



مطالعه کانه‌زایی مس در داخل سنگ‌های آتشفشانی ترشیری در کانسار ورزق - شرق ایران

منصور عادل پور^{۱*}، قدرت‌الله رستمی پایدار^۲

۱- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- استادیار زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

* عهده‌دار مکاتبات: man.adelpour@yahoo.com

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۳/۱، پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۶/۷

چکیده

کانسار مس ورزق در ۲۲ کیلومتری جنوب‌شرق شهرستان قائن در زون شرق ایران واقع شده است. سنگ‌های آتشفشانی کانسار مس ورزق به سن پالئوسن-ائوسن، شامل تناوبی از گدازه‌ها (آندزیت، تراکی‌آندزیت و آندزیت-بازالت) و مواد آذرآواری (انواع توف و آگلومرا) هستند. این سنگ‌ها، بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی عناصر اصلی و کمیاب، ماهیت کالک‌آلکان دارند. مقدار Al_2O_3 آنها زیاد و در عین حال عدد منیزیمی پایینی دارند. تمامی نمونه‌ها دارای ماهیت متالومین و کلسیمی-قلیایی پتاسیم متوسط-بالا هستند. مقادیر بالای عناصر Rb, Sr, K, U, Th, Zr, Ba. نسبت‌های بالای K_2O/Rb و FeO/MgO حاکی از شباهت سنگ‌های این محدوده با سنگ‌های توده‌های آذرین کمان‌های ماگمایی حاشیه فعال قاره‌هاست. عناصر HFSE همچون Ti, Y و Nb در سنگ‌های منطقه تهی‌شدگی در صورتیکه عناصر کمیاب خاکی (شامل La و Ce) و عناصر لیتوفیل با شعاع یونی بالا (LILE) غنی‌شدگی دارند. این ویژگی مربوط به محیط تکتونیکی وابسته به مناطق فرورانش است. تهی‌شدگی از عناصر HFSE همچون Nb, Y, Ti, Zr و غنی‌شدگی از عناصر Sr, Ba, K نشان‌دهنده مشارکت پوسته در فرآیندهای ماگمایی و آلودگی ماگما توسط پوسته است. سنگ‌های آتشفشانی منطقه ورزق تحت‌تأثیر محلول‌های گرمایی قرار گرفته و دگرسان شده‌اند. کانی‌سازی سولفیدی مس در اثر عملکرد سیالات گرمایی که در امتداد گسل‌ها در حرکت بوده ایجاد شده است. کانی‌سازی به صورت افشان و رگچه‌ای است و بطور عمده محدود به قسمت فوقانی واحدهای آتشفشانی است. بارزترین ویژگی این منطقه پارائز ساده با چیرگی کالکوسیت بعنوان کانه اصلی است. کانی‌های کالکوسیت، کولیت، دیژنیت، بونیت و کالکوپیریت پارائز کانیایی را تشکیل می‌دهند. علاوه بر کانی‌های سولفیدی، مس طبیعی، کانی‌های اکسیدی از جمله کوپریت-تنوریت و کربنات‌های مس نیز دیده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌های آتشفشانی، پالئوسن-ائوسن، کمان ماگمایی حاشیه قاره‌ای، ورزق، قائن

۱- مقدمه

کانی‌سازی‌ها می‌تواند چشم‌انداز نوینی را در زمین‌شناسی و منابع معدنی مس خلق نماید. با توجه به گسترش چشمگیر مجموعه‌های آتشفشانی سنوزوئیک در ایران، انتظار می‌رود که این نوع ذخایر در ایران نیز فراوان باشند و شایسته است که ویژگی‌های زمین‌شناسی این ذخایر به دقت بررسی شده تا نتایج آن، بتواند کلیدی برای فعالیت‌های اکتشافی-استخراجی و همچنین تخمین و ارزیابی این ذخایر باشد. این پژوهش به بررسی سنگ‌های آتشفشانی واجد کانه‌سازی مس به سن پالئوسن-ائوسن در کانسار مس ورزق، پارائز کانیایی، دگرسانی و جایگاه تکتونوماگمایی این محدوده پرداخته است و سعی دارد با تکیه بر مشاهدات میدانی، سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی و کانه‌نگاری خصوصیات عمومی کانسار مس ورزق را به عنوان یک مثال بارز از این نوع ذخایر در ایران معرفی نماید.

۲- روش مطالعه

در این پژوهش پس از انجام مطالعات دقیق صحرایی و سنگ‌شناسی، ۱۸ نمونه از سنگ‌های مینرالیزه جهت بررسی کانه‌نگاری، ۲۰ نمونه جهت

کانسار مس ورزق در ۲۲ کیلومتری جنوب‌شرق شهرستان قائن با طول جغرافیایی $59^{\circ}17'45''$ شرقی تا $59^{\circ}21'10''$ شرقی و عرض جغرافیایی $33^{\circ}37'25''$ شمالی تا $33^{\circ}40'22''$ شمالی در بخش واسط بین زون جوش‌خورده سیستان در شرق و پهنه لوت در غرب قرار دارد و در تقسیم‌بندی ساختاری ایران (آق‌باتی، ۱۳۸۳) بخشی از پهنه ایران مرکزی محسوب می‌شود. در بالاترین ردیف آتشفشانی ائوسن ایران کانسارها و آثار معدنی متعددی از کانی‌سازی مس وجود دارد که در نوشته‌های مختلف از گونه گرمایی، رگه‌ای، استوک‌ورک، آتشفشانی، آندزیتی و مانتو از آنها یاد شده و اغلب بواسطه عدم شناخت صحیح از مدل زایشی و ویژگی‌های کانی‌سازی، معادن آنها متروکه و عملیات اکتشافی (چاه، تونل ترانشه و حفاری) بدون نتیجه رها شده است. بررسی متالوژنی مس در شیلی و تطبیق آن با مشخصات زمین‌شناسی معادن و آثار شناخته شده در ایران حاکی از آنست که گونه معینی از کانی‌سازی مس که به مانتو شهرت دارد در مناطق ترو، عباس‌آباد، کاشمر، طارم و سنوه (کوهستان قم)، منطقه انارک و سایر نواحی می‌تواند وجود داشته باشد و لذا شناخت این گونه از

می دهد و اندازه آنها از ۰/۲ تا ۱ سانتی متر متغیر است. فراوان ترین کانی ثانویه موجود در حفرات و رگه های موجود در سنگ کلسیت است. از دیگر کانی های ثانویه می توان به اکسیدهای آهن، کانی های فیلسیلیکاته، کانی های کدر، آلبیت، کانی های رسی، زئولیت، ایدنگسیت، بولنژیت، کلریت و سرپانتین اشاره کرد (شکل ۲).

الف) آندزیت و آندزیت پورفیری: بافت های غالب در این سنگ ها، بافت پورفیری، آمیگدالوئیدی و گاه تراکیتی در مقیاس ماکروسکوپی و بافت میکرولیتی پورفیری، هیالومیکرولیتی پورفیری و بافت جریانیه در مقیاس میکروسکوپی می باشد. فنوکریست ها، اغلب پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن می باشند. پلاژیوکلازها کانی اصلی این آندزیت ها محسوب می شوند که به صورت میکرولیت های ریز و فنوکریست های درشت و خودشکل متبلور شده اند. در این سنگ ها فضاهای خالی عمدتاً توسط کوارتز، کلریت و کلسیت پر شده اند (شکل ۲- الف و ب).

ب) تراکی آندزیت و آندزیت-بازالت: این گدازه ها دارای بافت پورفیریتی با زمینه هیالومیکرولیتی، هیالومیکرولیتی جریانیه و میکرولیتی می باشند. پیروکسن کانی فرومنیزین اصلی این نمونه هاست، که به صورت فنوکریست های درشت و خودشکل در نمونه متبلور شده است. حضور پیروکسن به صورت ادخال درون پلاژیوکلازها حاکی از تبلور پیروکسن پیش از پلاژیوکلاز است و حاکی از افزایش فشار بخار آب است (Shelley, 1993). فنوکریست های پلاژیوکلاز دارای بافت غربالی بوده و حفرات موجود در این بلورها توسط اکسیدهای آهن پر شده است (شکل ۲- پ و ت).

پ) سنگ های پیروکلاستیک: سنگ های آذرآواری در منطقه ورزق بر اساس رده بندی فیشر و اشمینک (Fisher and Schmincke, 1984) در رده کریستال ویتریک توف، کریستال لیتیک توف و آگلومرا قرار می گیرند. توف ها عمدتاً دارای ترکیب آندزیتی و آندزیت-بازالتی هستند. خرده سنگ های درون آن ها از جنس آتشفشانی با بافت میکرولیتی و هیالوپورفیری حفره دار هستند. از دیگر اجزاء تشکیل دهنده این سنگ ها می توان به بلورهای پلاژیوکلاز و به مقدار کمتر پیروکسن اشاره کرد. پلاژیوکلازهای موجود در این سنگ ها به صورت خودشکل تا نیمه خود شکل به طول حدود ۰/۳ تا ۳ میلی متر بوده و حدود ۳۰ درصد حجم سنگ را تشکیل می دهند. پیروکسن ها به صورت بی شکل تا نیمه شکل دار بوده و اندازه آن ها حدود ۰/۲ میلی متر می باشد و حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد سنگ را تشکیل داده اند. آگلومراها در قسمت های مختلف محدوده رخنمون دارند.

۵- ژئوشیمی گدازه ها

نتایج تجزیه شیمیایی ۸ نمونه از سنگ های آتشفشانی ورزق به روش XRF در جدول ۱ و ۱۰ نمونه به روش ICP-OES که در آزمایشگاه زرآما انجام شده، در جدول ۲ ارائه شده است. درصد SiO₂ این سنگ ها بین ۵۲/۳۱ تا ۵۹/۹۹ درصد متغیر است. بر اساس ترکیب شیمیایی، سنگ های آتشفشانی موردنظر در نمودار (Le Bas et al., 1986) و

بررسی سنگ شناسی- دگرسانی انتخاب شد. پس از مطالعه مقاطع میکروسکوپی، ۸ نمونه دارای حداقل دگرسانی برای تجزیه شیمیایی توسط دستگاه XRF انتخاب و پس از پودر کردن با هاون آگات در آزمایشگاه دانشگاه شهید چمران اهواز به آزمایشگاه زرآما ارسال گردید. داده های تجزیه برای عناصر MgO, K₂O, Fe₂O₃, CaO, Al₂O₃, SiO₂, TiO₂ و SO₃, P₂O₅, Na₂O, MnO با حد آشکارسازی ۰/۰۱ درصد وزنی انجام شد. همچنین ۱۰ نمونه پس از پودر کردن جهت آنالیز ICP-OES انتخاب و به آزمایشگاه زرآما ارسال گردید. در نهایت نتایج تجزیه با استفاده از نرم افزار GCD-kit مورد تفسیر و تحلیل قرار گرفتند.

۳- جایگاه زمین شناسی

بلوک لوت به واسطه داشتن موقعیت های تکتونیکی مختلف در زمان های گذشته مانند فرورانش و محیط کششی پس از برخورد (Zarrinkoub et al., 2012) دارای حجم عظیمی از فعالیت ماگماتیسم با ویژگی های ژئوشیمیایی متفاوت می باشد (Karimpour et al., 2012). به دلیل وجود این فعالیت ها که از ژوراسیک آغاز و در تشریری به اوج خود رسیده است، بلوک لوت دارای پتانسیل بسیار مناسبی برای تشکیل کانی سازی های مختلف می باشد. بخش اعظم منطقه مورد مطالعه شامل سنگ های آتشفشانی با ترکیب آندزیتی با سن پالئوسن-ائوسن می باشد که واحد سنگ آهک اریبتولین دار کرتاسه بر روی آن رانده شده است (شکل ۱).

۴- سنگ نگاری و کانی شناسی

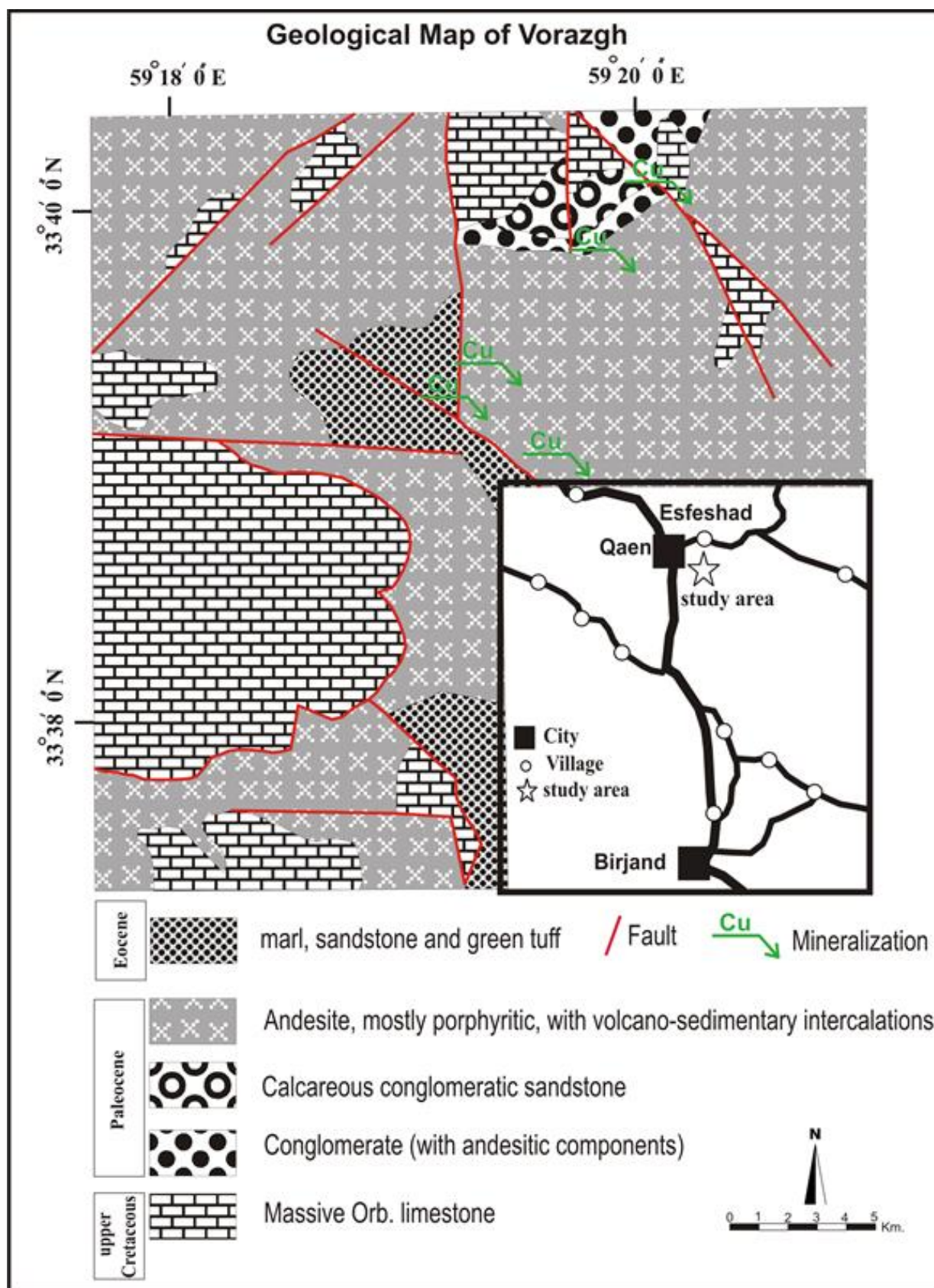
سنگ های آتشفشانی محدوده مورد مطالعه دارای ترکیب حدواسط بوده و به صورت گدازه و آذرآواری در سطح زمین دیده می شوند. مطالعات پتروگرافی نشان می دهد که سنگ های آتشفشانی ترکیبی شامل آندزیت، آندزیت پورفیری، تراکی آندزیت، آندزیت-بازالت و سنگ های پیروکلاستیک شامل آگلومرا و انواع توف ها دارند. پلاژیوکلاز، پیروکسن و الیون مهمترین فنوکریست های این سنگ ها را تشکیل می دهند. پلاژیوکلاز کانی اصلی این آندزیت ها محسوب می شود که به صورت میکرولیت های ریز و فنوکریست های درشت و شکل دار تا نیمه شکل دار (۳۰ تا ۳۵ درصد حجمی) متبلور شده است. فنوکریست های پلاژیوکلاز به اندازه ۰/۳ تا ۱/۵ سانتی متر و در مواردی تا ۲/۵ سانتی متر طول دارند و در آن ها بافت غربالی و گاهی زون بندی وجود داد. استوارت و پیرس (Stewart and Pearce, 2004) معتقدند که ناپایداری بلورهای پلاژیوکلاز در حین حرکت سریع ماگما به سمت بالا باعث پیدایش بافت غربالی در پلاژیوکلاز می شود چرا که بعضی از قسمت های پلاژیوکلاز بطور بخشی ذوب می شود و محصولات ناشی از ذوب پلاژیوکلاز در داخل پلاژیوکلاز شروع به تبلور می نمایند. پیروکسن کانی فرومنیزین اصلی این نمونه هاست که به صورت فنوکریست های درشت و خودشکل متبلور شده است و حدود ۸ تا ۱۰ درصد از کل سنگ را تشکیل

مثل La و Ce و عناصر ناسازگار مانند K و Rb می‌باشند. این از ویژگی‌های ماگماهای کالک‌آلکانل کمان‌های آتشفشانی زون‌های فرورانش حاشیه قاره است (Pearce, 1983). تهی‌شدگی عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) مثل Y، Ti و Nb و غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) مانند Ba، Cs و K قابل مشاهده می‌باشد. این ویژگی‌ها می‌تواند نشانه مشارکت پوسته در فرآیند ماگمایی و آلیش توسط پوسته باشد (Harris et al., 1986; Chappell, 1992). آنومالی منفی Nb و Ti به عوامل مختلفی نسبت داده می‌شود. این عوامل عبارتند از: (۱) ماگماتیسم مرتبط با فرورانش؛ (۲) وجه مشخصه سنگ‌های پوسته قاره‌ای و دخالت پوسته در فرآیندهای ماگمایی (Kuster and Harms, 1998)؛ (۳) نشان‌دهنده فقر این عناصر در منشاء، پایداری فازهای حاوی این عناصر در طی ذوب بخشی و یا جدایش آنها در طی فرآیند تفریق است. میزان عنصر Sr با افزایش محتوی سیلیس ماگما در نمونه‌ها کاهش می‌یابد که ناشی از کاهش فراوانی فلدسپار در حین تفریق بلورین است؛ چرا که Sr به جای Ca و K در شبکه فلدسپار می‌تواند وارد شود. آنومالی منفی Eu اگر همراه با آنومالی منفی Sr باشد، بر اثر تفریق پلاژیوکلاز است (Wu et al., 2003). آنومالی مثبت Pb به متاسوماتیسم گوه گوشته‌ای توسط سیالات ناشی از پوسته اقیانوسی فرورو و یا آلیش ماگما با پوسته قاره‌ای اشاره دارد (Kamber et al., 2002). ماگمای تشکیل‌دهنده سنگ‌های آتشفشانی در مناطق فرورانش معمولاً از گوه گوشته‌ای، سیالات و مذاب‌های آبدار مشتق از پوسته اقیانوسی فرورو منشاء می‌گیرند (Pearce and Peate, 1995). ماگماهایی که از گوه گوشته‌ای نشأت گرفته‌اند، معمولاً دارای K₂O بالا و MgO پایین هستند. نسبت بالای Ba/Th اشاره به تأثیر رسوبات در ژنز ماگما دارد (Morata and Aguirre, 2003) که در نمونه‌های محدوده مورد مطالعه میانگین Ba و Th به ترتیب برابر با ۳۱۷ ppm و ۵/۸ ppm می‌باشد. Ba عنصری ناسازگار و متحرک است و مقدار آن در پوسته قاره‌ای و رسوبات زیاد است (Rollinson, 1998)، هنگامی که پوشش رسوبی روی پوسته اقیانوسی فرورانه می‌شود، عناصر Ba و Sr توسط سیالات مشتق شده از رسوبات آبدار و پوسته اقیانوسی به گوه گوشته‌ای منتقل شده و تولید ماگماهای با Ba و Sr بالا می‌کند (Morata and Aguirre, 2003)، همانطور که در جدول ۲ آورده شده است میانگین Sr در محدوده مورد بررسی ۳۷۴/۴ ppm می‌باشد که غنی‌شدگی بیش از ۱۰ برابری نسبت به کندریت و گوشته اولیه نشان می‌دهد (شکل ۷). با توجه به خصوصیات ژئوشیمیایی و همچنین با در نظر گرفتن موقعیت زمانی و مکانی سنگ‌های آتشفشانی ورزق، به نظر می‌رسد که این سنگ‌ها با ماگماتیسم ناشی از فرورانش بلوک افغان به زیر بلوک لوت در ارتباط بوده و در یک محیط کمان ماگمایی تشکیل شده‌اند (Muller and Groves, 1997) (شکل ۸).

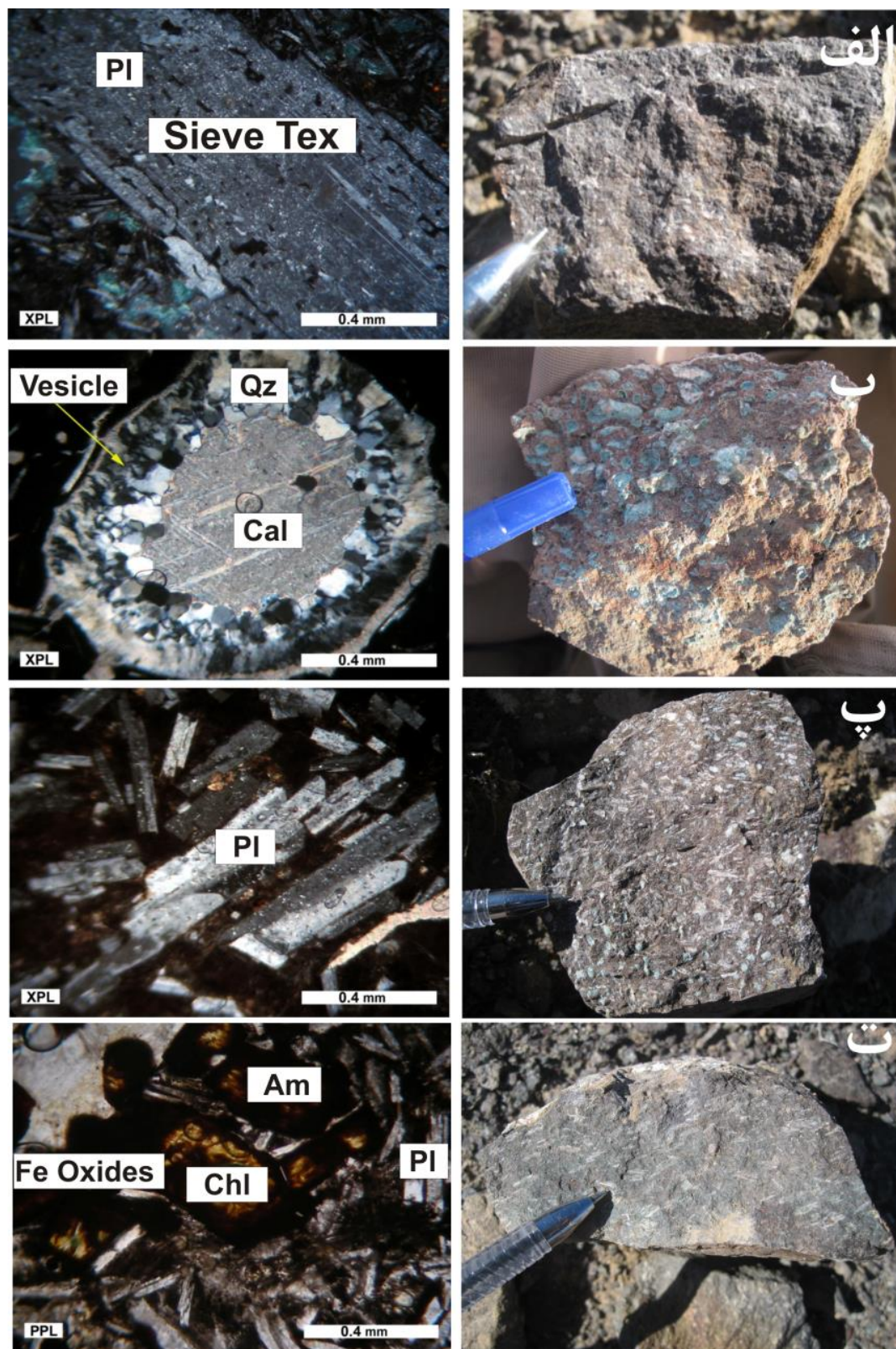
(Middlemost, 1994) که بر مبنای درصد وزنی مجموع آلکانل (Na₂O+K₂O) در مقابل درصد وزنی سیلیس (SiO₂) رسم شده است، در محدوده آندزیت، تراکی‌آندزیت و آندزیت-بازالت قرار می‌گیرند (شکل‌های ۳- الف و ۳- ب). نمونه‌های مورد بررسی بر اساس نمودار (Shand, 1943) A/CNK-A/NK، در محدوده متاآلومین جای می‌گیرند (شکل ۴- الف). این سنگ‌ها در رده کالک‌آلکانل پتاسیم متوسط تا بالا هستند (نمودار K₂O در مقابل SiO₂؛ Taylor, Peccerillo and Irvine and Baragar, 1976) (شکل ۴- ب) و در نمودار (Irvine and Baragar, 1976) نیز در محدوده کالک‌آلکانل قرار می‌گیرند (شکل ۵).

بطور کلی ماگماهای اولیه‌ای که در تعادل با کانی‌شناسی شاخص گوشته فوقانی (الیون + ارتوپیروکسن + گارنت + اسپینل) قرار دارند، باید دارای مقادیر MgO# یا عدد منیزیمی بالا (>۰/۷)، Ni بالا (۱۵۰۰ ppm) Cr زیاد (>۱۴۰۰ ppm) و مقدار SiO₂ کمتر از ۵۰٪ باشند (Glenn, 2004). با این حال اگر ماگمای بازیگ به جای مشتق شدن از یک گوشته عادی از مناطق منشاء متاسوماتیزه مشتق شده باشند، این معیارها دیگر کاربرد نخواهند داشت (Wilson, 1989). ماگمای سازنده نمونه‌های مورد آنالیز با داشتن مقدار Mg# میانگین ۰/۳، میزان کرم ppm ۹۱/۶ و مقدار میانگین نیکل ۵۱ ppm جزء ماگماهای اولیه در تعادل با گوشته فوقانی قرار نمی‌گیرد و لذا یا پس از تشکیل در گوشته عادی متحمل تحولات ماگمایی شده و یا اینکه ماگما از گوشته متاسوماتیزه مشتق شده است. با استناد به شکل ۶- الف و جدول ۱ مقدار Zr در سنگ‌های مورد مطالعه دامنه وسیعی (بین ۸۴ تا ۱۳۴ ppm) را به خود اختصاص داده که از این لحاظ این سنگ‌ها به سری کالک‌آلکانل شباهت دارند. با توجه به شکل ۶- ب نمونه‌های مورد آنالیز در محدوده بازالت‌های کمانی قاره‌ای قرار می‌گیرند.

از نسبت عناصر کمیاب Zr/Y برای تشخیص رژیم تکتونیکی می‌توان استفاده کرد (Pearce and Norry, 1979). به این صورت که اگر در گدازه‌ها نسبت Zr/Y > ۳ باشد، متعلق به کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای هستند و اگر در آنها نسبت Zr/Y < ۳ باشد به کمان‌های آتشفشانی اقیانوسی تعلق دارند. سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه دارای نسبت Zr/Y > ۳ هستند و در گروه قوس‌های آتشفشانی قاره‌ای قرار می‌گیرند. بنابراین محیط تکتونوماگمایی منطقه مورد مطالعه را می‌توان جزء محیط‌های حاشیه فعال قاره‌ای به شمار آورد. در شکل ۷ ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی ورزق نسبت به کندریت و گوشته اولیه نشان داده شده است. نمودارهای عنکبوتی جهت بررسی میزان تغییر و تحولات ماگمای مولد نسبت به ماگمای اولیه و همچنین منشاء و روابط ژنتیکی آنها از اهمیت خاصی برخوردار هستند. نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده نسبت به کندریت (Nakamura, 1977) و گوشته اولیه (Sun and Macdonough, 1989) بیانگر غنی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سبک



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه؛ اقتباس شده از ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ قائن، سازمان زمین شناسی کشور



شکل ۲- الف- فنوکریست پلاژیوکلاز با بافت غربالی در زمینه میکرولیتی در نمونه‌ای از رخنمون آندزیتی؛ ب- نمونه آندزیت مگاپورفیری با بافت آمیگدالوئیدی که حفرات آن توسط کوارتز و کلسیت پر شده است؛ پ- بافت گلومروپورفیری پلاژیوکلاز در زمینه میکرولیتی در نمونه‌ای از واحد تراکی آندزیتی؛ ت- فرآیند آپاسیتی شدن در بلورهای منشوری آمفیبول همراه با بلورهای پلاژیوکلاز (عکس سمت چپ نمونه دستی و عکس سمت راست مقطع میکروسکوپی همان نمونه می‌باشد).

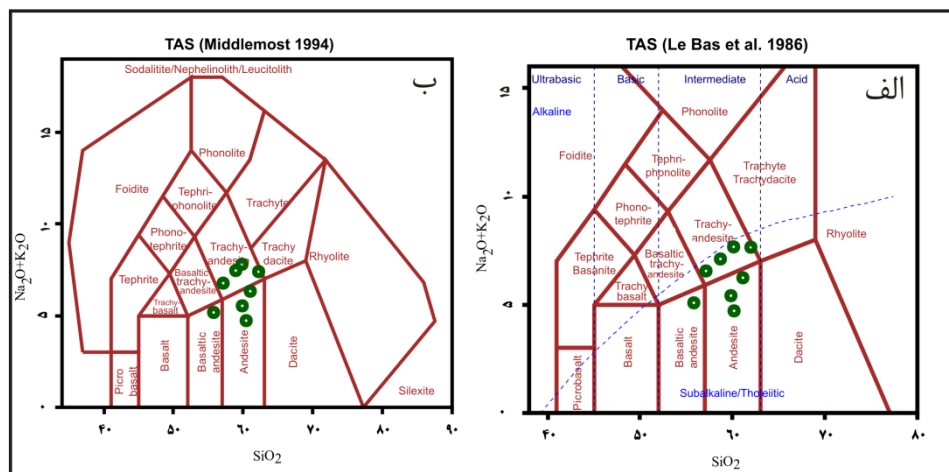
جدول ۱- نتایج آنالیز XRF سنگ‌های آتشفشانی ورزق بر حسب درصد وزنی

Sample No.	VZF-1	VZF-2	VZF-3	VZF-4	VZF-5	VZF-6	VZF-7	VZF-8
SiO ₂	55.98	57.79	53.31	58.83	56.13	59.99	56.64	57.08
Al ₂ O ₃	16.94	16.93	16.09	15.98	13.89	15.78	17.52	14.92
CaO	8.01	7.96	8.42	7.96	10.98	8.81	7.35	9.38
Fe ₂ O ₃	5.97	4.63	7.94	4.98	5.59	3.12	3.73	5.36
K ₂ O	1.8	1.43	1.31	2.67	1.09	2.05	1.89	1.91
MgO	4.09	1.4	2.62	2.21	1.34	0.97	3.69	2.64
MnO	0.06	0.04	0.07	0.08	0.16	0.08	0.07	0.08
Na ₂ O	4.51	4.61	3.98	4.78	3.86	5.07	4.84	3.41
P ₂ O ₅	0.31	0.49	0.41	0.31	0.33	0.36	0.37	0.29
SO ₃	0.05	0.12	0.05	0.03	0.07	0.1	0.09	0.04
TiO ₂	0.91	0.99	1.13	0.79	0.9	0.81	0.82	0.96
LOI	0.96	2.94	3.31	1.37	4.57	2.53	1.97	2.78
Total	99.59	99.33	98.64	99.99	98.91	99.67	98.98	98.85

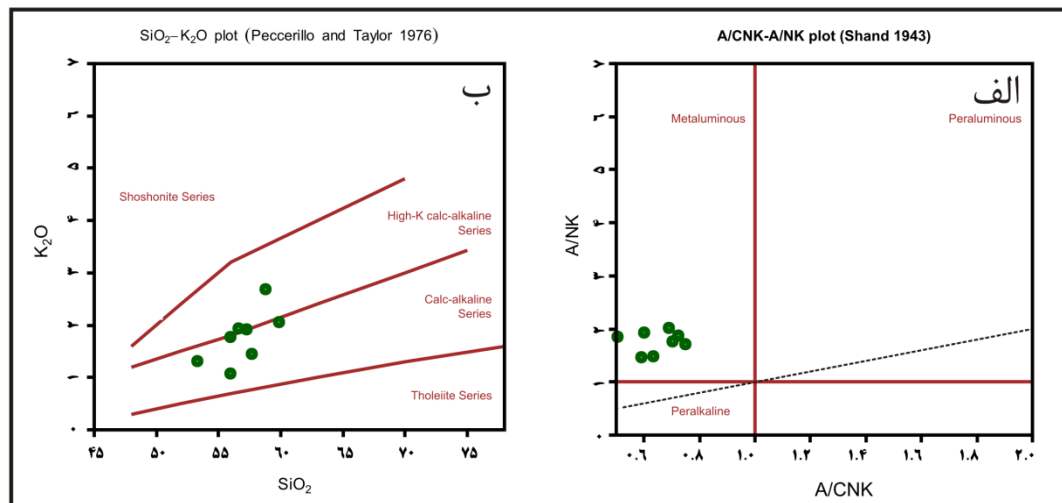
جدول ۲- نتایج آنالیز ICP-OES عناصر جزئی و کمیاب در سنگ‌های آتشفشانی ورزق بر حسب ppm

No. Sample	VZA-1	VZA-2	VZA-3	VZA-4	VZA-5	VZA-6	VZA-7	VZA-8	VZA-9	VZA-10
Cr	85	122	74	81	115	92	57	80	99	111
Mn	756	727	677	697	712	673	622	769	821	705
Ni	53	58	49	50	62	53	34	43	53	55
Pb	8.6	8.8	9.9	6.4	6.2	10.2	10.7	9.3	9.6	8
Sr	370	336	420	428	380	355	370	352	358	375
Ba	278	271	300	247	448	314	284	351	386	289
Be	1.5	1.4	1.5	1.3	1.3	1.6	1.3	1.7	1.8	1.4
Ti	5690	5440	5820	7110	6920	5830	4350	6520	6660	6730
Fe	39200	38400	37600	41700	41200	37200	31800	42600	44900	41900
Al	66700	65300	67500	72900	66700	63000	65700	72800	73700	71400
La	23	22	26	25	24	27	24	29	28	24
Sc	12	13	11	12	13	11	10	12	13	13
V	114	113	114	126	131	104	90	126	134	126
Mg	20800	20600	17400	19700	19600	17700	14700	16000	18500	20100
K	8770	11800	10400	11300	10700	12700	12200	7940	7980	6640
Na	19500	17100	17300	23100	19400	18700	18700	20300	19800	19500
S	140	160	350	150	190	170	170	160	200	190
Zr	100	97	104	134	120	119	84	105	110	111
Hg	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Ag	0.43	0.38	0.38	0.56	0.46	0.44	0.33	0.87	0.84	0.9
Cu	30.9	28.1	30.8	33.1	31.3	32.8	24.2	29	45	29.9

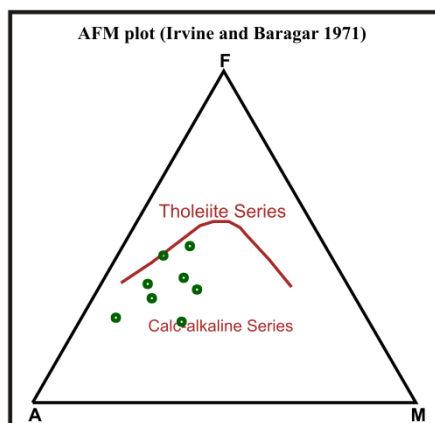
Mo	0.9	1.3	0.8	1.3	7.3	2	1.5	0.2	0.2	1.9
Sb	0.7	0.8	0.9	0.6	0.8	0.7	1	0.8	0.9	0.6
Zn	70.9	68.2	67.6	77.8	78	66.5	60	62.2	68.5	65
Cs	4.1	5.3	5.9	4	4.6	5.3	5.3	5.5	5.7	5.4
Nb	11.2	10.5	11.7	12.2	12.8	13.6	9.3	8.5	8.8	7.9
U	1.43	1.37	1.68	1.55	1.49	1.76	1.49	1.39	1.46	1.25
Te	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Rb	41	54.1	48.8	48.1	46.4	59.9	56.8	25.5	25.5	21.7
Th	5.6	5.4	5.94	5.21	5.4	6.06	5.56	6.48	6.78	5.59
Y	18.4	18.4	18.8	20	18.8	19.6	16.9	14.6	14.8	14.5
Ce	46.2	43.1	48.5	47.2	46.9	50.3	43.2	50.4	50.2	42.7
Tl	0.2	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2



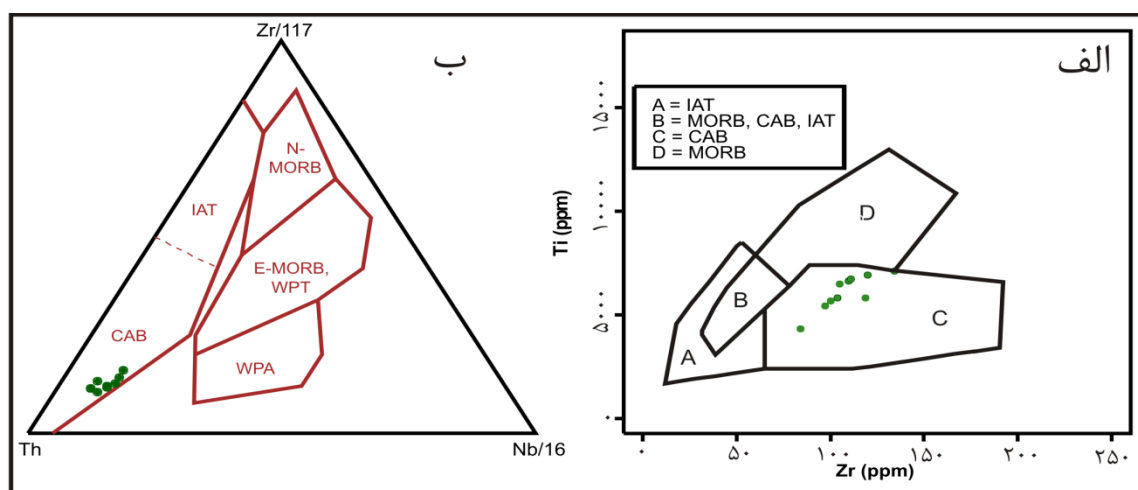
شکل ۳- الف- نمودار $Na_2O + K_2O$ در مقابل SiO_2 ، نمونه‌ها در محدوده آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت- بازالت قرار گرفته‌اند؛ ب- نمودار $Na_2O + K_2O$ در مقابل SiO_2



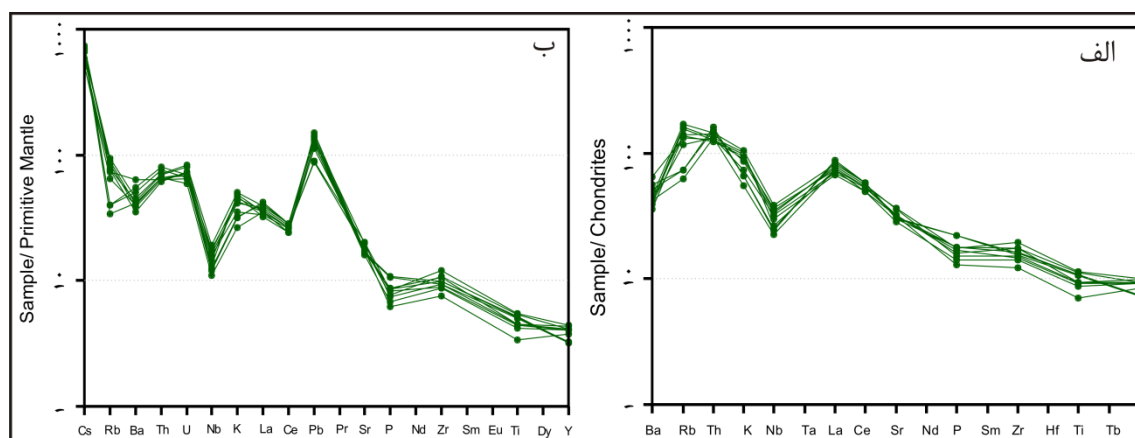
شکل ۴- الف- نمودار $A/CNK - A/NK$ ، نمونه‌ها در محدوده متآلومینوس قرار گرفته‌اند؛ ب- نمودار K_2O در مقابل SiO_2 که در آن بیشتر نمونه‌ها در محدوده سری کالک‌آلکانی قرار گرفته‌اند.



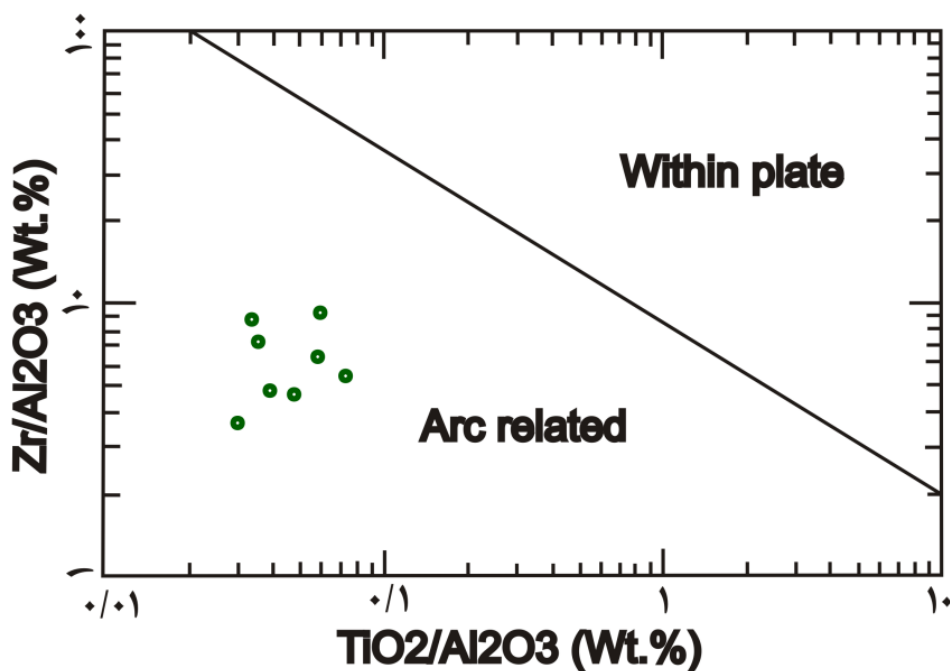
شکل ۵- نمودار AFM، جهت تمایز سنگ‌های تولیتی و کالک‌آلکان (Irvine and Baragar, 1971)



شکل ۶- موقعیت سنگ‌های آتشفشانی ورزق بر روی نمودار Ti-Zr (Pearce and Cann, 1973) و نمودار تعیین محیط تکتونیکی از (Wood, 1980).



شکل ۷- الف- نمودار عنکبوتی نرمالیزه شده براساس کندریت (Thompson, 1982)؛ ب- نمودار عنکبوتی نرمالیزه شده براساس گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)؛ تپی شدگی از عناصر با شدت میدان بالا هم چون Y, Ti و Nb، غنی شدگی از عناصر K و Ba, Cs نشان دهنده شرکت پوسته در فرآیندهای ماگمایی و آلودگی ماگما توسط پوسته می باشد.



شکل ۸- تعیین محیط تکتونیکی سنگ‌های آتشفشانی ورزق و ارتباط آنها با کمان ماگمایی (Muller and Groves, 1997)

۶- دگرسانی

تشکیل می‌شود (Ulrich and Heinrich, 2002).

پ) دگرسانی کربناتی: حضور نسبتاً فراوان کانی‌های کربناته حاصل دگرسانی پیروکسن‌ها و پلاژیوکلازها نشان‌دهنده غنی بودن سیالات دگرسان کننده از بی‌کربنات است. کربناتی شدن، در قوس‌های آتشفشانی حاشیه قاره‌ها، می‌تواند ناشی از چرخش آب‌های زیرزمینی و گرم شدن آنها در مجاورت توده‌های نفوذی باشد (Shelley, 1993).

ت) دگرسانی آرژیلیک: تبدیل کانی پلاژیوکلاز به کانی‌های رسی در سنگ‌های منطقه بسیار رایج است. دگرسانی آرژیلیک حدواسط بر فلدسپارهای پلاژیوکلاز موثر است و با تشکیل کانی‌های رسی (کانولینیت) مشخص می‌شود. دگرسانی آرژیلیک حدواسط عمدتاً همراه با متاسوماتیسم H^+ است (Pirajno, 2009). این دگرسانی هنگامی توسعه می‌یابد که شرایط محیطی، بویژه pH برای تحرک Al چندان مناسب نیست. اگر در طی دگرسانی، افزون بر شسته شدن Na, Ca, Mg و عنصر Al نیز شسته شود، این دگرسانی تبدیل به دگرسانی سیلیسی می‌گردد (Beane and Titley, 1981).

ث) دگرسانی پروپیلیتیک: این دگرسانی با افزایش H_2O و CO_2 و بطور محلی گوگرد و اثر اندک متاسوماتیسم H^+ مشخص می‌شود (Pirango, 2009). از تغییرات کانی‌شناسی می‌توان از تبدیل پلاژیوکلازها به اپیدوت و کانی‌های مافیک به کلریت نام برد. این دگرسانی در سنگ‌های آندزیتی منطقه توسعه بیشتری دارد.

ج) آپاسیتی شدن: فرآیند آپاسیتی شدن در بلورهای منشوری آمفیبول دیده می‌شود. در برخی از بلورها حاشیه سوخته و کدر شده و در برخی دیگر تمام بلور کدر شده است. وجود آمفیبول‌های سوخته که جزء کانی‌های هیدروکسیل‌دار می‌باشد، به علت واکنش‌های اگزوترمیک است که در نزدیک سطح صورت می‌گیرد. آپاسیتی شدن می‌تواند ناشی از افت سریع فشار حین

سنگ‌های آتشفشانی منطقه ورزق، متحمل دگرسانی گرمایی شده‌اند. شدت دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی متفاوت است و با فاصله گرفتن از زون کانه‌دار از شدت دگرسانی‌ها کاسته می‌شود. مهمترین دگرسانی‌های شناسایی شده در سنگ‌های آتشفشانی این منطقه عبارتند از:

۱- سیلیسی شدن، ۲- کلریتی شدن، ۳- کربناتی شدن، ۴- دگرسانی آرژیلیک، ۵- پروپیلیتیک و ۶- آپاسیتی شدن. عملکرد سل‌ها و شکستگی‌های فراوان در این سنگ‌ها از عوامل مهم تسهیل‌گردش سیالات دگرسان کننده و گسترش زون‌های دگرسانی در آنها می‌باشد. در نتیجه این دگرسانی‌ها، انواعی از کانی‌های ثانویه تشکیل شده است.

الف) دگرسانی سیلیسی: در منطقه مورد مطالعه در داخل سنگ‌های آتشفشانی رگه‌های سیلیسی به رنگ سفید شیری و به صورت کریپتوکریستالین بدون جهت‌یافتگی خاصی وجود دارد که در برخی رخنمون‌ها دارای کانه‌زایی مس هستند. علاوه بر سیلیس به صورت پرکننده فضای خالی و دانه پراکنده نیز وجود دارد و بیشترین حجم دگرسانی را به خود اختصاص داده است. دگرسانی سیلیسی در بیشتر کانسارهای گرمایی یافت می‌شود.

ب) دگرسانی کلریتی: در بخش‌هایی از منطقه مورد مطالعه که سنگ‌ها متحمل دگرسانی کلریتی شده‌اند، رنگ سنگ به سبز متمایل می‌باشد. کانی‌های دگرسانی شامل کلریت، کلسیت، کوارتز و اکسیدهای آهن می‌باشد. کلریت از دگرسانی بلورهای پیروکسن حاصل شده است که در آن شکل اولیه بلورهای پیروکسن نیز باقی مانده است. کربنات و کوارتز بیشتر شکستگی‌ها و حفرات را پر می‌کنند. در این دگرسانی نسبت سیال به سنگ کم است و تمایل به ایزوشیمیایی بودن دارد و در پاسخ به متاسوماتیسم H^+

است و بیشتر بصورت آغشتگی‌های سطحی و یا در حاشیه سولفیدهای اولیه تشکیل شده‌اند. در بیشتر موارد کانی کالکوسیت با دیگر کانی‌های سولفیدی از جمله دیژنیت، بورنیت و کوولیت هم‌رشدی نشان می‌دهد. بیشینه همراهی و هم‌رشدی مربوط به کانی‌های کالکوسیت و کوولیت است (شکل ۱۰).

در تمامی انواع کالکوسیت، عنصر مس ممکن است با مقداری نقره، آهن و منگنز، حداقل در فرم‌های حرارت بالا جانشین شود. به جای گوارد نیز، عناصر سلنیم و یا تلوریم می‌توانند در شبکه ساختمانی کالکوسیت وارد شوند (Ramdohr, 1980). بنابراین، همانگونه که در ادامه آمده است، نقره به‌عنوان پاراژنز عنصری مس در این کانسار، در شبکه کانی کالکوسیت قرار گرفته است. رامدور، (۱۹۸۰) به تجمعی از دانه‌های درشت کالکوسیت با کلیواژهای قابل تشخیص در سطح (۰۰۱) و مالاکیت که در طول مرز دانه‌ها و کلیواژها رشد یافته است اشاره می‌کند؛ وی این‌گونه کالکوسیت را بطور یقین ژرفازاد می‌خواند (Ramdohr, 1980). میزان عیار عنصر نقره در نتایج تجزیه عنصری بالا است (میانگین ۶/۸ گرم در تن)، بنابراین انتظار می‌رفت در مطالعات میکروسکوپی کانی مستقلی از نقره شناسایی شود که این چنین نبود و کانی نقره‌ای مشاهده نشد. با توجه به این مطلب که عنصر نقره همبستگی خوبی با عنصر مس نشان می‌دهد (شکل ۱۱). همچنین با توجه به آگاهی از این مطلب که عنصر نقره به‌خوبی در شبکه کانی‌های مس از جمله کالکوسیت و کوولیت جایگزین می‌شود، انتظار می‌رود، نقره در شبکه کانی‌های مس و به احتمال زیاد (به دلیل فراوانی بیشتر کالکوسیت) در کانی کالکوسیت قرار گرفته باشد.

۸- تعیین نوع کانه‌زایی

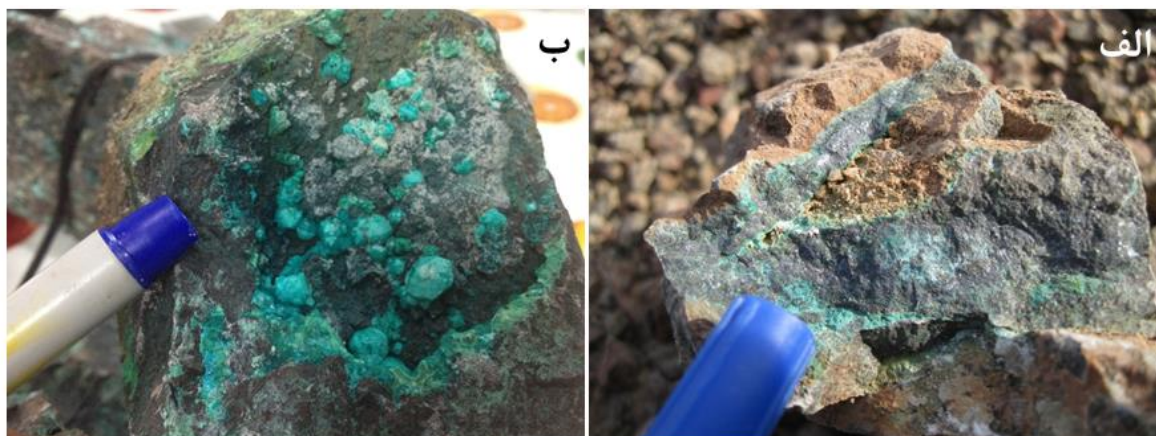
در کانسار مس ورزق کانی‌سازی در سنگ‌های آتشفشانی که منسوب به پالئوسن-اوسن هستند، صورت گرفته است. واحد سنگی مربوطه شامل آندزیت، تراکی آندزیت، آندزیت-بازالت و رخنمون‌هایی از آگلومرا و توف است. ویژگی اصلی گدازه آتشفشانی مذکور، بافت تراکیتی و پورفیری-مگاپورفیری (با پورفیرهای پلاژیوکلاز) است. در ایران، سنگ‌های آتشفشانی با خصوصیات ذکر شده در بالا (سنگ میزبان با ترکیب آندزیت و آندزیت-بازالت و بافت پورفیری-مگاپورفیری) به سن اوسن و به‌ویژه اوسن میانی-بالایی می‌باشند. تمامی ویژگی‌های ذکر شده در مورد کانسار مس ورزق ما را برآن می‌دارد که، به‌منظور مقایسه و تعیین تیپ کانه‌زایی ذخیره مس ورزق به مطالعه و مقایسه کانسارهایی بپردازیم که در سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده‌اند. با توجه به شواهد ذکر شده در مورد کانسار ورزق، کانی‌سازی در این کانسار را با چند کانسار مشابه در ایران مقایسه می‌کنیم (جدول ۲).

فوران ماگما باشد (Rutherford and Hill, 1993). افت فشار محدوده این کانی‌ها را کاهش داده و آنها را دچار واجذبی می‌نماید، در نتیجه حاشیه‌های کدر در اطراف بلورهایی مانند هورنبلند تشکیل می‌شود (Devine and Sigurdsson, 1995). همچنین افزایش درجه حرارت ماگما را نیز عامل آپاسیته شدن بلورهای آمفیبول می‌دانند (Hiroshi and Kenji, 2005). آپاسیته شدن آمفیبول می‌تواند نشان‌دهنده بالا بودن فوگاسیته اکسیژن و فشار بخار آب ضمن تشکیل این کانی و از دست رفتن آب حین فوران ماگما باشد (Best, 1982). علاوه بر پدیده‌های ذکر شده، پدیده ژئولیتی شدن در حفرات سنگ نیز اتفاق افتاده است. ژئولیت‌ها دارای بافت و ساخت اسفرولیتی، شعاعی و متراکم‌اند.

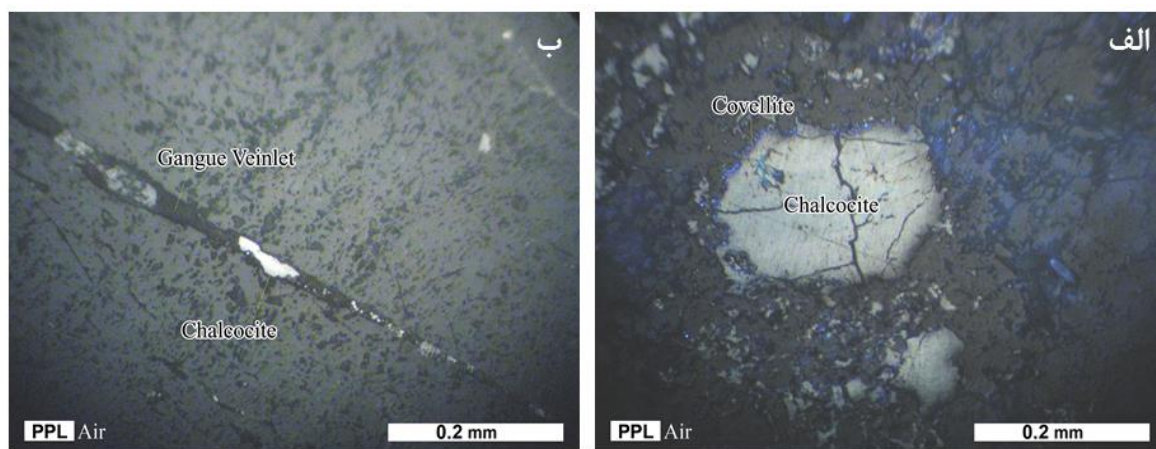
۷- مطالعات مینرالوگرافی

تعداد ۱۸ مقطع صیقلی از کانسار ورزق تهیه و مورد مطالعه مینرالوگرافی قرار گرفتند. در تمامی مقاطع، کانه اصلی مس کالکوسیت است. کانی‌سازی عمدتاً در سنگ‌های آتشفشانی (آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت-بازالت) و سنگ‌های پیروکلاستیک (آگلومرا و توف) رخ داده است. بطور کلی، براساس مطالعات میکروسکوپی و مشاهدات صحرایی، کانه‌سازی در ورزق بیشتر به دو گونه رگه-رگچه‌ای و افشان و گاهی اوقات به‌صورت پرکننده فضای خالی دیده می‌شود. در محدوده مورد بررسی یکی از عمده‌ترین سیماهای مواد معدنی در بخش کانه‌دار، حضور آن‌ها به صورت رگه-رگچه‌ای است که ابعاد آن‌ها از میلی‌متر تا سانتی‌متر و گاهی تا متر متغیر است، بطوریکه ستبرای رگه‌ها و رگچه‌های کالکوسیت به ندرت از چند سانتی‌متر تجاوز می‌کند (شکل ۹). رگه‌ها عمدتاً کانی‌شناسی ساده داشته و بیشتر متشکل از کانی‌های کوارتز و کلسیت به همراه کانه‌زایی سولفیدی مس هستند. رگه‌ها از نظر ریخت‌شناسی، مرزهای مسطح تا انحنادار و سینوسی دارند. کانی‌های کالکوسیت، بورنیت و کالکوپیریت از عمده‌ترین کانی‌هایی هستند که در این رگه-رگچه‌ها دیده می‌شوند. سولفیدها در نزدیکی رگه‌های اصلی کوارتز و کلسیت به صورت رگه-رگچه بوده و با دور شدن از رگه اصلی، به شکل افشان دیده می‌شوند. در کانسار مس ورزق، بافت افشان بیشتر در واحد آندزیت و تراکی آندزیت بوده و در آن کالکوسیت به صورت دانه پراکنده در زمینه سنگ میزبان وجود دارد. از دیگر بافت‌های موجود در این منطقه، بافت پرکننده فضای خالی است. در این بافت کانی‌های مس‌دار همراه با کلسیت، کوارتز و کالسدونی دیده می‌شوند.

در کانسار مس ورزق، پس از آنکه کانسنگ در سطح زمین و در معرض پدیده‌های برونزاد (سوپرژن) قرار گرفته است، برخی کانی‌های سازنده کانسنگ ناپایدار و به کانی‌های پایدار در شرایط سطحی تبدیل شده‌اند. این کانی‌های ثانوی به طور چیره شامل مالاکیت، آزوریت، کوپریت و تنوریت



شکل ۹- الف- نمونه دستی از سنگ آندزیتی واجد کانی‌سازی سولفیدی بصورت رگه‌ای؛ ب- کانه‌زایی ملاکیت در سطح رخنمون آندزیت پورفیری که حفرات خالی سنگ را نیز پر کرده است.

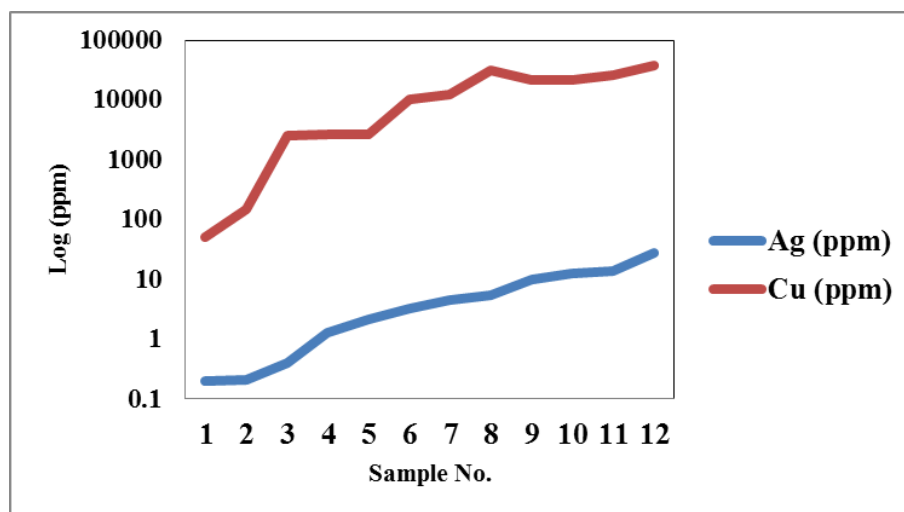


شکل ۱۰- الف- کانه کالکوسیت به صورت بلور منفرد در نمونه برداشت شده از واحد آندزیت حاوی کانی‌سازی مس؛ ب- رگچه حاوی کالکوسیت در نمونه برداشت شده از رخنمون تراکی آندزیت در محدوده مورد مطالعه

جدول ۲- مقایسه کانسار مس ورزق با چند کانسار و اندیس مس مشابه در ایران

کانسار	کانسار مس ورزق، قائن	کانسار مس گرمایی	کانسار مس عباس‌آباد، شاهرود	اندیس مس دارهند، نطنز	اندیس مس قبله‌بولاغ، طارم
ویژگی‌ها					
موقعیت	۲۲ کیلومتری جنوب خاوری قائن	۵۰ کیلومتری شمال خاوری قائن	۱۳۰ کیلومتری شمال خاوری شاهرود	۴/۵ کیلومتری باختر نطنز	۶۵ کیلومتری جنوب خاور زنجان
سنگ میزبان	آندزیت تا آندزیت- بازالت پورفیری و توف	آندزیت تا آندزیت- بازالت پورفیری و توف	آندزیت تا آندزیت- بازالت پورفیری	بازالت آمیگدالوئیدال	بازالت آمیگدالوئیدال
سری ماگمایی	ساب‌آلکان	ساب‌آلکان	آلکان تا ساب‌آلکان
جایگاه زمین‌شناختی	آتشفشانی نیمه‌قاره‌ای	آتشفشانی نیمه‌قاره‌ای
جایگاه تکتونیکی	کمان ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای	کمان ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای	کمان ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای

پاراژنز کانیاپی کالکوسیت، دیژنیت، کولیت، مس طبیعی، کالکوپیریت، مالاکیت و آزوریت	کالکوسیت، دیژنیت، کولیت، مس طبیعی، کوپریت، تنوریت، آزوریت و مالاکیت	کالکوسیت، دیژنیت، کولیت، مس طبیعی، کوپریت، تنوریت، آزوریت و مالاکیت	کالکوسیت، دیژنیت، کولیت، مس طبیعی، کوپریت، تنوریت، آزوریت و کالکوپیریت	کالکوسیت، دیژنیت، کولیت، مس طبیعی، کوپریت، تنوریت، آزوریت، مالاکیت، هماتیت، پیریت	مس طبیعی، تنوریت، مالاکیت، کالکوپیریت، آزوریت، کریزوکولا، مگنتیت، هماتیت، پیریت
محصول فرعی	نقره	نقره	نقره	نقره	نقره
بافت ماده معدنی	رگه- رگچه‌ای، پرکننده بادامک‌ها، دانه‌پراکنده	رگه- رگچه‌ای، افشان و پرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، افشان و پرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، افشان و پرکننده فضای خالی	افشان و پرکننده فضای خالی
محصولات دگرسانی	کربنات، کوارتز، کلریت، زئولیت، اپیدوت	کربنات، کوارتز، کلریت، زئولیت، اپیدوت	کربنات، کوارتز، کلریت، زئولیت، اپیدوت	کربنات، کوارتز، کلریت، زئولیت، اپیدوت	اپیدوت، کلریت، کوارتز، کلسیت و ...
سن کانه‌زایی	پالئوسن- ائوسن	پالئوسن بالایی- ائوسن	تراز پایانی آتشفشانی ائوسن	ائوسن میانی- بالایی	ائوسن
منابع	مطالعه حاضر	عادل پور، ۱۳۹۴	سامانی، ۱۳۸۱	نظافتی، ۱۳۷۹	بهبزادی، ۱۳۷۳



شکل ۱۱- نمودار تغییرات عیار مس و نقره در ۱۲ نمونه مینرالیزه (محور افقی شماره نمونه‌ها و محور قائم عیار عناصر نقره و مس را به صورت لگاریتمی نشان می‌دهد).

نتیجه‌گیری

این محدوده به صورت رگه، رگچه و پرکننده حفرات خالی می‌باشد. کانی‌های کالکوسیت ± دیژنیت ± کولیت ± بورنیت ± کالکوپیریت ± تنوریت ± کوپریت ± آزوریت ± مالاکیت ± پیریت ± هماتیت ± مگنتیت پاراژنز کانیاپی را تشکیل می‌دهند. کانی سولفیدی غالب در این کانسار، کالکوسیت است. عیار عنصر نقره بالا است. احتمالاً عنصر نقره در شبکه کانی کالکوسیت، جانشین شده است. مقایسه ویژگی‌های این کانسار با کانسارهای بزرگ دنیا و ایران نشان می‌دهد این کانسار بیشترین شباهت را با کانسارهای مس عباس‌آباد شاهرود و گرماب (ایران) و بوئنا اسپرانزا (شیلی) دارد.

مراجع

آقانباتی، ع.، ۱۳۸۳، "زمین‌شناسی ایران" سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.

سنگ‌های آتشفشانی کانسار مس ورزق به سن پالئوسن- ائوسن شامل تناوبی از گدازه‌ها و مواد آذرآواری هستند که جزء سری کالک‌آلکان محسوب می‌شوند و دارای ماهیت متاآلومین تا پراآلومین و ویژگی کالک‌آلکان غنی از پتاسیم هستند. نسبت Zr/Y ، TiO_2/Al_2O_3 در مقابل Zr/Al_2O_3 و سایر ویژگی‌ها نشان می‌دهد که سنگ‌های مذکور مربوط به قوس‌های آتشفشانی قاره‌ای می‌باشند. تپی‌شدگی عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) و غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) نشانه آغشتگی پوسته در فرآیندهای ماگمایی و آرایش توسط پوسته می‌باشد. سنگ‌های آتشفشانی منطقه ورزق، دگرسانی گرمابی را تحمل کرده‌اند. شدت دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی متفاوت است و با فاصله گرفتن از زون کانه‌دار از شدت دگرسانی‌ها کاسته می‌شود. کانی‌سازی مس در کانسار مس ورزق عمدتاً در گدازه‌ها و مواد آذرآواری صورت گرفته است. کانه‌سازی مس در

- and Stern, S., 2012, "petrogenesis of granitoids, age assessment method zircon U-Pb, Sr-Nd isotope geochemistry and mineralization of Tertiary important event in the Lut Block, East Iran", *Journal of Economic Geology*, V. 4, P. 1-27.
- 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*, V. 45, P. 177-195.
- Morata, D. and Aguirre, L., 2003, "Extensional lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29° 20'-30° S)", *Chile: geochemistry and petrogenesis: Journal of South American Earth Sciences*, V. 16, P. 459-476.
- Middlemost, E. A. K., 1994, "Naming materials in magma/igneous rock system", *Earth Science Review*, 37, P.215-224.
- Muller, D. and Groves, D.I., 1997, "Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization", *Lecture Notes in Earth Sciences*, P.235.
- Nakamura, K., 1977, "Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation-Principle and proposal", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, V. 2, P. 1-16.
- Pearce, J.A., 1983, "Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins", In: *Hawkesworth, C.J. and Nurry, M.L. (Eds.), Continental basalts and mantle xenoliths. Shiva, Nantwich*, V. 105, P. 230-249.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1973, "Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses", *Earth and Planetary Science Letters*, V. 19, P. 290-300.
- Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979, "Petrogenetic implication of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 69, P. 33-47.
- Pearce, J.A. and Peate, D.W., 1995, "Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, V. 23, P. 251-285.
- Pecceirillo, R. and Taylor, S.R., 1976, "Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 58, P. 63-81.
- Pirajno, F., 2009, "Hydrothermal processes and mineral systems", *Geological Survey of Western Australia*, P.1250.
- Ramdohr, P., 1980, "the ore minerals and their intergrowths", *Pergamon press, University of Michigan*, P.1207.
- Rollinson, H., 1998, "Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation", *Longman, Singapore*, P.446.
- Rutherford, M.J. and Hill, P.M., 1993, "Magma ascent rates from amphibole breakdown: An experimental study applied to the 1980-1986 Mount St. Helens eruptions", *Journal of Geophysical Research*, V. 98, P. 667-685.
- Shand, S.J., 1943, "Eruptive rocks: Their genesis, composition, classification and their relation to ore-deposits with a chapter on meteorite", *New York*, P.488.
- Shelley, D., 1993, "Igneous and metamorphic rocks under the microscope", *Chapman and Hall, London*, P.445.
- بهزادی، م.، ۱۳۷۳، "بررسی زمین‌شناسی اقتصادی اندیس مس قبله بولاغ واقع در منطقه طارم سفلی - استان زنجان" پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۲۰ صفحه.
- سامانی، ب.، ۱۳۸۱، "متالوژنی کانسارهای مس نوع مانتو در ایران" ششمین همایش زمین‌شناسی ایران، ۸ صفحه.
- عادل‌پور، م.، ۱۳۹۱، "زمین‌شناسی اقتصادی کانسار مس گرماب-قائن (خراسان جنوبی)" پایان‌نامه ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۳۷ صفحه.
- نظافتی، ن.، ۱۳۷۹، "زمین‌شناسی اقتصادی پتانسیل‌های فلزی منطقه نطنز" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۷۰ صفحه.
- Le Bas, L., Maitre, L., Streckeisen and Zanettin, A., 1986, "A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram", *Journal of Petrology*, V. 27, P. 375-750.
- Beane, R.E. and Titley, S.R., 1981, "Geologic characteristics, environments and genesis of porphyry copper deposits", part 2. *Hydrothermal alteration and mineralization. Economic Geology*, V. 75, P. 235-262.
- Best, M.G., 1982, "Igneous and metamorphic petrology", *Freeman*, P.630.
- Chappell, B. W., 1992, "I and S-type granites in the Lachlan Fold Belt", *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, V. 83, P.1-26.
- Devine, J.D. and Sigurdsson, H., 1995, "Petrology and eruption styles of Kick'em-Jenny submarine volcano, Lesser Antilles island arc", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, V. 69, P. 35-58.
- Fisher, R.V. and Schmincke, H.U., 1984, "Pyroclastic rocks", *Springer-Verlag, Berlin*, P.472.
- Glenn, A.G., 2004, "The influence of melt structure on trace element partitioning near the peridotite solidus", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 147, P. 511-527.
- Harris, N.B.W., Pearce, J.A. and Tindle, A.G., 1986, "Geochemical characteristics of collision-zone magmatism, In: Coward, M.P., Ries, A.C.(Eds), Collision Tectonics", *Geological Society of London, Special Publication*, V. 19, P. 67-81.
- Hiroshi, K. and Kenji, S., 2005, "Magma mixing recorded in intermediate rocks associated with high-Mg andesites from the Setouchi volcanic belt, Japan", *implications for Archean TTG formation, Journal of Volcanology and Geothermal Research*, V. 140, P. 241-271.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, "A guide to the classification of the common volcanic rocks", *Journal of Earth Sciences*, V. 8, P. 235-458.
- Kamber, B.S., Ewart, A., Collerson, K.D., Bruce, M.C. and McDonald, G.D., 2002, "Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archean crustal growth models", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 144, P. 38-56.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh shafarodi, A., Farmer, L.

- Stewrat, M.L. and Pearce, T.H., 2004**, "Sieve-textured plagioclase in dacitic magma: Interference imaging results", *American Mineralogy*, V. 89, P. 348-351.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989**, "Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), *Magmatism in the ocean basins*", *Geological Society of London, Special Publication*, 42. Blackwell, Oxford, P. 313-346.
- Thompson, A. B., 1982**, "Magmatic of the British Tertiary volcanic province", *Scottish Journal of Geology*. V.18, P. 50-107.
- Ulrich, T. and Heinrich, C.A., 2002**, "Geology and alteration geochemistry of the Porphyry Cu-Au Deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina", *Economic Geology*, V. 97, P. 1865-1888.
- Wilson, M., 1989**, "Igneous petrogenesis", *Unwin Hyman, London*. P.340.
- Wood, D.A., 1980**, "The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province", *Earth and Planetary Science Letters*, 50: P.11-30.
- Wu, F.Y., Jahn B.m., Wilde, S.A., Lo, C-H., Yui, T-F., Lin Q., Ge, W-c. and Sun D-y., 2003**, "Highly fractionated I-type granites in NE China, I: geochronology and petrogenesis", *Lithos*, V. 66, P. 241-273.
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y. and Lee, H.Y., 2012**, "Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran", *Lithos*. V. 154, P. 392-405.

