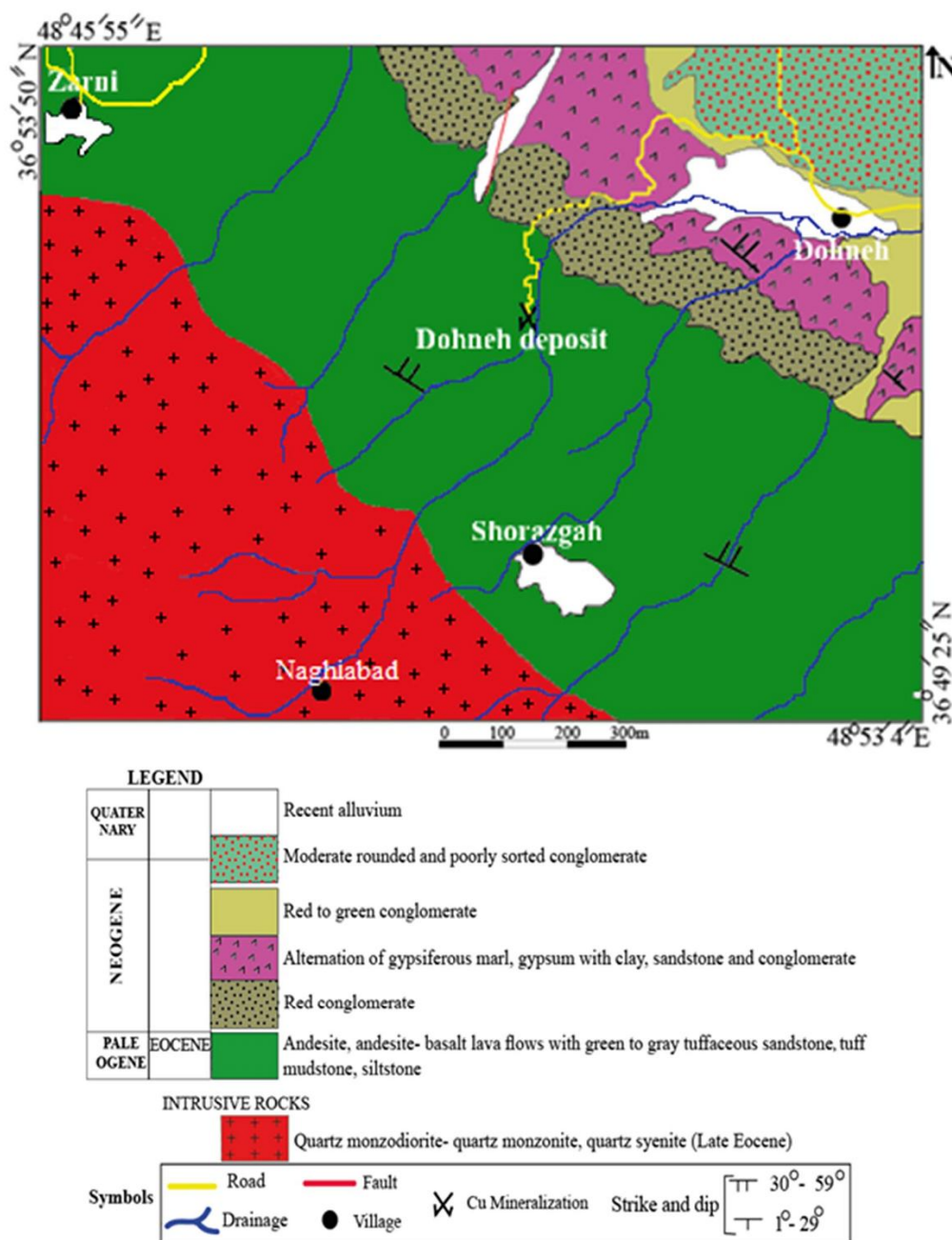
شاخص موجود در آنها به دو نوع بازالت پورفیری و بازالت آمیگدالوندال تقسیم شده‌اند.

سنگی رخنمون یافته در محدوده کانه‌زایی دهنه شامل گدازه‌های بازالتی و واحدهای توفی به شرح زیر هستند (شکل ۳-A و B). واحدهای بازالتی در منطقه مورد بررسی، بر اساس بافت‌های



شکل ۱. A: نقشه تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌شناسی-ساختاری ایران (Alavi, 1991; Aghanabati, 2005) که محدوده مورد بررسی با دایره قرمز بر روی آن مشخص شده است (علائم اختصاری در شکل ۱-A عبارتند از: Zagros structural zone; SSZ: Sanandaj-Sirjan magmatic metamorphic zone; AMB: Alborz magmatic belt; UD: Urumiyeh-Dokhtar magmatic arc; CIZ: Central Iranian Zone; KRSZ: Kermanshah Radiolarites subzone; Yazd: Yazd Block; PB: Posht-e-Badam Block; Tabas: Tabas Block; Lut: Lut block; KTZ: Khazar- Talesh- Ziveh structural zone; KD: Kopeh-Dagh ranges; CMR: Cenozoic magmatic rocks; Sistan: East Iran ranges; Makran: Makran zone; Zabol: Zabol area) و B: نقشه ایالت فلززایی طارم-هشتجین و جایگاه کنسارهای مس و اپی‌ترمال در آن (برگرفته از قاسمی‌سیانی و همکاران (Ghasemi Siani et al., 2017) و قربانی (Ghorbani, 2013) با تغییرات)

Fig. 1. A: Simplified structural map of Iran (Aghanabati, 2005; Alavi, 1991). Red Circle shows the location of the study area. (Abbreviations in Fig. 1a are as follows: Zagros: Zagros structural zone; SSZ: Sanandaj-Sirjan magmatic metamorphic zone; AMB: Alborz magmatic belt; UD: Urumiyeh-Dokhtar magmatic arc; CIZ: Central Iranian Zone; KRSZ: Kermanshah Radiolarites subzone; Yazd: Yazd Block; PB: Posht-e-Badam Block; Tabas: Tabas Block; Lut: Lut block; KTZ: Khazar- Talesh- Ziveh structural zone; KD: Kopeh-Dagh ranges; CMR: Cenozoic magmatic rocks; Sistan: East Iran ranges; Makran: Makran zone; Zabol: Zabol area), and B: Geological map of Tarom-Hashtjin metallogenic belt and the location of copper and epithermal deposits in the map (after Ghorbani, 2013; Ghasemi Siani et al., 2017)



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ محدوده معدنی دهنه و موقعیت کانه‌زایی مس در آن (برگرفته از امینی (Amini, 2000) با تغییرات)

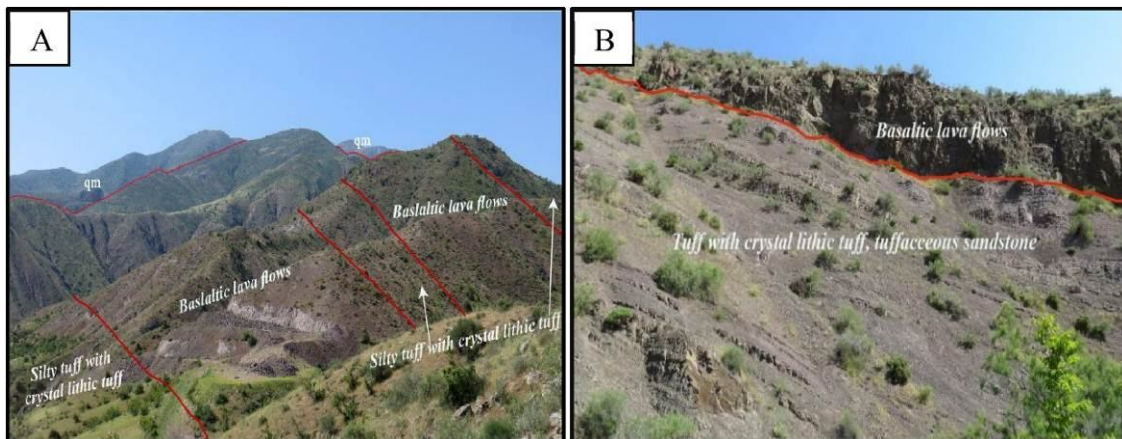
Fig. 2. Geological map of Dohneh deposit (scale: 1: 20000) and location of copper mineralization (after Amini, 2000 with some modification).

گدازه‌های بازالتی آمیگدالوئیدال و بازالت پورفیری قرار دارند (شکل ۳- A و B). در مقاطع میکروسکوپی این واحد دارای زمینه ریزبلوری از پلاژیوکلاز است که همراه آن کانی‌های پیروکسن و الیون به صورت خردشده و قطعات خردسنگی

– **واحدهای توفی:** بر اساس بررسی‌های صحرایی انجام شده، واحدهای توفی، به رنگ سبز-آبی تا بنفش متمایل به خاکستری در محدوده معدنی و همچنین در قسمت شمال‌خاوری آن دیده می‌شوند که به صورت هم‌شیب در بخش‌های زیرین و بالایی

بازالت دیده می‌شوند (شکل ۴). پلاژیوکلازها حجم قابل توجهی در حدود ۴۵ تا ۵۵ درصد از واحدهای توفی را شامل می‌شود. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، فنوکریست‌های اصلی تشکیل‌دهنده آن شامل: پلاژیوکلاز، پیروکسن (کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن) و به مقدار کمتر الیون هستند (شکل ۴-A و B). در این واحد قطعاتی از سنگ‌های بازالتی با زمینه ریزبلور و دارای بافت پورفیری مشاهده می‌شود (شکل ۴-A و B). کانی پیروکسن در این واحد سنگی با مقدار تقریبی حداکثر ۳۵ درصد دارای اندازه ۱ تا ۲ میلی‌متر بوده که در بیشتر موارد به کانی‌های ثانویه از جمله کلسیت و کلریت دگرسان‌شده است (شکل ۴-C). کانی الیون با اندازه ۱ میلی‌متر و مقدار تقریبی ۱۰ درصد به

بازالت دیده می‌شوند (شکل ۴). پلاژیوکلازها حجم قابل توجهی در حدود ۴۵ تا ۵۵ درصد از واحدهای توفی را شامل می‌شود. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، فنوکریست‌های اصلی تشکیل‌دهنده آن شامل: پلاژیوکلاز، پیروکسن (کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن) و به مقدار کمتر الیون هستند (شکل ۴-A و B). در این واحد قطعاتی از سنگ‌های بازالتی با زمینه ریزبلور و دارای بافت پورفیری مشاهده می‌شود (شکل ۴-A و B). کانی پیروکسن در این واحد سنگی با مقدار تقریبی حداکثر ۳۵ درصد دارای اندازه ۱ تا ۲ میلی‌متر بوده که در بیشتر موارد به کانی‌های ثانویه از جمله کلسیت و کلریت دگرسان‌شده است (شکل ۴-C). کانی الیون با اندازه ۱ میلی‌متر و مقدار تقریبی ۱۰ درصد به



شکل ۳. تصاویر صحرایی از واحدهای موجود در منطقه دهنه A: نمایی از واحدهای آتشفشانی، آتشفشانی-رسوبی به همراه توده نفوذی (qm) در منطقه دهنه (دید به سمت جنوب‌باختر) و B: نمایی نزدیک از واحدهای بازالتی و توفی در محدوده دهنه (دید به سمت شمال‌خاور)

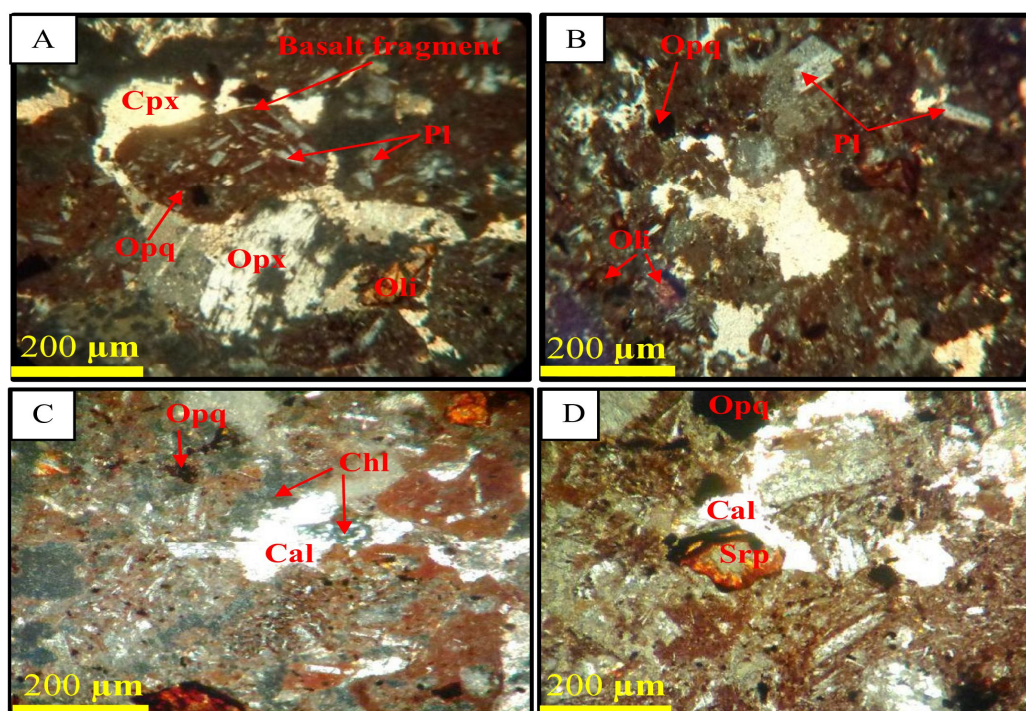
Fig. 3. Field pictures of rock units in the Dohneh district A: A view of volcanic and volcano-clastic units associated with plutonic (qm) rocks in the Dohneh district (view towards the southwest), and B: A closed view of basaltic lava and tuff units in the Dohneh area (view towards the northeast)

ارتوپیروکسن در اندازه‌های ۲ تا ۴ میلی‌متر در زمینه سنگ مشاهده می‌شود و نسبت به پلاژیوکلاز حجم کمتری از سنگ، در حدود ۲۵ تا ۳۵ درصد را تشکیل می‌دهند. کانی الیون در اندازه‌های ۱ تا ۲ میلی‌متر در بیشتر بخش‌های این واحد همراه با پیروکسن دیده می‌شود (شکل ۵-B). الیون ۵ تا ۱۰ درصد از سنگ را تشکیل می‌دهد. کانی‌های یادشده در اثر دگرسانی به کانی‌های ثانویه از جمله کربنات، کلریت و به مقدار کمتر

- **واحد بازالت آمیگدالوئیدال:** این واحد در نمونه‌های دستی دارای بافت حفره‌ای و بادامکی بوده و به رنگ خاکستری دیده می‌شود (شکل ۵-A). کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این واحد شامل پلاژیوکلاز، پیروکسن و الیون است (شکل ۵-B). کانی پلاژیوکلاز با ماکل تکراری در اندازه ریز تا متوسط بلور، حجم قابل توجهی در حدود ۴۵ تا ۵۰ درصد از سنگ را شامل می‌شوند. کانی پیروکسن به دو نوع کلینوپیروکسن و

شاخص این واحد، بافت حفره‌ای یا بادامکی (آمیگدالوئیدال) است. این حفره‌ها در طی تبلور و سرد شدن سریع یک ماگمای پرگاز حاصل شده‌اند (Haghnazar et al., 2015). کانی‌های فرعی موجود در این واحد شامل آپاتیت و بیوتیت هستند. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی ترکیب سنگی این واحد بازالت آمیگدالوئیدال است.

سریسیت، سرپانتین، اپیدوت و کانی‌های کدر (اکسیدهای آهن) دگرسان شده‌اند (شکل ۵-B، C و D). کانی‌های ثانویه چون کلسیت و زئولیت حفره‌های موجود در سنگ را پر کرده و بافت بادامکی پدید آورده‌اند (شکل ۵-E). در ادامه فرایند دگرگونی تدفینی، گروهی از کربنات‌های تأخیری مجموعه کانی‌های ماده معدنی و دگرسانی‌ها را قطع کرده‌اند (شکل ۵-F). بافت



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از واحدهای توفی موجود در محدوده دهنه، A و B: کانی‌های فنوکریست موجود در واحد توفی شامل: کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن، پلاژیوکلاز و الیوین همراه با قطعاتی از سنگ بازالتی حاوی کانی‌های پلاژیوکلاز و کدر و C و D: تصاویر میکروسکوپی از دگرسانی‌های موجود در واحد توفی که شامل کلسیت، کلریت، سرپانتین و کانی‌های کدر بوده که از دگرسانی کانی‌های الیوین و پیروکسن به وجود آمده‌اند. تمامی تصاویر در نور دوبار پلاریزه آنکساری گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cpx: کلینوپیروکسن، Opx: ارتوپیروکسن، Pl: پلاژیوکلاز، Oli: الیوین، Opq: کانی‌های کدر، Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Srp: سرپانتین).

Fig. 4. Photomicrographs of tuff units in the Dohneh district, A and B: Phenocryst minerals in the tuff unit which consist of clinopyroxene, Orthopyroxene, Plagioclase and Olivine associated with basaltic fragments containing plagioclase and opaque minerals, and C and D: photomicrographs of alterations minerals in the tuff unit consist of calcite, chlorite, serpentine and opaque minerals which formed by alteration of olivine and pyroxene minerals. All photomicrographs are taken in transmitted XPL. Mineral abbreviations are after Whitney and Evans (2010) (Cpx: clinopyroxene, Opx: Orthopyroxene, Pl: plagioclase, Oli: Olivine, Opq: opaque, Cal: calcite, Chl: chlorite, Srp: serpentine).

قرار گرفته است (شکل ۳-A). این واحد در نمونه دستی به رنگ خاکستری دیده می‌شود. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این واحد

- واحد بازالت پورفیری: این واحد دارای بافت پورفیریتیک بوده و در بخش بالایی واحد گدازه بازالت آمیگدالوئیدال

شامل پلاژیوکلاز، پیروکسن و الیوین در زمینه ریزبلور است (شکل ۶-A). کانی‌های پلاژیوکلاز در این واحد دارای ماکل تکراری هستند و حجم قابل توجهی حداکثر ۴۵ تا ۵۰ درصد از سنگ را شامل می‌شوند. کانی پیروکسن موجود در این واحد، به‌عنوان فنوکریست و شامل دو نوع کلینوپيروکسن و ارتوپيروکسن است (شکل ۶-B، C و D). بلورهای پیروکسن در این واحد نسبت به واحد گدازه بازالتی آمیگدالوئیدال درشت‌تر بوده و با اندازه‌ای در حدود ۳ تا ۵ میلی‌متر، حجم کمتری در حدود حداکثر ۴۰ درصد از سنگ را تشکیل می‌دهند. کانی الیوین در این واحد از بخش‌های مرکزی به طرف حاشیه و همچنین در امتداد شکستگی‌ها به کانی‌های سرپانتین، اپیدوت و کانی‌های کدر (اکسید آهن) دگرسان شده است و حداکثر ۱۰ درصد از حجم سنگ را تشکیل می‌دهد. شدت دگرسانی در این واحد نسبت به گدازه بازالت آمیگدالوئیدال کمتر است. در این واحد نیز همانند واحد گدازه بازالت آمیگدالوئیدال، کانی‌های فرعی چون آپاتیت و بیوتیت مشاهده می‌شوند. کانی‌های ثانویه در این واحد نیز شامل کربنات، کلریت، زئولیت و اپیدوت، سرپانتین و اکسید آهن هستند (شکل ۶-E و F). بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری و میکروسکوپی انجام شده، ترکیب سنگی این واحد بازالت است.

کانه‌زایی، کانی‌شناسی و دگرسانی

کانه‌زایی مس در این منطقه با روند تقریبی جنوب‌باختر-شمال‌خاور به طول ۱۰۰ متر و ضخامت ۲ تا ۳ متر در درون گدازه بازالت پورفیری و بازالت آمیگدالوئیدال به صورت چینه‌کران تشکیل شده است. بر اساس بررسی‌های صحرائی انجام شده در محدوده دهنه، کانه‌زایی مس به صورت رگه-رگچه‌ای، بازماندی، جانشینی و پرکننده فضای خالی در درون واحدهای آتشفشانی ائوسن روی داده است (شکل ۷-A، B، C و D). چنان‌که گفته شد گروهی از توده‌های نفوذی با ترکیب مونزونیتی با سن ائوسن بالایی در جنوب منطقه وجود دارند (Nabatian et al., 2016). با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان اظهار داشت که این توده‌ها در کانه‌زایی منطقه دهنه

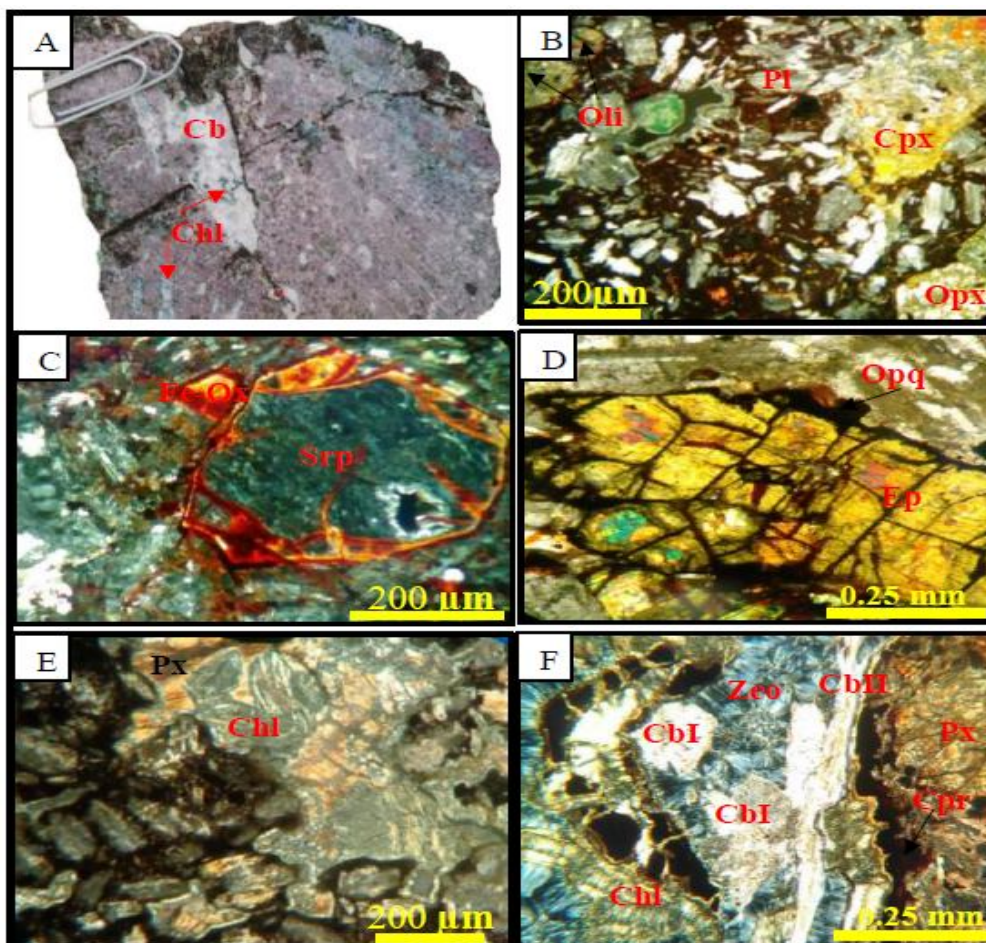
نقشی نداشته‌اند.

کانی‌شناسی ماده معدنی شامل کانی‌های مگنتیت، مس طبیعی، نقره طبیعی و کانی‌های ثانویه شامل کوپریت، مالاکیت و به مقدار کمتر آزوریت است (شکل ۷-A، B، C و D) که با کانی‌های باطله از جمله کربنات، کلریت و زئولیت همراه هستند. کانی‌های اولیه ماده معدنی در این محدوده به صورت رگه-رگچه‌ای و کانی‌های ثانویه نیز به صورت جانشینی و بازماندی در بخش‌های مختلف محدوده معدنی تشکیل شده‌اند.

گسترش دگرسانی‌ها به وجود ساختمان‌های مفیدی چون درزه‌ها، گسل‌ها و شکستگی‌های مختلف در سنگ و واکنش‌پذیری سنگ میزبان بستگی دارد (Salehi et al., 2014). وجود حفره‌های فراوان و درزه‌ها و شکستگی‌ها در سنگ میزبان باعث افزایش واکنش‌پذیری سنگ‌ها می‌شود (Salehi et al., 2014). بر اساس نتایج بررسی‌های صحرائی و میکروسکوپی، دگرسانی‌های تشکیل شده در محدوده معدنی دهنه، مرتبط با کانه‌زایی بوده و محدود به بخش‌های کانه‌دار هستند (شکل ۸). بر اساس بررسی‌های صحرائی و میکروسکوپی، دگرسانی‌های کلریتی، اپیدوتی، زئولیتی، کلسیتی و به مقدار کمتر سرپانتینیتی شدن دگرسانی‌های مهم تشکیل شده در محدوده معدنی دهنه است (شکل ۶-E و F). کانی‌های حاصل از دگرسانی به صورت جانشینی در کانی‌های اصلی سنگ‌های آتشفشانی و پرکننده حفره‌ها و به میزان کمتر به صورت رگچه‌ای دیده می‌شوند. دگرسانی کربناتی در محدوده معدنی دهنه، دارای دو نسل است. این دگرسانی بیشتر در بخش‌های کانه‌دار مشاهده می‌شود. دگرسانی کربناتی نسل اول به صورت پرکننده فضای خالی، همراه با زئولیت حفره‌های موجود در سنگ میزبان را پر کرده است و در طی مرحله دیاژنز تأخیری و دگرگونی تدفینی تشکیل شده است (شکل ۸-A و B). دگرسانی کربناتی نسل دوم به صورت رگچه‌ای در طی مرحله تأخیری کانه‌زایی و بعد از مرحله دگرگونی تدفینی تشکیل شده است و کانی‌های دگرسانی قبلی و کانه‌های ماده معدنی را قطع کرده است (شکل ۸-C). کلریت، اپیدوت، سرپانتین و

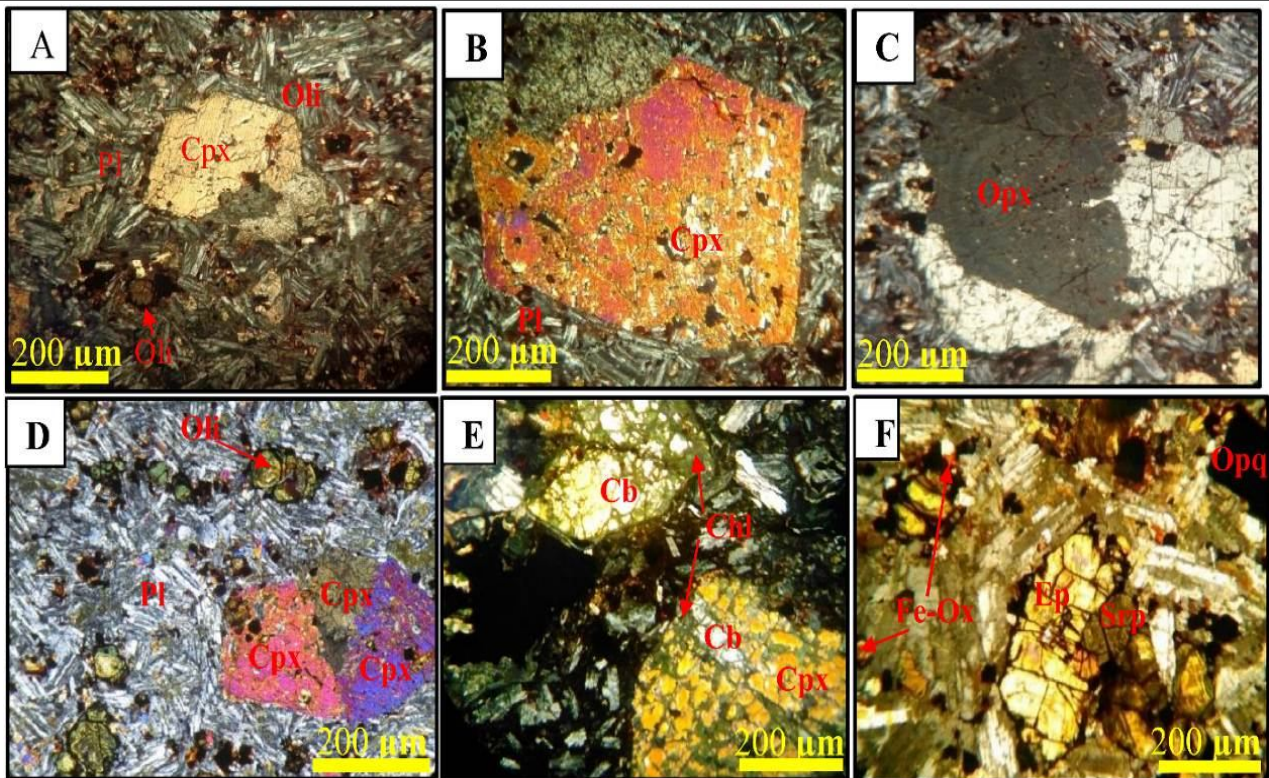
کلریتی به رنگ سبز روشن در بیشتر بخش‌ها به صورت جانشینی در اطراف بخش‌های کربناتی و در برخی موارد به صورت رگچه‌ای دیده می‌شود.

اکسیدهای آهن نیز محصول دگرسانی کانی‌های اصلی سنگ میزبان چون پیروکسن و الیوین است. اپیدوت و سرپانتین از دگرسانی کانی الیوین حاصل شده‌اند (شکل ۵-B).



شکل ۵. A: تصویر نمونه دستی از واحد بازالت آمیگدالوئیدال با بافت حفره‌ای در منطقه دهنه که حفره‌های موجود در آن توسط کربنات و کلریت پر شده است، B: تصاویر میکروسکوپی کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده واحد بازالتی که شامل ارتوپیروکسن، کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز و الیوین است. C، D، E و F: تصاویر میکروسکوپی از دگرسانی‌های موجود در واحد بازالت آمیگدالوئیدال که شامل پیروکسن، کوپریت، کربنات، کربنات تأخیری، کلریت، سرپانتین، اپیدوت، اکسیدهای آهن، کانی‌های اوپک و زئولیت است. تمامی تصاویر در نور دوبار پلاریزه گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است: Cb: کربنات، Chl: کلریت، Opx: ارتوپیروکسن، Cpx: کلینوپیروکسن، Pl: پلاژیوکلاز، Oli: الیوین، Px: پیروکسن، Cpr: کوپریت، Cb(I): کربنات، Cb(II): کربنات تأخیری، Chl: کلریت، Srp: سرپانتین، Ep: اپیدوت، Fe-Ox: اکسیدهای آهن، Opq: کانی‌های اوپک، Zeo: زئولیت).

Fig. 5. A: Hand specimen of an amygdaloidal basaltic lava unit with amygdaloidal texture which filled in the Dohneh area by carbonate and chlorite, B: Photomicrographs of major minerals of basaltic unit which consist of orthopyroxene, clinopyroxene, plagioclase and olivine, C, D, E and F: Photomicrographs of alterations in the amygdaloidal basalt unit, including pyroxene, cuprite carbonate, late-stage carbonate, chlorite, serpentine, epidote, oxides, opaque minerals and zeolite. All photomicrographs are taken in transmitted XPL. Abbreviations are after Whitney and Evans (2010) (Cb: carbonate, Chl: chlorite, Opx: orthopyroxene, Cpx: clinopyroxene, Pl: plagioclase, Oli: olivine, Px: pyroxene, Cpr: cuprite, Cb(I): carbonate, Cb(II): late-stage carbonate, Chl: chlorite, Srp: serpentine, Ep: epidote, Fe-Ox: iron oxides, Opq: opaque minerals, Zeo: Zeolite).



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی از بازالت در محدوده دهنه. A, B, C و D: کانی‌های اصلی بازالت که شامل کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن، پلاژیوکلاز و الیوین هستند، E و F: تشکیل دگرسانی‌های کربنات، کلریت و دگرسانی‌های سرپانتین، اپیدوت و اکسیدهای آهن در بازالت. تمامی تصاویر در نور دوبار پلاریزه گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Opx: ارتوپیروکسن، Cpx: کلینوپیروکسن، Pl: پلاژیوکلاز، Oli: الیوین، Chl: کلریت، Srp: سرپانتین، Ep: اپیدوت، Cb: کربنات، Fe-Ox: اکسیدهای آهن، Opq: کانی‌های اوپک).

Fig. 6. Photomicrographs of porphyritic basalt in the Dohneh district. A, B, C and D: Major minerals of basalt which include clinopyroxene, orthopyroxene, plagioclase, and olivine, E and F: Formation of alteration minerals such as carbonate, chlorite, serpentine, epidote and iron oxide in the basalt. All photomicrographs are taken in transmitted XPL. Abbreviations are after Whitney and Evans (2010) (Opx: orthopyroxene, Cpx: clinopyroxene, Pl: plagioclase, Oli: olivine, Chl: chlorite, Srp: serpentine, Ep: epidote, Cb: carbonate, Fe-Ox: iron oxides, Opq: opaque minerals).

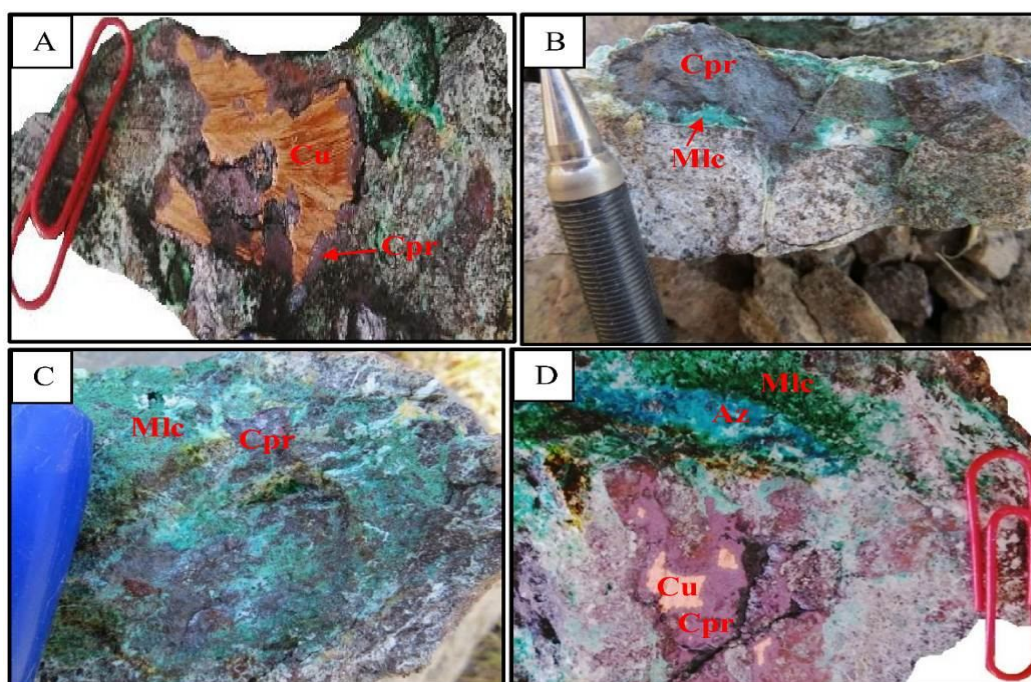
مشاهده می‌شود. پدیده ژئولیتی شدن در منطقه در درون واحدهای آتشفشانی در بخش‌های مختلف زیرپهنه طارم از جمله منطقه تهم مشاهده می‌شود (Zanjani, 2017). بررسی‌های کانه‌نگاری انجام شده بر روی نمونه‌های برداشت شده از بخش‌های کانه‌دار منطقه دهنه، کانی‌شناسی ساده‌ای از ماده معدنی را در این منطقه نشان می‌دهد. بر اساس این مطالعات، کانی‌های مس طبیعی، نقره طبیعی و مگنتیت، کانی‌های اولیه و کانی‌های کوپریت، مالاکیت و به مقدار کمتر آزوریت کانی‌های ثانویه ماده معدنی را در این محدوده تشکیل می‌دهند.

کانی ژئولیت مهم‌ترین کانی مربوط به فرایند دگرگونی تدفینی است که در دماهای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و در فشار حدود ۱ کیلو بار تشکیل می‌شود (Coombs et al., 1959; Cho and Maruyama, 1985). ژئولیت به رنگ سبز تیره با حالت شعاعی در تمامی بخش‌ها به خصوص در اطراف بخش‌های کربناته به وضوح دیده می‌شود (شکل ۸-B و C). دگرسانی ژئولیتی بیشتر در واحدهای گدازه بازالتی آمیگدالوئیدال و به مقدار کم در گدازه بازالت پورفیری دیده می‌شود. این دگرسانی به مقدار کم نیز در واحدهای توفی

نمونه‌های بررسی شده به‌طور متوسط برابر با ۱۰ تا ۲۰ درصد است.

کانی مگنتیت با بافت دانه‌پراکنده یکی دیگر از کانی‌های اولیه این کانسار است که به‌صورت خودشکل تا نیمه‌خودشکل در داخل سنگ میزبان دیده می‌شود (شکل ۹-B). این کانی هم‌زمان با تبلور سنگ میزبان در آن تشکیل شده است. کانی مگنتیت یکی از کانی‌های فرعی موجود در سنگ میزبان کانه‌زایی است که قبل از کانه‌زایی و در حین تبلور سنگ میزبان تشکیل شده است.

کانی‌های ثانویه در اثر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی تشکیل شده‌اند. مس طبیعی با بافت رگه-رگچه‌ای و بازماندی به‌صورت بلورهای متوسط تا درشت و بی‌شکل است که در بیشتر موارد از حاشیه‌های بلوری و همچنین در امتداد شکستگی‌ها به کوپریت تبدیل شده است (شکل ۹-A). در برخی از بخش‌ها، کانی مس به‌طور کامل به کوپریت تبدیل شده و فقط بقایایی جزئی از آن به‌صورت بافت بازماندی (جزیره‌ای) باقی‌مانده است (شکل ۹-A، B، C و D). درصد فراوانی کانی مس در



شکل ۷. تصاویر نمونه دستی از کانه‌زایی مس در منطقه دهنه. A و B: کانی‌زایی مس به‌صورت رگچه‌ای و جانیشینی، C: نمایی از جانیشینی کوپریت توسط مالاکیت که در طی فرایندهای سوپرژن و هوازدگی تشکیل شده است و D: نمایی از جانیشینی مس طبیعی توسط کوپریت، مالاکیت و آزوریت. علائم اختصاری کانی‌ها از اوانز و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cpr: کوپریت، Mlc: مالاکیت، Cu: مس طبیعی، Az: آزوریت).

Fig. 7. Hand specimen photos of copper mineralization in the Dorna region. A and B: Copper mineralization in which formed as veinlets and replacement, C: An overview of cuprite which replaced by malachite during the supergene and weathering process, and D: An overview of the native copper which replaced by cuprite, malachite and azurite. Abbreviations are after Whitney and Evans (2010) (Cpr: cuprite, Mlc: malachite, Cu: native copper, Az: Azurite).

این کانسار به‌شمار می‌آیند که در اثر فرایندهای سوپرژن و اکسیداسیون، جایگزین کانی‌های اولیه مس شده و بافت جانیشینی را تشکیل داده‌اند (شکل‌های ۷ و ۹). بر اساس

نقره طبیعی به‌صورت خودشکل تا نیمه‌شکل دار به‌صورت ادخال در درون کانی مس طبیعی تشکیل شده است (شکل ۹-E). کانی‌های کوپریت، مالاکیت و آزوریت نیز از کانی‌های ثانویه

کلسیت، کلریت، اپیدوت، سرپانتین نیز در این مرحله تشکیل شده‌اند. در این مرحله، زئولیت، کلسیت، کلریت، به‌صورت پرکننده فضای خالی و اپیدوت و سرپانتین به‌صورت جانیشینی تشکیل شده‌اند.

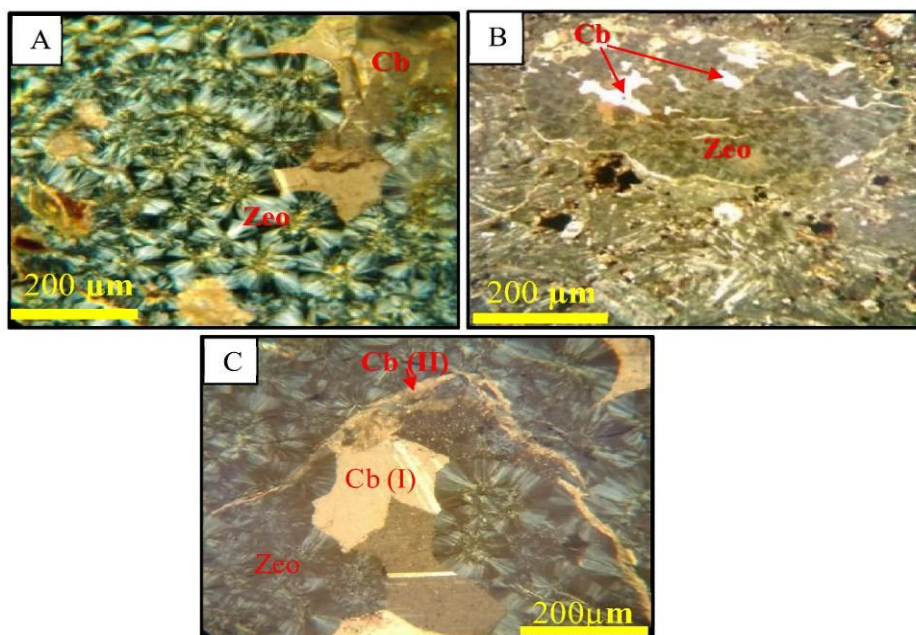
- در طی مرحله سوم که به‌عنوان مرحله تأخیری معرفی شده است، کانی کربنات (کلسیت نسل دوم) به‌صورت رگچه‌ای تشکیل شده است. کربنات تشکیل شده در این مرحله کانی‌های تشکیل شده در طی مراحل قبل و همچنین سنگ میزبان کانه‌زایی را قطع کرده است.

- مرحله چهارم مربوط به فرایندهای سوپرژن و هوازدگی بوده که کانی‌های ثانویه از جمله کوپریت، مالاکیت، اکسیدهای آهن و به مقدار کمتر آزوریت با بافت‌های جانیشینی و رگچه‌ای در این مرحله تشکیل شده‌اند.

بررسی‌های صحرایی، نمونه‌های دستی و میکروسکوپی، توالی پاراژنتیکی کانی‌های موجود در محدوده معدنی دهنه را می‌توان به چهار مرحله دیاژنز، دگرگونی تدفینی، مرحله تأخیری و سوپرژن تقسیم کرد (شکل ۱۰).

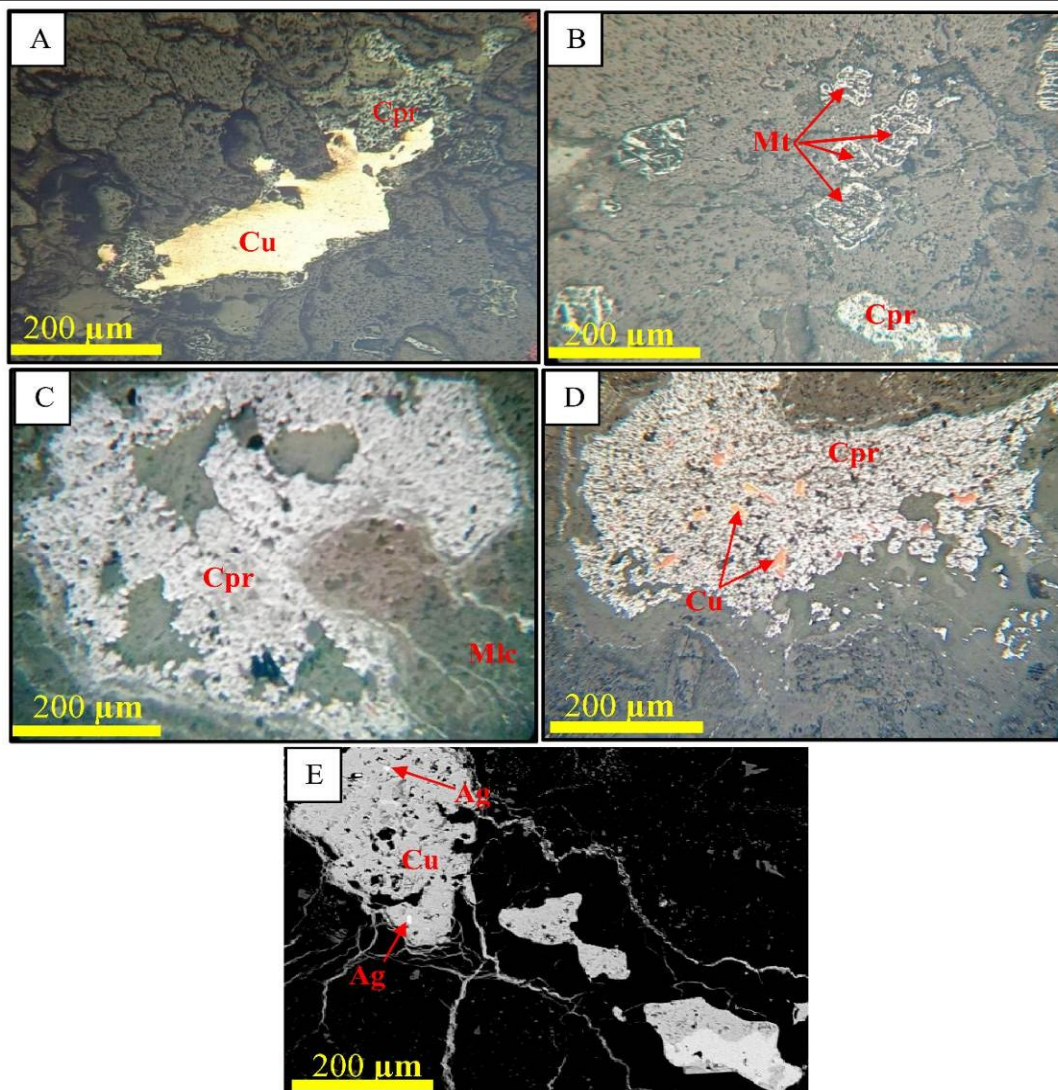
- مرحله اول که مرتبط با فرایند دیاژنز تأخیری است، با حضور مس طبیعی به‌صورت رگه-رگچه‌ای و نقره طبیعی در سنگ میزبان مشخص می‌شود. در این مرحله از کانه‌زایی، کانی‌های دگرسانی از جمله کربنات (کلسیت)، کلریت، اپیدوت و سرپانتین به‌صورت رگه-رگچه‌ای و جانیشینی تشکیل شده‌اند.

- در ادامه مرحله دیاژنز تأخیری، دگرگونی تدفینی در منطقه شروع شده است. مشخصه اصلی این مرحله تشکیل کانی زئولیت در سنگ‌های بازالتی و توفی است. در این مرحله کانه‌زایی ادامه داشته و مس به‌صورت رگه-رگچه‌ای و نقره به‌صورت ادخال در داخل مس تشکیل شده است. در ضمن زئولیت،



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی از دگرسانی‌های تشکیل شده در کانسار دهنه. A و B: دگرسانی‌های زئولیتی و کربنات نسل اول که به‌صورت پرکننده فضای خالی تشکیل شده‌اند و C: تصویر میکروسکوپی از دگرسانی زئولیتی و کربنات اولیه که دگرسانی کربنات تأخیری با بافت رگچه‌ای آنها را قطع کرده است. تمامی تصاویر میکروسکوپی در نور دوبار پلاریزه انکساری گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. Zeo: زئولیتی، Cb (I): کربنات نسل اول، Cb (II): کربنات تأخیری.

Fig. 8. Photomicrographic images of alterations in the Dohneh deposit. A and B: Zeolite and first generation of carbonate alterations, which occurred as veinlet and open space filling, and C: Photomicrographs of zeolite and carbonate alterations which cut by late-stage carbonate. All photomicrographs are taken in transmitted XPL. Abbreviations are after Whitney and Evans (2010) (Zeo: Zeolite, Cb (I): first generation of carbonate, Cb (II): late-stage carbonate).



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپی از کانه‌های تشکیل‌دهنده کانسار دهنه. A: کانی مس طبیعی با بافت رگچه‌ای و کوپریت که جانشین آن شده است، B: مگنتیت با بافت دانه‌پراکنده و کوپریت در سنگ میزبان بازالتی، C: کانی کوپریت و مالاکیت که به‌طور کامل جانشین مس طبیعی شده‌اند، D: کانی مس طبیعی با بافت بازماندی که به کانی کوپریت تبدیل شده است و E: تصویر میکروسکوپی الکترونی (SEM) از نقره طبیعی که به‌صورت ادخال در درون مس طبیعی تشکیل شده است. تصاویر میکروسکوپی در نورپلاریزه انعکاسی گرفته شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cpr: کوپریت، Mlc: مالاکیت، Cu: مس طبیعی، Mt: مگنتیت، Ag: نقره طبیعی).

Fig. 9. Photomicrographs of ore minerals in the Dohneh deposit. A: veinlet of native copper which replaced by cuprite, B: magnetite and cuprite which occurred as disseminated in the host basaltic rock, C: Replacement of native copper by cuprite and malachite, D: native copper with a residual texture which replaced by cuprite, and E: A scanning electron microscope (SEM) of native silver, which formed as inclusion within the native copper. All photomicrographs are taken in reflected PPL. Abbreviations are after Whitney and Evans (2010) (Cpr: cuprite, Mlc: malachite, Cu: native copper, Mt: magnetite Ag: native silver).

روش‌های ICP-MS و XRF تجزیه شده‌اند. نتایج تجزیه‌های نمونه‌های منطقه دهنه در جدول ۱ آمده است.

بررسی‌های ژئوشیمیایی سنگ میزبان کانه‌زایی

برای انجام بررسی‌های ژئوشیمیایی، ۶ نمونه سنگی از سنگ میزبان کانه‌زایی با کمترین مقدار دگرسانی انتخاب و به

Minerals		Stages	Diagenesis	Burial metamorphism	Late stage	Supergene and weathering
Ore	Native Copper		—————	—————		
	Native Silver		- - - - -	- - - - -		
	Cuprite					—————
	Malachite					—————
	Azurite					—————
Gangue	Iron oxide					—————
	Chlorite		—————	—————		
	Epidote		—————	—————		
	Carbonate I		—————	—————		
	Carbonate II				—————	
	Zeolite			—————		
	Serpentine		- - - - -	—————		
Textures	Vein-Veinlet		—————	—————		
	Replacement		—————	—————		
	Open space filling		- - - - -	—————		
	Residual					—————

شکل ۱۰. توالی همیافتی کانی‌های معدنی و مواد باطله در کانسار دهنه

Fig 10. Paragenesis sequence of ore and gangue minerals in the Dohneh deposit

پتروژنز و جایگاه تکتونوماگمایی انواع ماگماها استفاده شده است. نمودارهای محیط‌های زمین‌ساختی بیشتر بر اساس تغییرات عناصر کمیاب تهیه شده است و در آن از عناصر غیرمتحرک چون عناصر HFSE (Ti, P, Yb, Nb, Zr) که در سیالات غیرمتحرک بوده و تحت شرایط گرمایی، هوازدگی و در درجه‌های بالای دگرگونی پایدار هستند، استفاده می‌شود. در این بخش از نمودارهای متمایزکننده با توجه به کاربرد آنها در سنگ‌های آذرین استفاده شده است.

نمودار سه‌تایی $Ti/100-Zr-3Y$ (Pearce and Cann, 1973)، بر اساس مقادیر عناصر کمیاب و اصلی طراحی شده است که برای تعیین موقعیت زمین‌ساختی انواع بازالت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدوده‌های موجود در این نمودار شامل بازالت‌های درون صفحه‌ای، تولیت‌های جزایر کمانی و بازالت‌های کالک‌آلکان هستند. بر اساس این نمودار، نمونه‌های منطقه دهنه در محدوده بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی و بازالت‌های کالک‌آلکان و تولیت‌های جزایر کمانی قرار می‌گیرند (شکل ۱۲-A).

نام‌گذاری سنگ‌های آتشفشانی بر اساس ترکیب شیمیایی

بر اساس نمودارهای Zr/Ti در مقابل Nb/Y (Pearce, 1996) و Na_2O+K_2O در مقابل SiO_2 (Cox et al., 1979)، سنگ‌های آتشفشانی منطقه دهنه در محدوده بازالت (شکل ۱۱-۱) قرار می‌گیرند. همچنین بر اساس مقادیر Co و Th در نمودار (Hastie et al., 2007) همه نمونه‌ها از نوع کالک‌آلکان (شکل ۱۱-C) هستند. سنگ‌های آتشفشانی کالک‌آلکان محصولات عمده محیط‌های زمین‌ساختی مرزهای صفحات هم‌گرا هستند (Harangi and Lenkey, 2007).

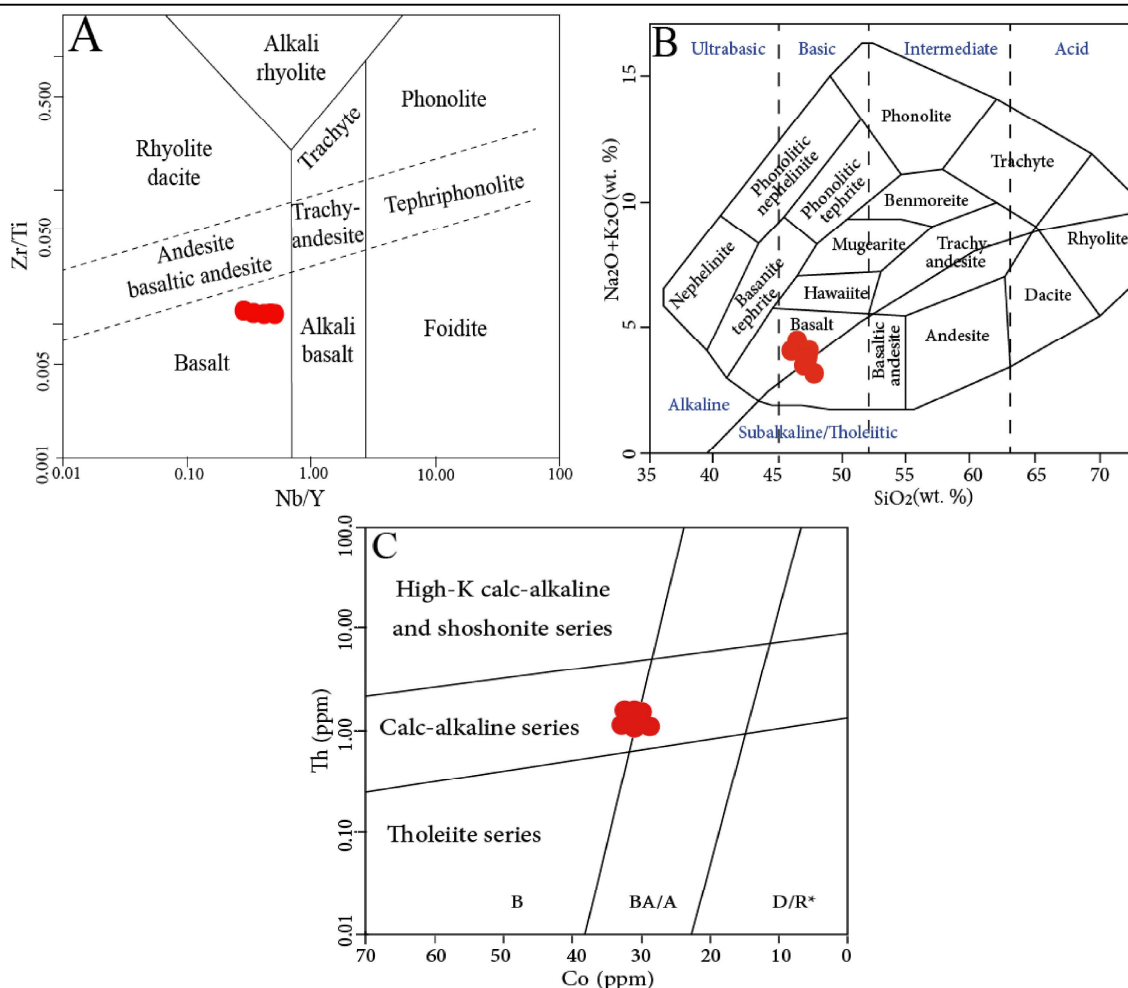
پتروژنز و خاستگاه تکتونوماگمایی سنگ‌های آتشفشانی دهنه

از آنجا که ارتباط خاصی بین شیمی عناصر اصلی و عناصر کمیاب با منشأ و محیط زمین‌ساختی سنگ‌های آذرین وجود دارد، بر همین اساس از نمودارهای ژئوشیمیایی برای تعیین

ادامه جدول ۱. نتایج تجزیه ژئوشیمیایی نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه دهنه، مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی برحسب wt.% و مقادیر عناصر نادر خاکی و عناصر کمیاب برحسب (ppm) ارائه شده‌اند. نمونه‌های مربوط به بازالت پورفیری شامل DH-6, DH-7, DH-11, DH-13 و نمونه‌های مربوط به بازالت آمیگدالوئیدال شامل DH-9, DH-14 هستند.

Table 1 (Continued). Geochemical results of volcanic rocks from the Dohneh district, the content of major oxides are given by wt. %, and the content of the rare earth and trace elements are given by ppm. The porphyritic basalt samples are DH-6, DH-7, DH-11 and DH-13 and the amygdaloidal basalt samples are DH-9 and DH-14.

Elenent	DH-6	DH-7	DH-9	DH-11	DH-13	DH-14
K	18635	19534	21083	20145	19988	20485
La	17	18	18	18	18	19
Li	9	10	10	9	6	7
Lu	0.3	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28
Mg	>2%	>2%	>2%	>2%	>2%	>2%
Mn	1323	1280	1511	1071	894	1118
Mo	0.3	0.2	0.2	<0.1	0.4	0.3
Na	17455	17760	18091	18154	18561	19018
Nb	8.5	8.3	7.6	7.5	6.9	7.1
Nd	17.8	17.3	17.9	17.7	17.6	17.6
Ni	26	25	26	24	24	25
P	1434	1448	1510	1505	1520	1528
Pb	24	77	22	23	12	13
Pr	3.71	3.62	3.76	3.73	3.73	3.75
Rb	36	36	40	39	39	39
S	58	75	<50	<50	52	<50
Sb	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Sc	28	28	28.5	28.4	27.7	27.2
Se	1.03	0.87	1.01	1.07	0.74	0.79
Sm	4.11	3.91	3.99	4	4	4.04
Sn	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1
Sr	668.3	687.1	717.2	680	697.9	694
Ta	0.47	0.51	0.46	0.46	0.41	0.38
Tb	0.66	0.63	0.65	0.64	0.64	0.65
Te	1.32	0.75	0.52	0.36	0.56	0.33
Th	1.38	1.19	1.11	1.07	1.04	1.03
Ti	6759	6894	6957	6941	6841	6961
Tl	0.11	0.11	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Tm	0.34	0.33	0.33	0.32	0.32	0.33
U	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
V	260	263	266	263	255	260
W	1.2	1.1	<1	<1	<1	<1
Y	20.8	20.2	20.6	20.5	20.6	20.6
Yb	3.6	3.6	3.8	3.7	3.7	3.8
Zn	99	120	111	111	89	90
Zr	81	83	84	84	83	85
Eu/Eu*	0.983	0.995	1.013	1.0170	0.995	0.994
Th/Nb	0.162	0.143	0.146	0.143	0.151	0.145
(La/Yb) _N	3.191	3.379	3.200	3.287	3.287	3.379



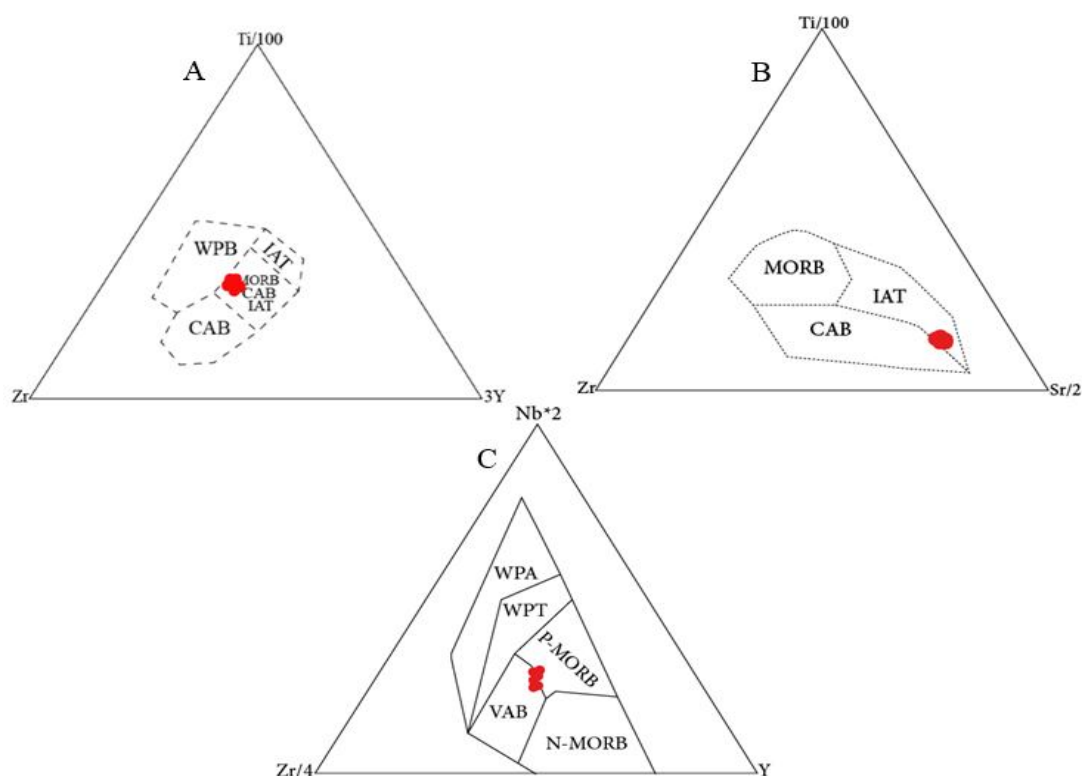
شکل ۱۱. A و B: طبقه‌بندی ژئوشیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه دهنه با استفاده از نمودار پیرس (Pearce, 1996) و کاکس و همکاران (Cox et al., 1979)، چنان‌که مشاهده می‌شود، تمامی نمونه‌ها در محدوده بازالت قرار می‌گیرند و C: موقعیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه دهنه بر روی نمودار هستی و همکاران (Hastie et al., 2007) نشان داده شده است.

Fig. 11. A and B: Geochemical classification of volcanic rocks in the Dohneh area by using the Pearce (1996) and Cox et al. (1979) diagrams, as shown in these diagrams all samples fall within the basaltic composition field, and C: The position of volcanic rocks in the Dohneh area is shown in the Hastie et al. (2007) diagram.

محیط‌های زمین‌ساختی و انواع بازالت‌ها شامل بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی غنی‌شده، بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی عادی، بازالت‌های کمان ماگمایی، بازالت‌های درون صفحه‌ای و تولیت‌های درون صفحه‌ای را از هم متمایز می‌کند. موقعیت نمونه‌های منطقه دهنه در این نمودار در محدوده بین بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی غنی‌شده و بازالت‌های کمان ماگمایی قرار می‌گیرد (شکل ۱۲-C).

نمودار سه‌تایی $Ti/100-Zr-Sr/2$ (Pearce and Cann, 1973) محیط‌های زمین‌ساختی و انواع بازالت‌ها چون بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی و تولیت‌های جزایر کمانی و بازالت‌های کالک‌آلکالن را از هم متمایز می‌کند. نمونه‌های منطقه دهنه در این نمودار نیز در محدوده بین تولیت‌های جزایر کمانی و بازالت‌های کالک‌آلکالن قرار می‌گیرند (شکل ۱۲-B).

نمودار سه‌تایی $2Nb-Zr/4-Y$ (Meschede, 1986)



شکل ۱۲. A: نمودار $Ti/100-Zr-3Y$ (Pearce and Cann, 1973) و موقعیت نمونه‌های منطقه دهنه بر روی آن، B: نمودار $Ti/100-Zr-Sr/2$ (Pearce and Cann, 1973) و موقعیت نمونه‌های منطقه دهنه بر روی آن، C: نمودار $2Nb-Zr/4-Y$ (Meschede, 1986) و موقعیت نمونه‌های منطقه دهنه بر روی آن

Fig. 12. A: $Ti/100-Zr-3Y$ diagram (Pearce and Cann, 1973) and the position of the Dohneh samples on them, B: $Ti/100-Zr-Sr/2$ (Pearce and Cann, 1973) diagram and the location of the Dohneh samples on them, and C: $Nb-Zr/4-Y$ diagram (Meschede, 1986) and the location of the Dohneh samples on them

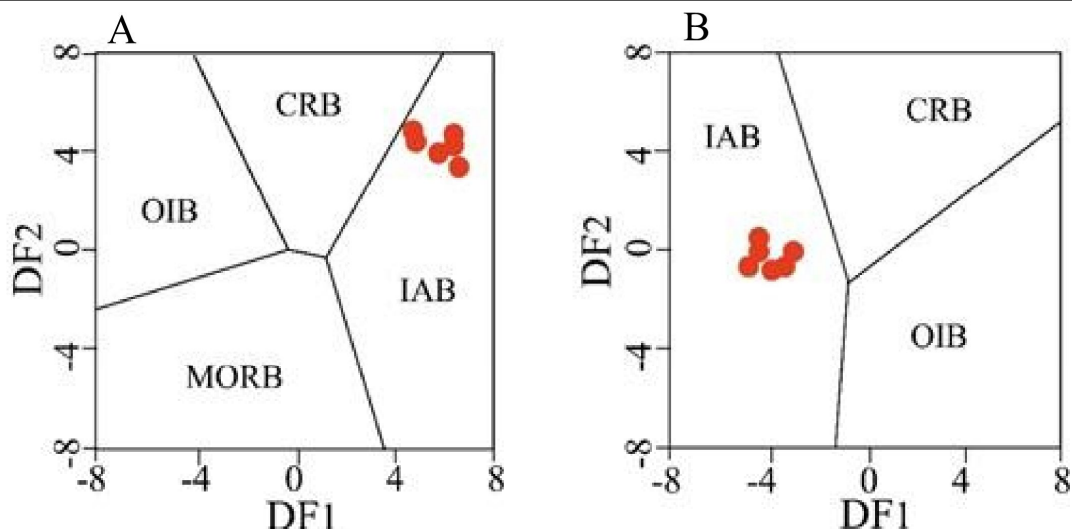
روی نمودار Nb/Y در مقابل Zr/Y (Condie, 2005) تصویر شده‌اند.

چنان‌که در این نمودار مشاهده می‌شود، نمونه‌های بالا در این نمودار اغلب در محدوده بازالت‌های مرتبط با زون فرورانش قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴).

برای تعیین ترکیب و درجه ذوب‌بخشی سنگ منشأ از نمودار Sm/Yb در مقابل Sm استفاده شده است. موقعیت نمونه‌های مورد بررسی در این نمودار نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد بررسی بر روی منحنی اسپینل-لرزلولیت قرار گرفته‌اند و به نظر می‌رسد که ماگمای سازنده این سنگ‌ها از ذوب‌بخشی درجه کم (در حدود ۲ تا ۳ درصد) از منبعی گوشته‌ای با ترکیب اسپینل-لرزلولیت منشأ گرفته باشند (شکل ۱۵).

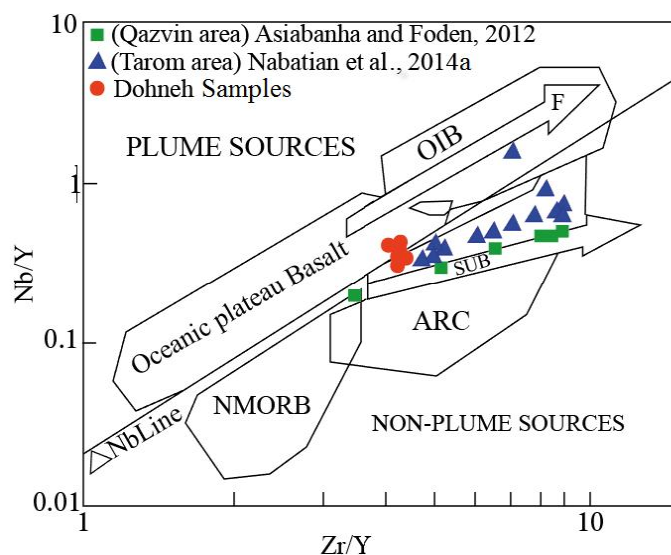
موقعیت نمونه‌های منطقه دهنه بر روی نمودارهای موقعیت زمین‌ساختی سنگ‌های بازیگ (Verma et al., 2006) که محیط‌های مختلف زمین‌ساختی را از هم متمایز می‌کنند، نمایش داده شده است (شکل ۱۳). نمونه‌های منطقه دهنه در این نمودارها در محدوده بازالت‌های مرتبط با فرورانش و جزایر کمائی قرار می‌گیرند (شکل ۱۳-A و B).

نمودار Nb/Y در مقابل Zr/Y توسط کاندی (Condie, 2005) برای تمایز بازالت‌های مشتق‌شده در محیط‌های مختلف زمین‌ساختی تهیه شده است. در شکل ۱۵ نمونه‌های منطقه دهنه به همراه داده‌های منتشرشده از واحدهای آتشفشانی ائوسن البرز شامل سنگ‌های آتشفشانی در ناحیه قزوین (Asiabanha and Foden, 2012) و منطقه طارم (Nabatian et al., 2014b) بر



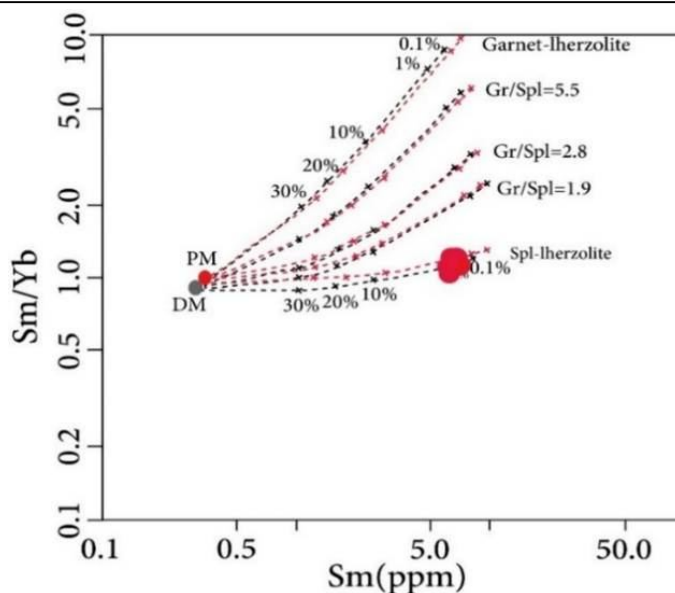
شکل ۱۳. A و B: نمودار موقعیت زمین‌ساختی سنگ‌های اولترابازیک و بازیک و موقعیت نمونه‌های منطقه دهنه تصویر شده بر روی آنها (Verma et al., 2006). مؤلفه‌های DF1 و DF2 بر اساس روابط ارائه شده توسط ورما و همکاران (Verma et al., 2006) محاسبه شده‌اند. علائم اختصاری عبارتند از: island arc basic rocks (IAB) continental rift basic rocks (CRB), ocean-island basic rocks (OIB), mid-ocean ridge basic rocks (MORB).

Fig. 13. A and B: Geotechnical diagram of ultrabasic and basic rocks and position of the Dohneh samples within these diagrams (Verma et al., 2006). DF1 and DF2 parameters have been calculated by Verma et al. (2006). Abbreviations include: island arc basic rocks (IAB), continental rift basic rocks (CRB), ocean-island basic rocks (OIB), mid-ocean ridge basic rocks (MORB).

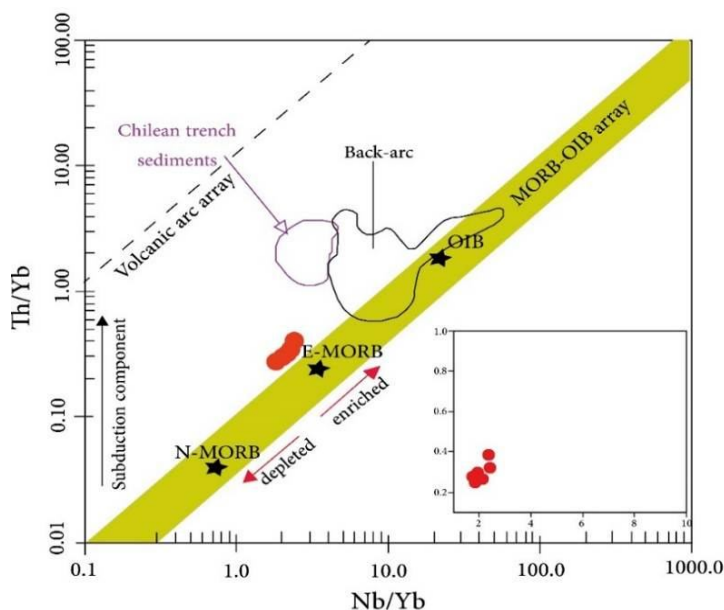


شکل ۱۴. نمودار $Zr/Y - Nb/Y$ (Condie, 2005) و موقعیت نمونه‌های مورد بررسی بر روی آنها به همراه داده‌های واحدهای آتشفشانی ناحیه قزوین (Asiabanha and Foden, 2012) و طارم (Nabatian et al., 2014b). فلش‌ها اثرات ذوب‌بخشی (F) و فرایند فرورانش (SUB)، بازالت‌های مرتبط با کمان (ARC)، بازالت‌های میان اقیانوسی عادی (N-MORB)، بازالت‌های جرایز اقیانوسی (OIB) را نمایش می‌دهند.

Fig. 14. Nb / Y-Zr / Y diagram (Condie, 2005) and the location of the studied samples on them associated with the data of the volcanic units from the Qazvin (Asiabanha and Foden, 2012) and Tarom areas (Nabatian et al., 2014b). The arrows display the effects of melting (F), subduction (SUB), arc-related basalts (ARC), normal mid ocean ridge basalts (N-MORB) and oceanic island basalts (OIB).



شکل ۱۵. نمودار Sm/Yb در مقابل Sm و موقعیت سنگ‌های آتشفشانی دهنه بر روی آن (Aldanmaz et al., 2000)
Fig. 15. Sm/Yb versus Sm diagram and location of the Dohneh volcanic rocks on it (Aldanmaz et al., 2000)



شکل ۱۶. موقعیت نمونه‌های منطقه دهنه بر روی نمودار Th/Yb-Nb/Yb (Pearce, 2008)
Fig. 16. Position of the Dohneh samples on the Th/Yb-Nb/Yb diagram (Pearce, 2008).

بر طبق این نمودار، نمونه‌های منطقه دهنه دارای روند کمان ماگمایی و نزدیک به پشته غنی شده قرار می‌گیرند (شکل ۱۶).

نمودار Nb/Yb-Th/Yb (Pearce, 2008) بازالت‌های مرتبط با جزایر اقیانوسی، پشته میان اقیانوسی غنی شده^۱، پشته عادی^۲ و همچنین کمان‌های ماگمایی را از هم متمایز می‌کند (شکل ۱۶).

1. Enriched mid-ocean ridge basalts: E-MORB
 2. Normal mid-ocean ridge basalts: N-MORB

(al., 2001; Nagudi et al., 2003; Shang et al., 2004)، (۳) کمبود این عنصر در منشأ، پایداری فازهای حاوی این عناصر در طی ذوب‌بخشی و جدایش این عناصر در طی فرایند تفریق. در محیط‌های فرورانش عناصر LILE چون Sr، Ba و Rb برخلاف عناصر HFSE چون Ta، Ti و Nb که در صفحه فرورونده باقی می‌مانند، به راحتی به بخش‌های بالاتر گشته منتقل می‌شوند (Pearce, 1983). بر این اساس، غنی‌شدگی سنگ‌ها از Sr، Pb، U، Rb و Ba ماهیت فرورانشی این سنگ‌ها را نشان می‌دهد که به دلیل تحرک بالای این عناصر است. Sr عنصری است که به راحتی جانشین عنصر Ca در پلاژیوکلازها می‌شود، آنومالی مثبت این عنصر در سنگ‌های مورد بررسی، نشان‌دهنده محتوای بالایی از Ca و Sr در پلاژیوکلازهای این سنگ‌هاست. آنومالی مثبت Cs احتمالاً ناشی از آلودگی ماگمای اولیه با پوسته زیرین است (Wilson, 1989). غنی‌شدگی و آنومالی مثبت U می‌تواند نشان‌دهنده افزوده شدن رسوبات پلاژیوک و یا پوسته اقیانوسی دگرسان شده به منبع ذوب‌بخشی باشد (Fan et al., 2003). آنومالی مثبت Pb در نمونه‌های منطقه دهنه نیز می‌تواند به متاسوماتیسم گوه گشته‌ای توسط سیالات ناشی از پوسته اقیانوسی فرورونده و یا آرایش ماگماها با سنگ‌های پوسته قاره‌ای ارتباط داشته باشد (Kamber et al., 2002). نبود آنومالی منفی Eu در سنگ‌های مورد بررسی بیانگر نبود این کانی در منبع ذوب و همچنین عدم فرایند تفریق گسترده آن در ماگماهای سازنده واحدهای منطقه است. تشابه روندهای مشاهده شده برای واحدهای آتشفشانی منطقه بیانگر ذوب‌بخشی از منبعی مشترک برای مذاب‌های بالاست.

نوع کانه‌زایی

با توجه به ویژگی‌های بیان شده از کانه‌زایی مس در منطقه دهنه، برای بررسی و تعیین نوع کانه‌زایی مس در این منطقه، در ادامه

الگوی عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) در بخش‌های کانه‌دار منطقه دهنه

در بررسی الگوی تغییرات عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه برای نمونه‌های منطقه دهنه، از مقادیر گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) استفاده شده است (شکل ۱۷). بر اساس این نمودارها، نمونه‌های مورد بررسی از عناصر لیتوفیل بزرگ یون^۱ و عناصر کمیاب سبک^۲ غنی‌شدگی نشان داده‌اند و از عناصر با شدت میدان بالا^۳ تهی‌شدگی نسبی نشان می‌دهند (شکل ۱۷-A و B).

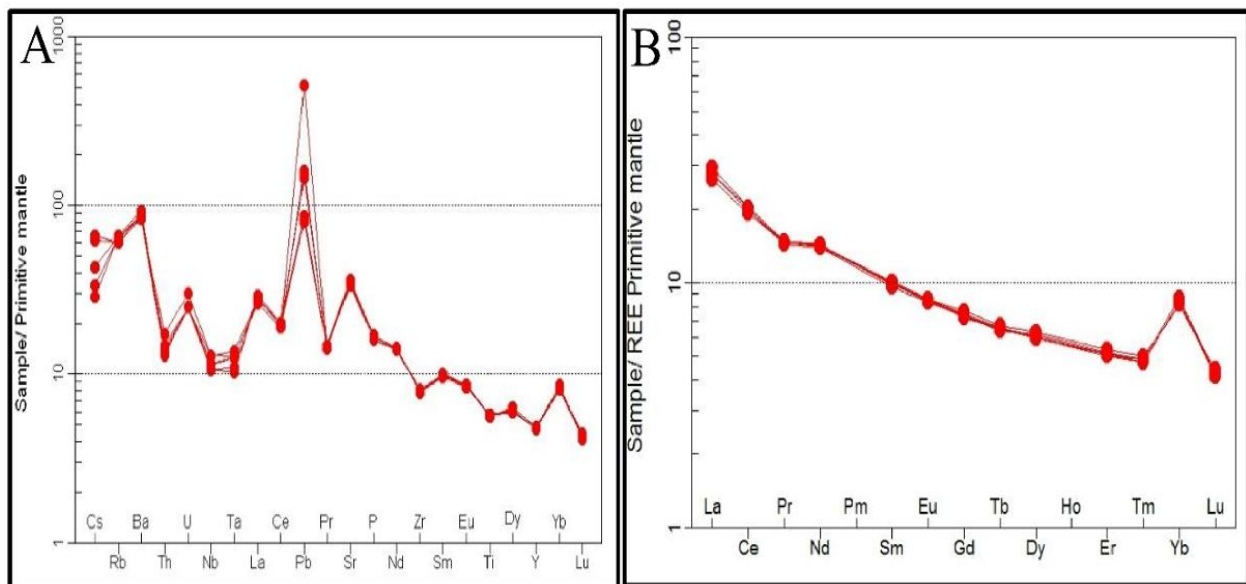
غنی‌شدگی از عناصر LILE و LREE و تهی‌شدگی از عناصر HFSE می‌تواند ناشی از درجه پایین ذوب‌بخشی و بالابودن عناصر LREE در منشأ سنگ باشد (Le March et al., 1987). درجه‌های پایین ذوب‌بخشی به همراه آلودگی پوسته‌ای از مهم‌ترین عوامل غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE محسوب می‌شوند. بالابودن عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین از ویژگی‌های بارز سنگ‌های کمان آتشفشانی مناطق فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای است (Wilson, 1989; Brewer et al., 1998; Machado et al., 2005). آنومالی منفی عناصر Ta، Ti و Nb در سنگ‌های آذرین نشان‌دهنده تشکیل ماگما در یک محیط حاشیه فعال قاره‌ای است که تحت تأثیر آلودگی پوسته‌ای و سیالات آزاد شده از لیتوسفر فرورونده قرار گرفته است (Aldanmaz et al., 2000). عوامل زیر در ایجاد آنومالی منفی عناصر Ta، Ti و Nb مؤثر هستند:

- ۱) ماگماتیسم مرتبط با فرایندهای فرورانش (Kuster and Harms, 1988; Wilson, 1989; Vetrin and Rodionov, 2008; Hongyan et al., 2009)
- ۲) مشارکت سنگ‌های پوسته قاره‌ای در فرایندهای ماگمایی (Saunders et al., 1992; Rollinson, 1993; Dostal et al., 2000)

1. Large Ion Lithophile Elements: LILE
2. Light Rare Earth Elements: LREE
3. High Field Strength Elements: HFSE

کانسار مس دهنه شامل گدازه بازالتی حفره‌دار است. در کانسارهای نوع میشیگان کانی مس طبیعی با بیشترین میزان به‌عنوان کانه اصلی محسوب می‌شود و میزان کانی‌های سولفیدی مس چون کالکوسیت در این کانسارها پایین است. در کانسارهای نوع مانتو و آتشفشانی-لایه‌ای سرخ میزان مس طبیعی پایین بوده و بیشترین حجم کانه‌زایی مربوط به کانی‌های کالکوسیت، کالکوپریت، بونیت و مالاکیت است. در کانسار مس دهنه، مس طبیعی کانی اصلی بوده و کانی‌های کوپریت، مالاکیت و به مقدار کمتر آزوریت به‌عنوان کانی‌های ثانویه محسوب می‌شوند. مقایسه سه نوع کانه‌زایی مس (میشیگان، سرخ آتشفشانی و مانتو) با رخدادهای معدنی مس دهنه نشان می‌دهد که کانسار مس دهنه بیشترین شباهت را به کانسارهای مس نوع میشیگان دارد (جدول ۳). در جدول ۳، کانسار مس دهنه با کانسارهای مس نوع میشیگان در ایران مقایسه شده است.

به بررسی انواع کانه‌زایی‌های مس با میزبان سنگ‌های آتشفشانی در جهان پرداخته شده است. در جدول ۲، ویژگی‌های این کانسار با کانسارهای مس نوع مانتو، میشیگان و کانسارهای مس در توالی آتشفشانی-لایه‌ای سرخ مقایسه شده است. از ویژگی‌های مهم این کانسارها می‌توان به نوع کانه‌زایی، نوع سنگ میزبان و نوع دگرسانی اشاره کرد. با توجه به نوع سنگ میزبان، کانه‌زایی در کانسارهای میشیگان در سنگ‌هایی با ترکیب بازالت‌های تولیتی حفره‌دار و کنگلومرا رخ داده است (Guilbert and Park, 1986, 2007). کانسارهای مس نوع آتشفشانی-لایه‌ای سرخ دارای سنگ میزبانی شامل گدازه مافیک تا فلسیک (گدازه‌های بادامکی)، توف برشی و سنگ‌های رسوبی است (Guilbert and Park, 1986., Kirkham, 1996). کانسارهای مس نوع مانتو نیز دارای سنگ میزبان با ترکیب گدازه بازالتی و آندزیتی هستند (Sato, 1984., Kojima et al., 2003). سنگ میزبان کانه‌زایی در



شکل ۱۷. الگوی عناصر فرعی و کمیاب خاکی بهنجار شده نسبت به داده‌های گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه دهنه. A: الگوی عناصر کمیاب و فرعی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه، و B: الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه

Fig. 17. Primitive mantle normalized of trace and rare earth elements pattern (McDonough and Sun, 1995) for the Dohneh volcanic rocks. A: Pattern of primitive mantle normalized for trace and rare earth elements, and B: Pattern of primitive mantle normalized for rare earth elements

جدول ۲. مقایسه کانسار مس دهنه با کانسارهای نوع مانتو، میشیگان و آتشفشانی-لایه‌ای سرخ

Table 2. Comparison of Dohne copper deposit with Manto, Michigan and Volcanic-Red Bed type deposit.

Characteristics	Volcanic red-bed copper deposits	Manto type copper deposits	Michigan type copper deposits	Dohne copper deposit
Location	North America	Chile (Yuen Esperanza deposit)	Keweenaw Island, United States	NE Zanjan, Iran
Host rock	Volcanio-sedimentary rocks, basalt	Basaltic and andesitic lavas	Amygdaloidal basalt with interlayers of conglomerate	Amygdaloidal basalt
Magmatic affinity	Mafic and felsic lavas	Calc-alkaline series (alkaline)	Tholeites series (sub-alkaline)	Calc- alkaline series, high potassium, shoshonite
Tectonic setting	Continental volcanics to marine and shallow marine	Continental volcanic	Mid- continental rift	Back arc
Mineral paragenesis	Pyrite, chalcocite, bornite, native copper	Chalcocite, bornite, chalcopyrite, native copper, malachite	Native copper, cuprite, malachite, chrysocolla, native silver, chalcocite	Native copper, native silver, cuprite, malachite, azureite
Ore texture	Veins, Disseminated, concordant and non concordant	Veins, open space filling	Spray, open space filling	vein-veinlet, replacement, open space filling
Alteration assemblage	Albite, quartz, epidote, chlorite, zeolite	Chlorite, albite, quartz, epidote	Calcite, chlorite-epidote quartz, pompulet, zeolite	Calcite, chlorite, zeolite, epidote
Age of mineralization	Silurian	Jurassic	Paleozoic	Eocene
Reference	Kirkham, 1996; Cabral and Beaudoin, 2007	Sillitoe, 1977; Ramirez et al., 2006	Cornwall, 1956; Brown, 1971; Rosemeyer, 2011; Bornhorst and Barron, 2011	Present study

جدول ۳. مقایسه کانسار مس دهنه با کانسارهای مس نوع میشیگان در ایران

Table 3. Comparison of Dohneh copper deposit with Michigan type copper deposits in Iran

Characteristics	Abbasabad copper deposit	Ghebleh bolagh copper deposite	Darhand copper deposit	Garmabe paein Cu deposit	Dohneh copper deposit
Location	Northwest of Qazvin	Southeast of Zanjan	Natanz	Southeast of Shahroud	Northeast of Zanjan
Host rock	Andesite-basalt	Amygdaloidal basalt	Amygdaloidal basalt	Trachyandesite and andesite-basalt	Amygdaloidal basalt
Mineral paragenesis	Native copper, cuprite, malachite	Native copper, tenorite malachite, azureite, hematite	Native copper, cuprite, tenorite malachite, a little pyrite	Native copper, cuprite, malachite	Native copper, native silver, cuprite, malachite, azureite
Ore texture	Veins, open space filling	Spray, open space filling	Veins	Vein-veinlet, disseminated	Vein-veinlet, open space filling
Alteration assemblage	Zeolite, quartz, calcite, chlorite	Epidote, prehnite, pompulet, quartz, chlorite, calcite	Zeolite, prehnite pompulet	Chlorite, zeolite	Calcite, chlorite, zeolite, epidote
Age of mineralization	Paleocene	Paleocene	Middle to Upper Paleocene	Probably late Paleocene	Eocene
Reference	Moradi, 2012	Behzadi, 1995	Nezafati et al., 2006	Tashi et al., 2016	Present study

نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های صحرائی و آزمایشگاهی انجام‌شده و بررسی ویژگی‌های کانسار مس دهنه از جمله کانی‌شناسی، ساخت و بافت، دگرسانی، سنگ میزبان، محیط زمین‌ساختی و مقایسه این کانسار با کانسارهای مس با میزبان آتشفشانی در جهان می‌توان اظهار داشت این کانسار بیشترین شباهت را با کانسارهای مس نوع میشیگان دارد. البته شایان ذکر است که برای اثبات نوع کانه‌زایی در منطقه دهنه، علاوه بر موارد بیان‌شده، نیاز به بررسی میان‌بارهای سیال و ژئوترموتری ایزوتوپ‌های پایدار است. کانه‌سازی در منطقه دهنه به صورت

استراتی‌باند بوده و اغلب به صورت جانشینی و رگچه‌ای در داخل سنگ میزبان بازالتی رخ داده است. کانی‌شناسی ماده معدنی در کانسار مس دهنه شامل مس طبیعی، نقره طبیعی، کوپریت، مالاکیت و آزوریت است که به صورت اپی‌ژنتیک در سنگ میزبان بازالتی رخ داده است. ساخت و بافت این رخداد معدنی به صورت رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی، جانشینی و بازماندی است. در سنگ میزبان بازالتی، بافت‌های بادامکی و آمیگدالوئیدال نیز مشاهده می‌شوند. عمده‌ترین دگرسانی‌های رخ داده در این کانسار شامل کربنات، کلریت، ژئولیت و سرپانتینیته به مقدار کمتر اپیدوت است که

در اواخر مرحله دیاژنز و به‌ویژه در مرحله دگرگونی تدفینی به‌همراه ژئولیت (دگرسانی ژئولیتی) تشکیل شده‌اند. در طی این مراحل، دگرسانی‌های کلریتی، کربناتی و به مقدار کمتر اپیدوتی نیز تشکیل شده‌اند. در مراحل پایانی کانه‌زایی و در طی بالآمدگی، آب‌های جوی اکسیژن‌دار بر روی کانی‌های اولیه ماده معدنی (مس طبیعی) تأثیر گذاشته و باعث تشکیل کانی‌های ثانویه از جمله کوپریت، مالاکیت و آزوریت شده‌اند. در طی این مرحله، بافت‌های جانشینی و بازماندی تشکیل شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، می‌توان اظهار داشت که کانسار مس دهنه از نظر سنگ میزبان، کانی‌شناسی سنگ میزبان و ماده معدنی، دگرسانی و محیط تشکیل، شباهت زیادی با کانسارهای مس نوع میشیگان دارد. با توجه به گستردگی زیاد سازند کرج در پهنه البرز، می‌توان اظهار داشت که بررسی این کانسار می‌تواند به اکتشاف کانسارهای مشابه در این پهنه منجر شود.

به‌صورت جانشینی، رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی در کانی‌های اصلی سنگ میزبان تشکیل شده‌اند.

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در این محدوده، در طی مراحل دیاژنز و دگرگونی تدفینی، سیالات کانه‌زایی و شورابه‌های داغ در این بخش‌ها تشکیل شده‌اند. در طی چرخش این سیالات از طریق شکستگی‌ها و گسل‌ها به سمت بالا و بخش‌های مختلف سنگ میزبان، فلز مس و نقره از ساختمان سیلیکات‌ها شسته شده و در داخل سیالات به چرخش درآمده است. چنان‌که در بررسی‌های کانه‌نگاری و الکترون مایکروپروب نیز مشخص شده است، کانی‌شناسی اصلی در منطقه دهنه، مس و نقره طبیعی است. چنان‌که مشاهده می‌شود کانی سولفیدی مس در این منطقه دیده نشده است. نبود کانی سولفیدی در این منطقه بیانگر نسبت بالای فلز به گوگرد است یا به عبارت دیگر فشاربخشی گوگرد در این کانسار پایین بوده است. در ادامه این روند با تزریق سیالات کانه‌دار به داخل شکستگی‌ها و فضاها خالی در سنگ‌های میزبان و با کاهش فشار، کانی‌های مس و نقره طبیعی

References

- Abbaspour, N., 2017. Petrography and geochemistry of Gheshlagh Cu deposit and its host rocks, north of Zanjan. M.Sc. thesis, Zanjan University, Zanjan, Iran, 76 pp.
- Amini, B., 2000. Tarom Geology Map with a scale of 1/100000, review and standard from the Hirayama et al map. Geological Survey of Iran.
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo- Ththys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 103(8): 983-992.
- Asiabanha, A. and Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcanosedimentary Basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. Lithos, 148(1): 98-111.
- Aldanmaz, E., Pearce J.A., Thirlwall, M.F. and Mitchell, J.G., 2000. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 102(1-2): 67-95.
- Aghanabati, A., 2005. Geology of Iran, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 586 pp. (in Persian)
- Behzadi, M., 1995. An economic geology study of the Geblehbolagh copper mineralization in the Tarom-Sofla area, Zanjan province. M.Sc. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 320 pp.
- Bornhorst, T.J. and Barron, R.J., 2011. Copper deposits of the western Upper Peninsula of Michigan. In: J.D. Miller, G.J. Hudak, C. Wittkop and P.I. McLaughlin, (Editors), Geological Society of America Field Guide. America, 24, pp. 83-99.
- Brewer, T.S., Daly, J.S. and Ahal, K., 1998. Contrasting magmatic arcs in the Palaeoproterozoic Of the south western Baltic Shield. Precambrian Research, 92(3): 297-315.

- Brown, A.C., 1971. Zoning in the White Pine copper deposit, Ontonagon County, Michigan. *Economic Geology*, 66(4): 543–573.
- Cabral, A.R. and Beaudoin, G., 2007. Volcanic red-bed copper mineralization related to submarine basalt alteration, Mont Alexandre, Quebec Appalachians, Canada. *Mineralium Deposita*, 42(8): 901–912.
- Cho, M., Maruyama, S. and Liou, J.G., 1985. Phase equilibria and mineral parageneses of metabasites in low-grade metamorphism. *Mineralogical Magazine*, 49(3): 321–333.
- Condie, K.C., 2005. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to Evolving sources of mantle plumes? *Lithos*, 79(3–4): 491–504.
- Coombs, D.S., Ellis, A.D., Fyfe, W.S. and Taylor, A.M., 1959. The zeolite facies with comments on the interpretation of hydrothermal syntheses. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 17(1–2): 53–107.
- Cornwall, H.R., 1956. A summary of ideas on the origin of native copper deposit. *Economic Geology*, 51(7): 615–631.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979. *The interpretation of igneous Rocks*. George Allen & Unwin, London, 450 pp.
- Dostal, J., Church, B.N., Reynolds, P.H. and Hopkinson, L., 2001. Eocene volcanism in the Buck Creek basin, Central British Columbia (Canada): transition from arc to extensional volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(1–3): 149–170.
- Fan, W.M., Guo, F., Wang, Y.J. and Lin, G., 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1): 115–135.
- Fayzi, M., Ebrahimi, M., Kouhestani, H. and Mokhtari, M.A.A., 2017. Geology, mineralization and geochemistry of Agh-Kand copper occurrence (north of Zanjan-tarom-Hashtchin belt). *Journal of Economic Geology*, 8(2): 507–524. (in Persian with extended English abstract)
- Geng, H., Sun, M., Yuan, Ch., Xiao, W., Xiao, W., Zhao, G., Zhang, L., Wong, K. and Wu, F., 2009. Geochemical, Sr-Nd and Zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late-Subduction. *Chemical Geology*, 266(3–4): 364–398.
- Ghasemi Siani, M., Mehrabi, B. and Azizi, H., 2017. Mineralogy, geochemistry and alteration of minerals in the veins of Goluje epithermal deposit, north of Zanjan. *Iranian Journal of Geology*, 11(42): 1–25. (in Persian with English abstract)
- Guilbert, J.M. and Park, C.F., 2007. *The Geology of Ore Deposits*. Waveland Press, Long Grove, United State of America, 985 pp.
- Guilbert, J.M. and Park, J.C.F., 1986. *The Geology of Ore Deposits*. Freeman, New York, 985 pp.
- Haghnazar, Sh., Malakotian, S. and Allahyari, Kh., 2015. Tectono-magmatic setting of cretaceous pillow basalts in the north part of the Alborz mountains in east of Gilan province (north of Iran): Apart of ophiolite sequence or intra-continental rift? *Geosciences*, 24(94): 171–182.
- Harangi, S. and Lenkey, L., 2007. Genesis of the Neogene to Quaternary volcanism in the Carpathian-Pannonian region: Role of subduction, extension, and mantle plume. In: L. Beccaluva, G. Bianchini and M. Wilson, (Editors), *Cenozoic Volcanism in the Mediterranean Area*. Geological Society of America, GSA Special Papers, V. 418, United State of America, pp. 67–92.
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A. and Mitchell, S.F., 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements; development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48(12): 2341–2357.
- Hirayama, K., Samimi, M., Zahedi, M. and Hushmand Zadeh, A., 1966. *Geology of Tarom district, western part (Zanjan area north-west Iran)*. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 8, 40 pp.
- Hosseinzadeh, M., Maghfouri, S., Maiid, M. and Farid Asl, V., 2016. Introduction of copper Mari copper deposit as a tropical cantaloupe in the Tarom zone, Northwest of Iran. *Iranian Journal of Geology*, 10(38): 17–37. (in Persian with English abstract)
- Kamber, A.E., Kenneth, D.C., Michael, C.B. and Graeme, D.M., 2002. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(1): 38–56.

- Kampunzu, A.B., Tombale, A.R., Zhai, M., Bagai, Z., Majaule, T. and Modisi, M.P., 2003. Major and trace element geochemistry of plutonic rocks from Francistown, NE Botswana: evidence for a Neoproterozoic continental active margin in the Zimbabwe craton. *Lithos*, 71(2–4): 431–460.
- Kirkham, R.V., 1996. Volcanic redbed copper. In: O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair and R.I. Thorpe (Editors), *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*, Geological Survey of Canada, Canada, pp. 241–252.
- Kojima, S., Astudillo, J., Rojo, J., Trista, D. and Hayashi, K., 2003. Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the coastal Cordillera of northern Chile. *Mineralium Deposita*, 38(2): 208–216.
- Kuster, D. and Harms, U., 1998. Post-collisional potassic granitoids from the southern and northwestern parts of the Late Neoproterozoic East African Orogen: a review. *Lithos*, 45(1–4): 177–195.
- Le March, F., Villemant, B. and Calas, G., 1987. Trace element distribution coefficients in alkaline series. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(5): 1071–1081.
- Machado, A., Lima, E.F., Chemale, F.Jr., Morata D., Oteiza, O., Almeida, D.P.M., Figueiredo, A.M.G., Alexandre, F.M. and Urrutia J.L., 2005. Geochemistry constraints of Mesozoic-Cenozoic calc-alkaline magmatism in the south Shetland arc Antarctica. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(3–4): 407–425.
- McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253.
- Meschede, M., 1986. A method of discrimination between types of Mid-Ocean-Ridge basalt and continental tholeiites With the Nb- Zr- Y diagram. *Chemical Geology*, 56(3–4): 207–218.
- Moradi, M., 2012. Genesis of Cu-Pb in AbbasAbad deposit, Tarom Sofla, Qazvin province. M.Sc. thesis, Sistan and Baluchestan University, Sistan and Baluchestan, Iran, 250 pp.
- Mousavi Motlagh, H., Ebrahimi, M. and Yasemi, K., 2009. Study of andesitic type copper in the Dohneh-Tarom area, northeast Zanjan. 17th Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian with extended English abstract)
- Nabatian, Gh., 2008. Mineralogy, Geochemistry and Genesis of the Sorkhe Dizaj iron oxide-apatite Deposit, Southeast of Zanjan. M.Sc. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 218 pp.
- Nabatian, Gh., 2012. Geology, Geochemistry and evolution of iron oxide-apatite deposits in the belt Tarom volcano-plutonic belt, Western Alborz. Ph.D. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 358 pp.
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Corfu, F., Neubauer, F., Bernroider, M., Prokofiev, V. and Honarmand, M., 2014a. Geology, alteration, age and origin of iron oxide-apatite deposits in Upper Eocene quartz monzonite, Zanjan district, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 49(2): 217–234.
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Neubauer, F., Honarmand, M., Lui, X., Dong, Y., Jiang, S-Y and Bernroider, M., 2014b. Petrogenesis of Tarom high-potassic granitoids in the Alborz-Azarbaijan belt, Iran: Geo-chemical, U-Pb zircon and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Lithos*, 184–187(1): 324–345.
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Rashid Nejad-Omran, N. and Daliran, F., 2010. Geochemistry and genesis of Sorkheh-Dizaj iron oxide-apatite deposit, SE Zanjan. *Journal of Economic Geology*, 1(1): 19–46. (in Persian with extended English abstract)
- Nabatian, G., Yong Jiang, Sh., Honarmand, M. and Neubauer, F., 2016. Zircon U-Pb ages, geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Tarom-Olya pluton, Alborz magmatic belt, NW Iran. *Lithos*, 244(1): 43–58.
- Nagudi, B., Koeberl, C. and Kurat, G., 2003. Petrography and geochemistry of the Singo granite, Uganda, and implications for its origin. *Journal of African Earth Sciences*, 36(1–2): 73–87.
- Nezafati, N., Momenzadeh, M. and Pernicka, E., 2006. Darband copper occurrence: An example of Michigan-type native copper deposits in central Iran. In: J. Mao and F.P. Bierlein (Editors), *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*, Springer, Berlin,

- Heidelberg, pp. 165–166.
- Pearce, J.A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: R.S. Thorpe (Editor), *Orogenic andesites and related rocks*, John Wiley and Sons, Chichester, England, pp. 528–548.
- Pearce, J.A., 1983. Role of sub-continental lithospheres in magma genesis at active continental margins. In: C.J. Hawkesworth and M.L. Nurry, (Editors), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Shiva, Nantwith, pp. 230–249.
- Pearce, J.A., 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: D.A. Wyman (Editor), *Trace element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration*. Geological Association of Canada, Canada, pp. 79–113.
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1–4): 14–48.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses, *Earth Planet. Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290–300.
- Ramirez, L.E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M.A., Sial, A.N., Fernandez-Turiel, J.L., Gimeno, D., Garcia-Valles, M. and Lehmann, B., 2006. The Mantos Blancos copper deposit: An upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the coastal range of northern Chile. *Mineralium Deposita*, 41(3): 246–258.
- Rollinson, H.R., 1993. *Using geochemical data: evaluation, Presentation and interpretation*. Longman, UK, 352 pp.
- Rosemeyer, T., 2011. News from the Keweenaw, Recent Mineral Finds in Michigan's Copper Country. Part 4, *Rocks and Minerals*, 86(3): 206–227.
- Saeedi, A., 2015. Investigation of copper mineralization in the Aliabad Mousavi-Khanchay ore occurrence, east of Zanjan, using by lithological, mineralogy and chemical data. M.Sc. thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 180 pp.
- Salehi, L., Rasa, E., Alirezaei, S. and Kazemi Mehrnia, A., 2014. The Madan Bozorg, volcanic-hosted copper deposit, East Shahrud: an example of Manto type copper deposits in Iran. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 25(98): 93–104.
- Sato, T., 1984. Manto-type copper deposits in Chile - A review. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 35(11): 565–582.
- Saunders, A.D., Storey, M., Kent, R.W. and Norry, M.J. 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions. In: B.C. Storey, T. Alabaster and R.J. Pankhurst (Editors), *Magmatism and the Causes of Continental Break-up*. Geological Society of London Publications, Special Publication 68, London, 41–60 pp.
- Shang, G.K., Satir, M., Sieble, W., Nasifa, E.N., Taubold, H., Liegeois, J.P. and Tchoua, F.M., 2004. Geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematic: case of the sangmelima region, Ntem Complex, Southern Cameroon African. *Earth Science*, 40(1–2): 61–79.
- Sillitoe, R.H., 1977. Metallic mineralization affiliated to sub-aerial volcanism. A review. In: I.G. Gass (Editor), *Volcanic Processes in Ore Genesis*, Geological Society of London, London, pp. 99–116.
- Tashi, M., Musivand, F. and Ghasemi, H., 2016. Occurrence of native copper mineralization within the volcanic host rocks of the Garmabae Cu-Ag volcanogenic massive sulfide deposit, southeast of Shahrood. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 10(40): 89–105.
- Verma, S.P., Guevara, M. and Agrawal, S., 2006. Discriminating four tectonic settings: five new geochemical diagrams for basic and ultrabasic volcanic rocks based on log-ratio transformation of major-element data. *Journal of Earth System Science*, 115(5): 485–528.
- Vetrin, V.R. and Rodionov, N.V., 2008. Sm-Nd systematics and petrology of postorogenic granitoids in the northern Baltic Shield. *Geochemistry International*, 46(11): 1090–1106.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1):185–187.
- Wilson, N.M., 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. Unwin Hyman, London, 466 pp.
- Zamanian, H., Rahmani, Sh., JanNessari, M., Zarei Sahamyeh, R. and Borna, B., 2016. Ore-

genests study of The Cu-Au vein-type deposit in The Taron- Granitoid (North Zanjan) based on mineralogical, geochemical and fluid inclusion evidences. Scientific Quarterly Journal, Geosciences, 25(98): 255–282.

Zanjani, F., 2017. Petrographic and geochemical studies of Eocene zeolite rocks of Karaj Formation in northern Zanjan with an attitude to the ability to remove some heavy metals from water by its zeolites, M.Sc. Thesis University of Zanjan, Zanjan, Iran, 120 pp.



Geology and Origin of the Dohneh Copper Mineralization, Northeast of Zanjan

Masoumeh Mohammadi¹, Ghasem Nabatian*¹, Maryam Honarmand² and Mohammad Ebrahimi¹

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

2) Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran

Submitted: Apr. 08, 2018

Accepted: Aug. 04, 2018

Keywords: *Cu mineralization, Michigan Type, western Alborz-Azarbayejan zone, Tarom Subzone, Dohneh, Zanjan*

Introduction

The Dohneh copper deposit is located northeast of Zanjan within the Tarom subzone and the western Alborz-Azarbayejan magmatic belt. There are several reports of copper mineralization in the Tarom region such as the Aliabad Mousavi-Khanchay Cu deposit (Saeedi, 2015), the Lolan Cu-Au deposit (Zamanian et al., 2016), the Mari Cu deposit (Hosseinzadeh et al., 2016) and the Gheshlagh Cu deposit (Abbaspour, 2017) which make this subzone an important metallogenic zone in Iran. Prior to the present research, there was no detailed study done on the Dohneh Cu deposit. Thus, the aim of this research is to present detailed characteristics of geology, mineralogy and geochemistry of the host rock as well as the origin of Cu mineralization in the Dohneh area. The results of this study can be considered as an exploratory pattern in the Tarom-Hashtjin metallogenic belt in terms of time and space.

Materials and methods

Petrographic and mineralogical features of the Dohneh Cu mineralization and host volcanic rocks were determined by studying 52 thin and thin-polished sections. Major and trace element compositions of six volcanic samples (the host of mineralization) were determined by the Iran Mineral Processing Research Center and Zarazma Company using XRF and ICP-MS methods, respectively. Furthermore, four samples were selected for electron microprobe and scanning

electron microscope (SEM) analysis in the Iran Mineral Processing Research Center, Karaj.

Results and Discussion

The main rock units in the Dohneh area include Eocene tuffs and basalts which are related to the Kordkand member of the Karaj Formation. The tuff unit displays basic composition and is comprised of plagioclase, pyroxene, minor olivine and opaque minerals. There are also some basaltic fragments within the tuff unit. The Dohneh volcanic lavas can be divided into two lava flows varying in texture and mineralogy. The amygdaloidal basalt shows porphyritic and amygdaloidal textures and contains plagioclase, clinopyroxene, orthopyroxene, olivine and opaque minerals. The secondary minerals are carbonate, serpentine, epidote, chlorite, zeolite (filling the cavities), sericite and iron oxide. The second lava flow in the Dohneh area is the porphyritic basalt which shows specified porphyry texture which consists of pyroxene phenocrysts enveloped within the fine-grained matrix including plagioclase, olivine and pyroxene. The geochemical features of the Dohneh basaltic lavas show calc-alkaline nature with enrichment in LILE and LREE and depletion in HFSE and HREE. The Dohneh samples show negative anomaly of Nb, Ta and Ti in primitive mantle normalized spider diagrams. This geochemical evidence together with trace element data suggest that the Dohneh lavas have formed through partial melting of metasomatized lithospheric mantle. The status of the Dohneh samples in the tectonic

*Corresponding authors Email: gh.nabatian@znu.ac.ir

discrimination diagrams shows subduction related magmatism analogous to those reported from the Tarom and Qazvin areas (Nabatian et al. 2014; Asiabanha and Foden, 2012).

The Cu mineralization occurred in both amygdaloidal and porphyritic basalt lavas. According to mineralogical studies, the Dohneh deposit includes native copper, native silver, cuprite, malachite and azurite minerals. The minerals occur in the forms of vein-veinlet, open space filling, replacement and residual. The major alteration minerals in the Dohneh deposit include carbonate, chlorite, zeolite, and serpentinite and minor epidote, which have formed as replacement, vein-veinlet and open space filling in the host rocks.

The field and microscopic observations, whole rock chemistry and mineral chemistry data from the Dohneh deposit suggest that the mineralization fluids and hot saline aqueous fluids have been generated during the late diagenesis and burial metamorphism in the volcanic sequence. During the ascending of fluids through the fractures and faults, the copper metal leached out of silicate minerals and turned into an elemental Cu^{2+} which is soluble in the fluid. Then, through the injection of mineralized fluids into the fractures and empty spaces of host rocks which was associated with decreasing pressure, copper and native silver minerals associated with zeolite formed at the end of the diagenetic stage, and in particular in the burial metamorphic phase. Moreover, during the circulation of fluids in the host rock, secondary minerals have formed. Consequently, mineralization of zeolite and part of copper mineralization occurred during burial metamorphism. In the final stages of mineralization and during the supergene and meteoric waters affected the minerals and caused formation of secondary minerals. In the final stages of mineralization and during the supergene and weathering activities secondary minerals have been generated. According to this study and

comparing the characteristics of the Dohneh deposit to Michigan copper type deposits, it can be stated that the characteristics of the Dohneh copper deposit is the most similar to those of the Michigan copper deposits.

References

- Abbaspour, N., 2017. Petrography and geochemistry of Gheslugh Cu deposit and its host rocks, north of Zanjan. M.Sc. thesis, Zanjan University, Zanjan, Iran, 76 pp.
- Asiabanha, A. and Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcanosedimentary Basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. *Lithos*, 148(1): 98–111.
- Hosseinzadeh, M., Maghfouri, S., Maiid, M. and Farid Asl., V., 2016. Introduction of copper Mari copper deposit as a tropical cantaloupe in the Tarom zone, Northwest of Iran. *Iranian Journal of Geology*, 10(38): 17–37. (in Persian with English abstract)
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Neubauer, F., Honarmand, M., Lui, X., Dong, Y., Jiang, S-Y and Bernroider, M., 2014. Petrogenesis of Tarom high-potassic granitoids in the Alborz-Azarbaijan belt, Iran: Geo-chemical, U-Pb zircon and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Lithos*, 184–187(1): 324–345.
- Saeedi, A., 2015. Investigation of copper mineralization in the Aliabad Mousavi-Khanchay ore occurrence, east of Zanjan, using by lithological, mineralogy and chemical data. M.Sc. thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 180 pp.
- Zamaniah, H., Rahmani, Sh., JanNessari, M., Zarei Sahamyeh, R. and Borna, B., 2016. Ore-genesis study of The Cu-Au vein-type deposit in The Taron- Granitoid (North Zanjan) based on mineralogical, geochemical and fluid inclusion evidences. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 25(98): 255–282.