فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۱۰، شماره ۴۰، زمستان ۱۳۹۵، صفحات ۱- ۱۹

زمین‌شناسی، دگرسانی، کانه‌زایی و مطالعات ژئوشیمیایی در معدن مس، منطقه گل‌چشمه، جنوب نیشابور

فاطمه نجمی[۱ و *]، سید احمد مظاهری[۲]، سعید سعادت[۳] و اعظم انتظاری هرسینی[۴]

۱. دانشجو کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳. استادیار گروه زمین‌شناسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۴. مربی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۱/۳۰

چکیده

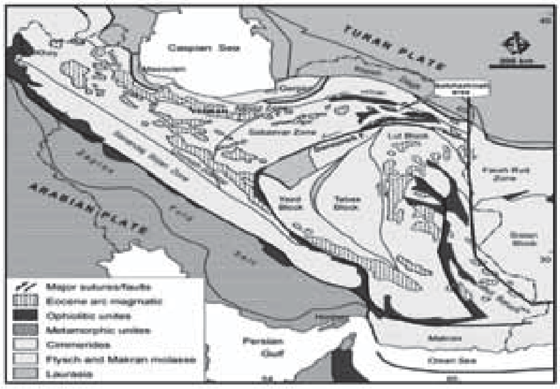
معدن مس گل‌چشمه در شمال شرق ایران (جنوب شهر نیشابور) در حاشیه زون ساختاری سبزوار واقع گردیده است. براساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، رخنمون‌های سنگی این منطقه شامل سنگ‌های آتشفشانی منسوب به ائوسن و یا جوان‌تر با ترکیب آندزیت تا بازالت به همراه واحدهای رسوبی، سنگ‌آهک و میان لایه‌هایی از توف و برش می‌باشد. زون‌های دگرسانی مرتبط با لایه‌های آندزیتی- بازالتی شامل کربناتی شدن، پروپلیتیکی، اندکی سیلیسی، آرژیلیکی و سرسیتی می‌باشد و کربناتی شدن مهم‌ترین دگرسانی منطقه می‌باشد. کانه‌زایی به‌طور گسترده در میان واحدهای آتشفشانی منسوب به ائوسن و یا جوان‌تر رخ داده و از نظر بافتی به‌صورت رگه - رگچه، پرکننده حفرات و فضاهای خالی (آمیگدالوئید)، دانه پراکنده، آغشتگی در پلاژیوکلازها و جانشینی صورت گرفته است. برپایه مطالعات کانه‌نگاری صورت گرفته، کانه‌های اصلی حاوی مس به دو فاز اکسیدی و سولفیدی قابل تفکیک هستند که کانه‌زایی به‌طور عمده شامل فاز اکسیدی است و به‌صورت آغشتگی در سطوح شکستگی‌ها و خلل و فرج و یا پرکننده فضاهای خالی در سنگ میزبان مشاهده می‌شود. کانه‌های اکسیدی به‌صورت کانه‌های کربناتی و سیلیکاتی مس شامل مالاکیت، آزوریت و کریزوکلا بوده و کانه‌های سولفیدی مس شامل کالکوسیت، کوولیت، به مقدار جزئی کالکوپیریت، بورنیت، دیژنیت، تتراهدریت و همچنین مس خالص بوده که در این بین، کالکوسیت‌ها بیشترین فراوانی کانه‌های سولفیدی را دارا می‌باشند. کانه اصلی سولفیدی مس در این محدوده کالکوسیت می‌باشد که احتمالاً شاهد دو نسل از آن هستیم. نسل اول که به‌صورت اولیه و پراکنده در اکثر نقاط تشکیل شده است و نسل دوم کالکوسیت که از تبدیل بورنیت و کالکوپیریت به‌صورت جانشینی و در شرایط سوپرژن ایجاد شده است. مطالعات ژئوشیمیایی حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده این است که سنگ‌های آتشفشانی موجود در منطقه ماهیت بازالت‌های کالک آلکالن با گرایش شوشونیتی را داشته و از نظر جایگاه زمین‌ساختی احتمالاً شاخص ماگماتیسم کمان قاره‌ای مرتبط با زون فرورانش می‌باشد. علاوه بر این، برپایه نتایج حاصل از آنالیز عناصر کمیاب و نادر خاکی مقدار بالای Nb (بیش از ۱۶ گرم در تن)، غنی‌شدگی Rb و نسبت $(Zr/Nb)_N$ (کمتر از ۲ و بین ۰/۷ تا ۰/۴۶) می‌تواند نشان‌دهنده‌ی آغشتگی ماگما با پوسته قاره‌ای باشد. نبود آنومالی مشخص از عنصر Eu نشان‌دهنده شرایط ذوب در حالت اکسیدان می‌باشد. با توجه به مطالعات صورت گرفته و با تأکید بر شواهد مختلف از قبیل محیط زمین‌ساختی، کانی‌شناسی و نوع سنگ دربرگیرنده، ساخت و بافت ماده معدنی، پاراژنز کانه‌نگاری، شکل ماده معدنی و عناصر همراه، این منطقه معدنی با ذخایر مس نوع مانتو واقع در شیلی مقایسه گردیده است و علیرغم پاره‌ای از تفاوت‌ها، می‌توان منطقه گل‌چشمه را در رده کانسارهای تیپ مس نوع مانتو طبقه‌بندی کرد.

واژه‌های کلیدی: گل‌چشمه، آندزیت، کانه‌زایی، دگرسانی، مس مانتو، میشیگان.

* نویسنده مرتبط: eng.najmi20@gmail.com

مقدمه

منطقه گل‌چشمه در ۲۲۰ کیلومتری جنوب‌غرب مشهد و ۴۰ کیلومتری جنوب شهرستان نیشابور در حدفاصل "۰۹ '۴۲ °۵۸ - "۴۸ '۴۴ °۵۸ طول شرقی و "۵۰ '۳۶ °۳۵ - "۵۹ '۴۸ °۳۵ عرض شمالی در شش کیلومتری روستای جنداب واقع گردیده است. اثر کوهزایی آلپ - هیمالیا در نواحی زیادی از ایران و ترکیه دیده می‌شود که این امر سبب به هم پیوستن بلوک‌های کیمرین در بخش‌های مختلف شده است. از جمله این بلوک‌ها ایران مرکزی است و براساس تقسیم‌بندی ارائه شده توسط اشتوکلین و نبوی (۱۳۵۱) این بلوک از شمال به زون البرز، از غرب به زون سنندج - سیرجان و از شرق به زون شرق ایران محدود می‌شود (Berberian and Berberian، 1981) و منطقه مطالعاتی گل‌چشمه نیز بخشی از این بلوک است که در حاشیه زون سبزوار و شمال گسل بزرگ درونه قرار گرفته است (شکل ۱). فعالیت‌های متعدد ماگماتیسم در زمان‌های مختلف در اغلب زون‌های ساختاری ایران دیده می‌شود. همگرایی میان صفحات در انتهای کرتاسه پایانی در زمان بسته شدن اقیانوس نئوتتیس در ایران و ترکیه، نقش مهمی در افزایش شدت ماگماتیسم دوره ائوسن داشته و سبب رخنمون یافتن فراوان سنگ‌های آذرین در این نواحی شده است. ماگماتیسم مرتبط با فرورانش از ۳۵ تا ۵۰ میلیون سال اغلب با حضور سنگ‌های درونی و آتشفشانی شوشونیتی وکالک آلکالن اسیدی تا حد واسط همراه بوده است (Stocklin and Nabavi، 1972). همچنین اشرف پور (۱۳۸۶)، ژئوشیمی سنگ‌های جنوب تا جنوب شرق نیشابور (ارغش - گل‌چشمه) را به نوار ارومیه - دختر شبیه دانسته و آنها را متعلق به سری پتاسیم متوسط تا بالا، با گرایش کالک آلکالن و شاخص ماگماتیسم کمان قاره‌ای در ارتباط با فرورانش در نظرگرفته است. مطالعات قبلی انجام گرفته در محدوده مطالعاتی، در قالب نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ کدکن (نادری و ترشیزیان، ۱۳۷۷) و ۱:۲۵۰۰۰۰ تربت حیدریه (واعظی پور و علوی تهرانی، ۱۳۷۰) و گزارش اکتشاف نهایی منطقه گل‌چشمه موجود می‌باشد (سعادت، ۱۳۹۱). منطقه در حال حاضر به‌عنوان یک معدن فعال در حال بهره‌برداری و استخراج است و امید است بتوان با ارائه داده‌ها و اطلاعات صحیح که برخی از آنها در این پژوهش آمده است به‌عنوان یک منطقه مستعد و دارای پتانسیل کانه‌زایی معرفی شده و مورد توجه قرار گیرد. به دلیل آنکه منطقه مورد مطالعه از لحاظ کانه‌زایی مستعد بوده و در نزدیکی آن اندیس‌های معدنی متعددی نیز گزارش شده است، می‌تواند به‌عنوان الگوی اکتشافی نیز برای آنها مطرح شود. به‌طورکلی هدف این پژوهش، تهیه دقیق نقشه زمین‌شناسی، دگرسانی، کانه‌زایی با مقیاس ۱:۵۰۰۰، بررسی و انجام مطالعات دقیق زمین‌شناسی، پتروگرافی، ژئوشیمی، کانه‌زایی، تعیین تیپ کانه‌زایی و ژنز احتمالی و ارائه مدل اکتشافی مناسب و مقایسه آن با کانسارهای مشابه در دیگر نقاط ایران و سایر کشورها می‌باشد.



شکل۱. نقشه ساختاری ایران. موقعیت محدوده مورد مطالعه در حاشیه زون سبزوار مشخص شده است (Stocklin and Nabavi، 1972)

روش مطالعه

در این پژوهش بیش از ۴۰ مقطع نازک، شش مقطع نازک- صیقلی و ۱۲ مقطع صیقلی مطالعه شد و سپس بر اساس آنها نقشه زمین‌شناسی، آلتراسیون و کانه‌زایی درمقیاس ۱:۵۰۰۰ تهیه شد. آنالیز عناصر اصلی توسط دستگاه XRF در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران برروی دوازده‌نمونه‌ از واحدهای ولکانیکی منطقه با تفکیک لیتولوژیکی صورت گرفت. نوع دستگاه آنالیز Magic Pro ساخت کشور هلند می‌باشد. از مجموع نمونه‌های فوق تعداد هشت نمونه معرف برای آنالیز به روش ICP-MS برای ۵۸ عنصر با حلال (اسید HCL + اسیدنیتریک + (تیزاب سلطانی)) برای آنالیز

عناصر کمیاب و نادر خاکی به آزمایشگاه SGS کشور صربستان ارسال شد. مطالعات ژئوشیمیایی سطحی برروی ۱۵ نمونه خرده سنگی از محل ترانشه‌ها و دیگر نقاط اکتشافی به روش ICP-OES در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران برای تعیین عیار مس و سایر عناصر نیز بررسی شد. نمونه‌برداری به روش خرده سنگی از بخش‌های مختلف کانسار و با فواصل مشخص شامل ترانشه‌ها و دیگر نقاط امیدبخش کانه‌زایی انجام شد و پس از خردایش نمونه‌ها، حدود ۳۰۰ گرم از هر نمونه به آزمایشگاه ارسال شد.

زمین‌شناسی عمومی

محدوده معدن مس گل‌چشمه در شمال‌غرب ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ کدکن و در حاشیه زون ساختاری سبزوار واقع شده است (نادری و ترشیزیان، ۱۳۷۷). منطقه مورد مطالعه بخشی از ارتفاعات شمال‌غرب کدکن می‌باشد که روندی شمال‌غرب - جنوب‌شرق دارد و در میان واحدهای آتشفشانی منسوب به ائوسن همراه با واحدهای سنگ آهکی قرار گرفته است. واحدهای عمده لیتولوژیکی در این ناحیه عبارتند از:

۱. واحد آتشفشانی پالئوسن فوقانی - ائوسن که شامل گدازه‌های آندزیتی، تراکی‌آندزیت، ریوداسیت، آگلومرا و برش می‌باشد.

۲. واحد آذرآواری - آتشفشانی ائوسن بالایی.

۳. توده‌های گرانیتوئیدی شامل گابرودیوریت، دیوریت، گرانودیوریت و گرانیت به سن اواخر ائوسن تا الیگوسن.

واحدهای آذرین این ناحیه به سمت شمال‌غرب (محدوده معدنی طلا- آنتیموان ارغش)، در امتداد نوار ماگماتیسم پس از کرتاسه هستند که داخل و اطراف زون افیولیتی سبزوار و در امتداد شمال‌غرب - جنوب‌شرق مشاهده می‌شود (کیوانفر و عسگری، ۱۳۷۸). این محدوده در میان واحدهای آتشفشانی منسوب به ائوسن و یا جوان‌تر واقع شده است. واحدهای آتشفشانی در مقیاس صحرایی روند شمال‌غرب - جنوب‌شرق دارند که رنگ آنها از خاکستری تا قرمز (زون کانه‌زایی) متغیر است و دارای فنوکریست‌های پلاژیوکلاز با بافت پورفیری می‌باشند. به نظر می‌رسد این واحدهای آتشفشانی با واحد ولکانوسدیمنتری آگلومرا - توف آندزیتی در ارتباط هستند، اما به‌رغم داشتن مرز مشترک با واحد سنگ آهک، هیچ‌گونه ارتباطی به لحاظ کانه‌زایی ندارند (شکل۳).

پتروگرافی

به‌منظور تفکیک بیشتر و دقیق‌تر واحدهای سنگی منطقه، نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۵۰۰۰ از محدوده مطالعاتی تهیه شد (شکل۲). درمجموع واحدهای سنگی منطقه به انواع زیر تفکیک شدند:

سنگ آهک: این واحد در شمال‌شرق منطقه به رنگ سفید تا نخودی رنگ گسترش یافته است. دارای مرز مشترک با واحد آندزیتی بوده (شکل۳-a) و در مقیاس میکروسکوپی دارای فسیل نومولیت هستند (شکل۴-a).

آگلومرا - توف آندزیتی: این واحد نیز گسترش چندانی در منطقه به‌جز بخش‌های مرکزی ندارد و احتمالاً در ارتباط با واحدهای آندزیتی می‌باشند. در مقیاس صحرایی این واحد از قطعات نسبتاً کوچک تا متوسط در حدود یک سانتی‌متر تا قطعات نسبتاً بزرگ در حدود ۱۰ سانتی‌متر تشکیل شده است. جنس قطعات موجود غالباً از نوع آندزیت می‌باشد (شکل۳-b).

آندزیت: این واحد بیشترین گسترش را در محدوده مورد بررسی دارا می‌باشد. بافت این واحد سنگی عمدتاً پورفیری و به‌طورفرعی شامل فلتی تا گلومروپورفیری با زمینه دانه‌ریز می‌باشد. میزان فنوکریست‌های آن بین ۱۰ تا ۲۰ درصد متغیر می‌باشد و عمدتاً شامل پلاژیوکلاز است و اندازه دانه‌های آن بین یک تا هفت میلی‌متر متغیر می‌باشد. همچنین کمتر از دو درصد هورنبلند اوپاسیتی و پیروکسن اومفاسیتی شده نیز در این واحدها قابل مشاهده است. در بعضی نقاط پلاژیوکلازها در حال تبدیل به کربنات، اپیدوت و کانی‌های رسی می‌باشند و رگچه‌های اکسید آهنی نیز در آنها دیده می‌شود (شکل۴-b).

مگاآندزیت: این واحد سنگی عمدتاً در بخش مرکزی و غربی منطقه رخنمون دارد. بافت آن پورفیری می‌باشد. این واحد از لحاظ کانی‌شناختی دقیقاً مشابه واحد آندزیت است، تنها تفاوت آنها اندازه فنوکریست‌های پلاژیوکلاز می‌باشد که به بیش از ۱۰میلی‌متر می‌رسد (شکل۴-c).

تراکی‌آندزیت: این واحد گسترش کمی در محدوده مورد بررسی دارد و عمدتاً در بخش مرکزی تا جنوب‌شرقی دیده می‌شود. بافت این واحد سنگی عمدتاً پورفیری و گاهی جریانی می‌باشد. میزان‌فنوکریست‌های آن بین ۵ تا ۱۲

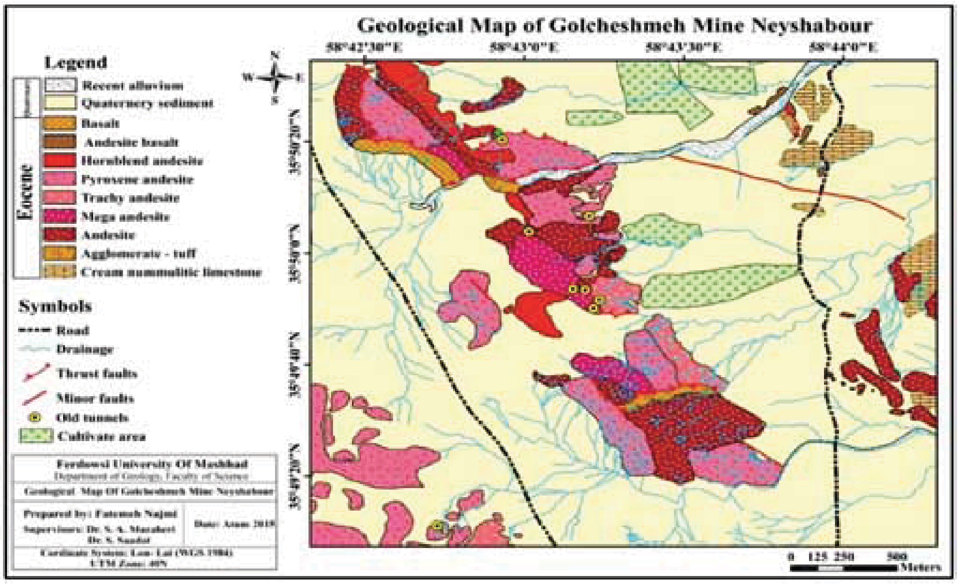
درصد متغیر بوده و شامل پلاژیوکلاز و آلکالی فلدسپات است که اندازه دانه‌های پلاژیوکلاز بین یک تا هفت میلی‌متر و آلکالی فلدسپات‌ها بین یک تا سه میلی‌متر متغیر می‌باشد، همچنین کمتر از دو درصد هورنبلند اوپاسیتی و پیروکسن اومفاسیتی شده نیز در این واحد قابل مشاهده می‌باشد که در بعضی نقاط پلاژیوکلازها در حال تبدیل به کربنات و کانی‌های رسی می‌باشند (شکل۴-d).

پیروکسن آندزیت: این واحد نیز دارای گسترش قابل ملاحظه‌ای در محدوده مطالعاتی می‌باشد. بافت این واحد سنگی، پورفیری تا گلومروپورفیری با زمینه دانه‌ریز می‌باشد. اندازه فنوکریست‌های پلاژیوکلاز بین یک تا ۱۰ میلی‌متر و پیروکسن‌ها بین ۰/۵ تا سه میلی‌متر متغیر است و میزان پیروکسن‌ها در حدود پنج تا شش درصد می‌باشد. پیروکسن‌ها به‌طور عمده از نوع دیوپسید، اوژیت و اومفاسیتی است که در حال کربناتی شدن و تبدیل به کلریت و کانی اوپک می‌باشند (۴-e).

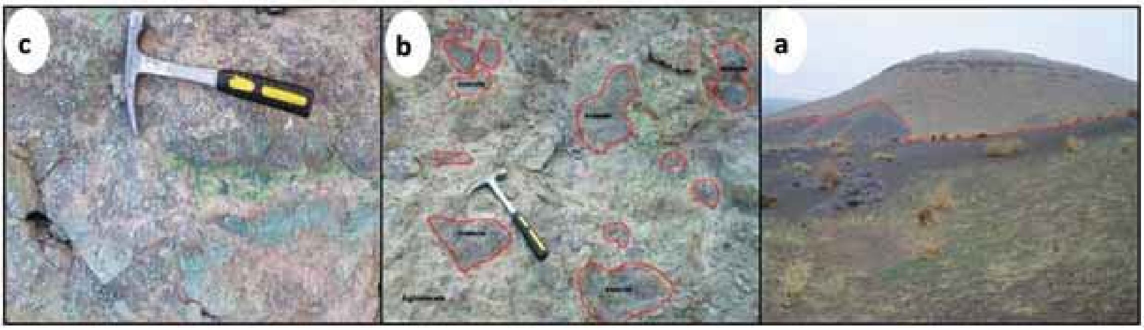
هورنبلندآندزیت: این واحد سنگی کمترین رخنمون را در محدوده مورد بررسی دارا می‌باشد و عمدتاً در بخش مرکزی و شمال‌غرب دیده می‌شود. بافت این واحد سنگی عمدتاً پورفیری و به‌طورفرعی آمیگدالوئید تا گلومروپورفیری با زمینه دانه‌ریز می‌باشد. میزان فنوکریست‌های آن از ۱۰ تا ۱۲ درصد متغیر است و شامل پنج تا ۱۰ درصد پلاژیوکلاز و چهار تا شش درصد هورنبلند به‌صورت اوپاسیتی می‌باشد. در این واحد اندازه فنوکریست‌های پلاژیوکلاز بین یک تا پنج میلی‌متر و هورنبلند بین ۰/۵ تا دو میلی‌متر متغیراست. پلاژیوکلازها به همراه هورنبلند در حال تبدیل به کربنات، اپیدوت و کلریت هستند (شکل ۴-f).

آندزیت‌بازالت: این واحد رخنمون کوچکی در بخش شرقی منطقه در مجاورت واحدهای آهکی دارد. بافت این واحد سنگی، پورفیری، آمیگدالوئید تا گلومروپورفیری با زمینه دانه‌ریز می‌باشد. میزان فنوکریست‌های آن از پنج تا ۱۰ درصد متغیراست و شامل پلاژیوکلاز، الیوین ادینگزیتی و پیروکسن به‌صورت اومفاسیتی و دیوپسیدی می‌باشد. در این واحد اندازه فنوکریست‌های پلاژیوکلاز بین یک تا پنج میلی‌متر متغیر است و به همراه پیروکسن‌ها در حال تبدیل به کربنات و مقدار جزیی کلریت هستند. این واحد دارای حفراتی است که با کربنات پرشده است (شکل۴-g).

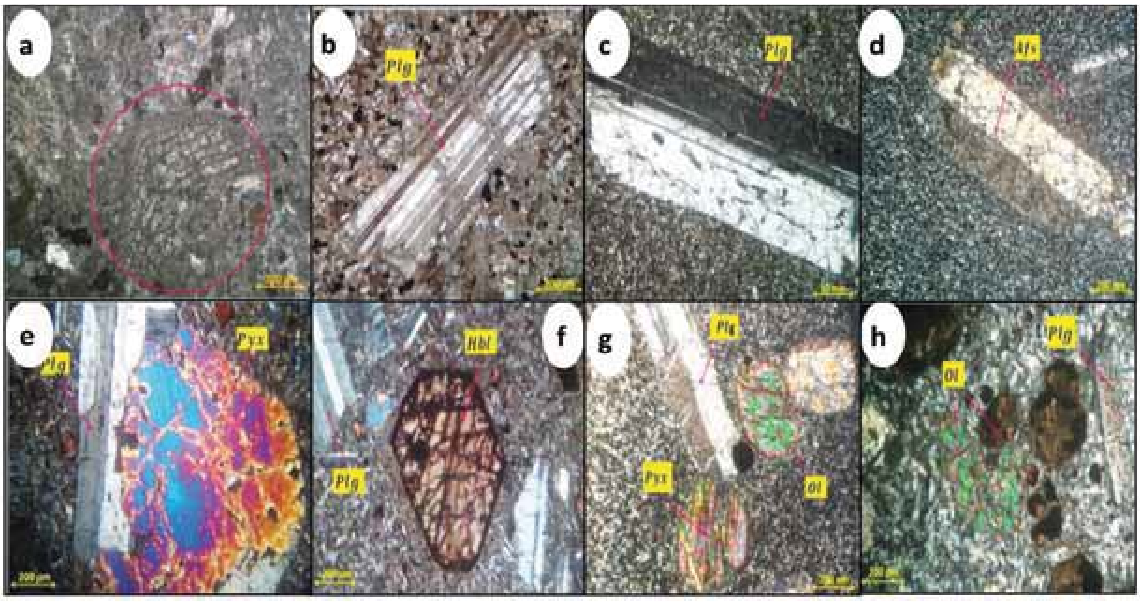
بازالت: بافت این واحد سنگی پورفیری است که رخنمون کوچکی در بخش شمال‌غرب محدوده دارد و دارای پلاژیوکلاز، پیروکسن (اوژیت، اوژیت- دیوپسید)، هورنبلند اوپاسیتی و الیوین ادینگزیتی می‌باشد،که هورنبلندها و الیوین‌ها در حال تبدیل به کربنات هستند. اندازه پلاژیوکلازها بین یک تا پنج و پیروکسن‌ها بین ۰/۲ تا ۱۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد (شکل۴-h).



شکل۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در مقیاس ۱:۵۰۰۰



شکل۳. تصاویر صحرایی a) واحد سنگ آهک دارای مرز مشترک با آندزیت؛ b) آگلومرا - توف آندزیتی دارای قطعات آندزیت؛ c) واحد آندزیت



شکل۴. تصاویر میکروسکوپی از واحدهای ولکانیکی منطقه (تمامی تصاویر در نور xpl می‌باشند)؛ a) واحد آندزیت دارای فنوکریست پلاژیوکلاز در زمینه میکرولیتی؛ b) واحد مگا آندزیت دارای فنوکریست پلاژیوکلاز با طول بیش از ۱۰ میلی‌متر، c) واحد تراکی آندزیت حاوی فنوکریست آلکالی فلدسپار؛ d) واحد پیروکسن آندزیت همراه با فنوکریست اوژیت و پلاژیوکلاز؛ e) واحد هورنبلند آندزیت واجد فنوکریست هورنبلند کاملاً شکل‌دار در حال تبدیل به کربنات؛ f) کانی هورنبلند در حال تبدیل به کلریت؛ g) واحد آندزیت بازالت دارای فنوکریست‌های الیوین، پلاژیوکلاز و پیروکسن؛ h) واحد بازالت همراه با بلورهای الیوین و پلاژیوکلاز (کلریت = Chl، هورنبلند = Hbl، پیروکسن = Pyx، الیوین = Ol، آلکالی فلدسپار = Afs، پلاژیوکلاز = Plg)

دگرسانی

برپایه مطالعات صحرایی و میکروسکوپی انجام گرفته، زون‌های آلتراسیون کربناتی ضعیف تا قوی، پروپلیتیک ضعیف تا متوسط در منطقه مشاهده می‌شود که به شرح زیر می‌باشند (شکل ۵):

دگرسانی کربناته قوی: این دگرسانی در بخش شمال‌غرب، واحدهای آندزیت و پیروکسن آندزیت را تحت تاثیر قرار داده است. به‌طور عمده بیش از ۵۰ درصد پلاژیوکلازها و پیروکسن‌ها به کربنات تبدیل شده‌اند.

دگرسانی کربناته متوسط: این دگرسانی در بخش مرکزی منطقه، واحد آندزیت را تحت تاثیر قرار داده است و پلاژیوکلازها در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد تبدیل‌شدگی به کربنات نشان می‌دهند.

دگرسانی کربناته ضعیف: این دگرسانی در بخش مرکزی و جنوب‌شرقی منطقه و در واحدهای آندزیت و پیروکسن‌آندزیت مشاهده می‌شود که پیروکسن‌ها و پلاژیوکلازها در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد به کربنات تجزیه شده‌اند.

دگرسانی کربناته متوسط-آرژلیک ضعیف: این دگرسانی در بخش جنوب‌شرقی، منطقه واحدهای آندزیت، تراکی‌آندزیت و پیروکسن‌آندزیت را تحت تاثیر قرار داده است. کانی‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن در حدود ۳۰ درصد به کربنات و پلاژیوکلاز حدود پنج درصد به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند.

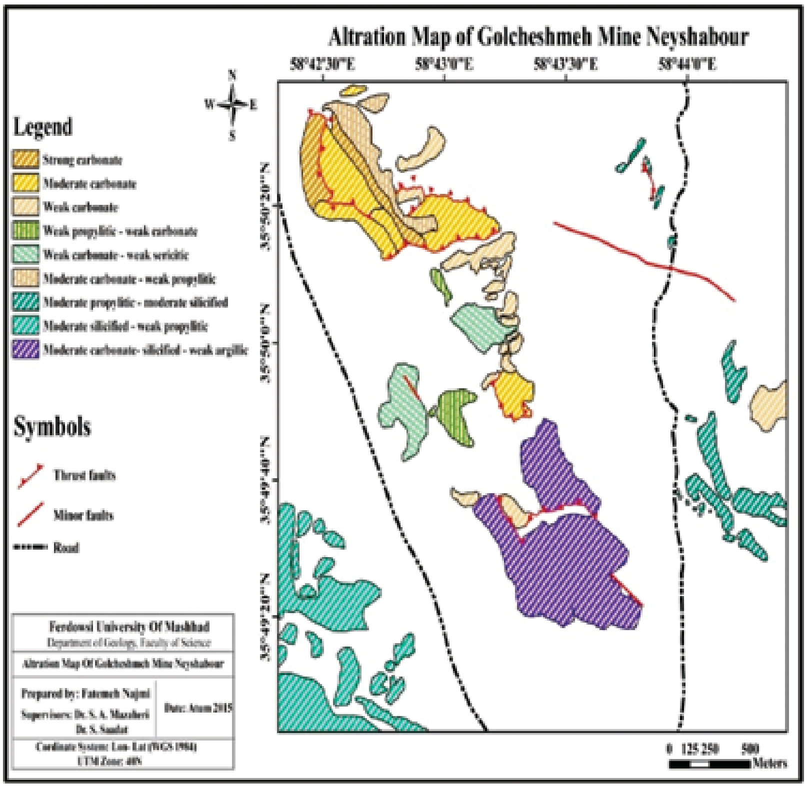
دگرسانی کربناته متوسط-پروپلتیک ضعیف: این دگرسانی در بخش شمال‌غرب واحد هورنبلندآندزیت را در برگرفته است که پلاژیوکلاز و هورنبلند در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد به کربنات و پنج تا ۱۰ درصد به اپیدوت- کلریت تبدیل شده‌اند.

دگرسانی پروپلتیک متوسط: این دگرسانی بخش کوچکی از شرق منطقه، واحد آندزیت‌بازالت را تحت تاثیر قرار داده است که کانی‌های موجود در حدود ۲۵ درصد تبدیل‌شدگی به اپیدوت- کلریت را نشان می‌دهند.

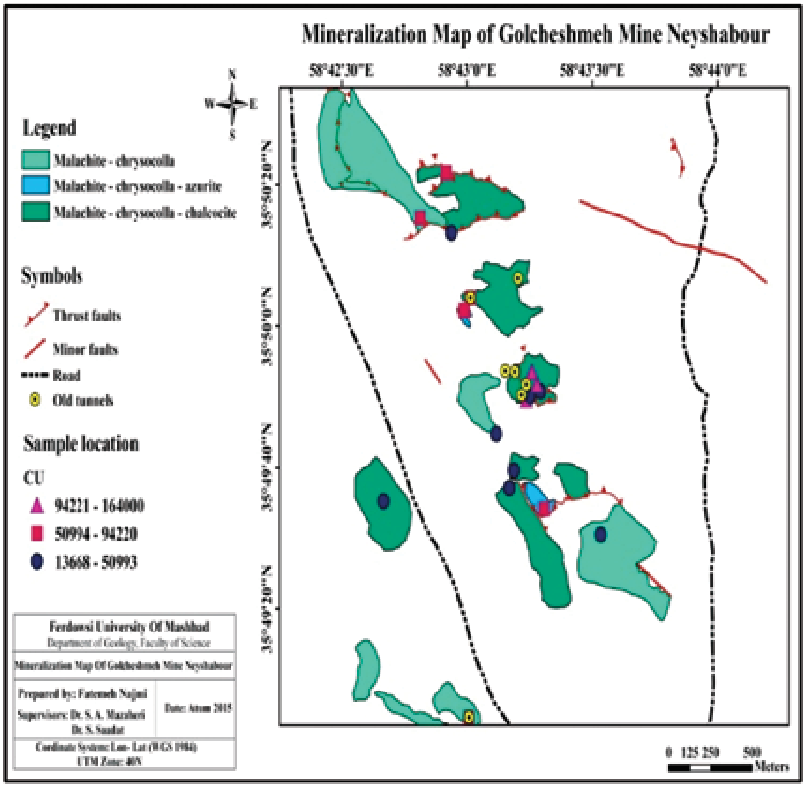
دگرسانی پروپلتیک ضعیف: این دگرسانی واحد پیروکسن‌آندزیت و هورنبلندآندزیت را در مرکز و جنوب‌غرب منطقه در برگرفته است. در حدود پنج تا ۱۰ درصد پلاژیوکلازها، پیروکسن‌ها و هورنبلندها به اپیدوت- کلریت تجزیه شده‌اند.

کانه‌زایی

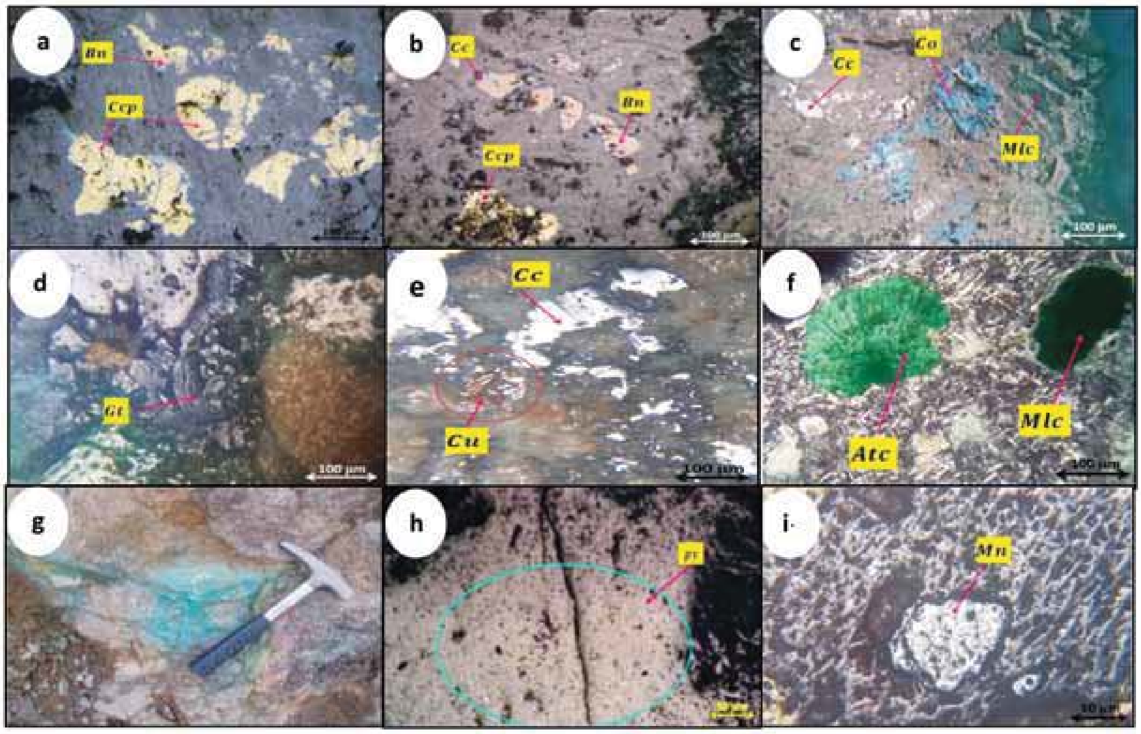
شواهد کانه‌زایی در منطقه گل‌چشمه بسیار گسترده می‌باشد و به‌طورکلی کانه‌زایی به اشکال سولفیدی و اکسیدی مس قابل مشاهده است (شکل ۶). کانه‌زایی مس عمدتاً شامل فاز اکسیدی است که به‌طور ثانویه کانه‌های کربناتی مس شامل مالاکیت ،آزوریت، کانی سیلیکاته مس کریزوکلا و احتمالاً کانی هیدروکلر مس آتاکامیت را شامل می‌شود. کانه‌های مس در اکثر نقاط منطقه گل‌چشمه قابل مشاهده می‌باشند که به‌صورت آغشتگی، جانشینی پلاژیوکلاز، پرکننده فضاهای خالی و حفرات، دانه پراکنده و رگه-رگچه‌ای به ضخامت ۰/۵ تا پنج سانتی‌متر اکثر واحدهای سنگی مخصوصاً آندزیت‌ها و پیروکسن‌آندزیت‌ها را تحت تاثیر خود قرار داده‌اند. برپایه مطالعه بیش از ۱۸ مقطع نازک صیقلی و بلوک صیقلی، کانه سولفیدی اصلی مس در این منطقه کالکوسیت می‌باشد که به‌صورت رگچه‌های کم ضخامت (کمتر از یک سانتی‌متر) در بخش مرکزی و جنوب‌غربی منطقه و به‌طور عمده در واحدهای مگاآندزیت، آندزیت و پیروکسن‌آندزیت قابل بررسی و مشاهده می‌باشد. علاوه بر آن در این مقاطع آثاری از حضور دیگر سولفیدها مانند پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، کوولیت و به مقدار جزیی دیژنیت و همچنین مس طبیعی نیز دیده می‌شود. حضور این کانه‌های سولفیدی می‌تواند موید این مطلب باشد که احتمالاً شاهد دو نسل از کالکوسیت هستیم، نسل اول که به‌صورت اولیه در درزه‌ها، شکاف‌ها و شکستگی‌ها به‌طور مستقیم از محلول کانه‌دار ایجاد شده و در برخی نقاط در حال تبدیل به کوولیت می‌باشد و نسل دوم کالکوسیت که احتمالاً از تبدیل بورنیت وکالکوپیریت به‌صورت جانشینی و در شرایط سوپرژن ایجاد شده است. در بیشتر موارد نیز نوعی همرشدی بین کانه‌های مس دیده می‌شود که می‌تواند حاکی از چند مرحله کانه‌زایی در منطقه باشد (شکل ۸). همچنین احتمال اینکه کالکوسیت‌ها به مقدار بیشتری به مالاکیت و کریزوکلا در شرایط اکسیدان تبدیل شده باشند نیز وجود دارد. علاوه بر کانه‌های فوق در بسیاری از نقاط آثار حضور مگنتیت و هماتیت نیز دیده می‌شود که این مگنتیت‌ها عمدتا از تجزیه هورنبلندهای موجود در منطقه به وجود آمده‌اند (شکل‌های ۷-a تا ۷-i). در منطقه گل‌چشمه عامل اصلی کانه‌زایی، عملکرد شدید گسل‌ها و نیروهای تکتونیکی می‌باشد که باعث به وجود آمدن درزه، شکستگی و رگه-رگچه در اکثر واحدهای سنگی شده‌اند و این ساختارها معبری برای حرکت و نفوذ محلول‌های حاوی مس مهیا کرده‌اند که در نهایت منجر به تمرکز و افزایش عیار اقتصادی ماده معدنی شده است. با توجه به شواهد کانه‌زایی، کانه‌های موجود و سنگ میزبان آندزیتی این منطقه معدنی قابل مقایسه با کانسارهای تیپ مانتو و کویناوی (میشیگان) می‌باشد.



شکل ۵. نقشه آلتراسیون محدوده مورد مطالعه



شکل۶. نقشه کانه‌زایی محدوده مورد مطالعه



شکل۷. a) همرشدی کانی‌های کالکوپیریت و بورنیت؛ b) کانی کالکوپیریت، بورنیت که در حال تبدیل به کالکوسیت می‌باشند؛ c) کانی‌های مالاکیت و کالکوسیت در حال تبدیل به کوولیت؛d) حضور گوتیت با بافت گل کلمی؛ e) همرشدی کالکوسیت و مس طبیعی؛ f) مقطع میکروسکوپی که حفرات توسط مالاکیت و آتاکامیت پرشده است؛ g) کانه‌زایی اکسیدی و سولفیدی مس، شامل آغشتگی‌های مالاکیت، کریزوکلا و کالکوسیت؛ h) حضور پیریت دانه پراکنده در متن سنگ آندزیتی؛ i) حضور کانی مگنتیت (کالکوپیریت = Ccp، بورنیت = Bn، کالکوسیت =Cc، کوولیت =Co، مالاکیت =mal، مس طبیعی = Cu، گوتیت = Gt، پیریت =py)

توالی پاراژنتیکی کانسار

بر پایه مطالعه مقاطع بلوک‌صیقلی و نازک‌صیقلی و بررسی بافت و ساخت‌های موجود و شواهد صحرایی، توالی پاراژنتیکی کانه‌های موجود در منطقه به‌صورت زیر به دست آمده است:

کانه‌زایی به‌طور عمده در واحدهای آندزیتی رخ داده است. ترکیب کانی‌شناسی ماده معدنی شامل کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، کوولیت، دیژنیت، تترائدریت، مس طبیعی، پیریت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا و آتاکامیت می‌باشد که به‌صورت رگه - رگچه‌ای، پرکننده فضاهای خالی، جانشینی، پراکنده و تراوشی دیده می‌شوند.

مرحله فعالیت آتشفشانی: در این مرحله در شرایط کششی حاکم بر حوضه درون کمان آتشفشانی ائوسن در زیر پهنه سبزوار، سنگ‌های آتشفشانی، آذرآواری، تخریبی و کربناتی رسوبی تشکیل شده است. بر اساس مطالعات ICP-MS انجام گرفته از واحدهای سنگی منطقه، میزان مس در گدازه‌های آندزیتی، تراکی‌آندزیتی و بازالتی موجود در حدود ۲۰۸ تا ۳۸۳۸ گرم در تن اندازه‌گیری شده است (جدول۲) که در مقایسه با میزان متوسط آن در سنگ‌های آندزیتی معمولی (۷۵ ppm) به‌نوعی غنی‌شدگی نشان می‌دهد. اثری از رخداد کانه‌زایی مس در واحدهای تخریبی و کربناتی رسوبی دیده نمی‌شود. به نظر می‌رسد هم‌زمان با فعالیت‌های آتشفشانی، پیریت نیز در سنگ میزبان به‌عنوان اولین سولفید تشکیل شده و سبب ایجاد وضعیت احیایی در حوضه شده است. در این مرحله حضور پیریت عامل مهمی برای ایجاد وضعیت احیایی در سنگ میزبان کانه‌زایی محسوب می‌شود.

مرحله کانه‌زایی اولیه (هیپوژن): در این مرحله سیال‌های

ماگمایی - گرمابی حاوی کانه در مسیر خود به یک واحد سنگی مناسب با نفوذپذیری بالا و شرایط احیایی در نتیجه حضور پیریت (واحدهای آندزیتی) رسیده و احتمالاً به‌جای پیریت‌های تشکیل شده در مرحله قبل جانشین می‌شوند و موجب تشکیل سولفیدهای اولیه مس در این مرحله می‌شوند. به احتمال زیاد مس موجود پس از شسته شدن از سنگ‌های آتشفشانی، به‌صورت کمپلکس کلریدی حمل شده و پس از واکنش با پیریت، به‌صورت سولفیدهای اولیه مس شامل کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت جانشین پیریت‌های تشکیل شده در مرحله پیش از کانه‌زایی شده است.

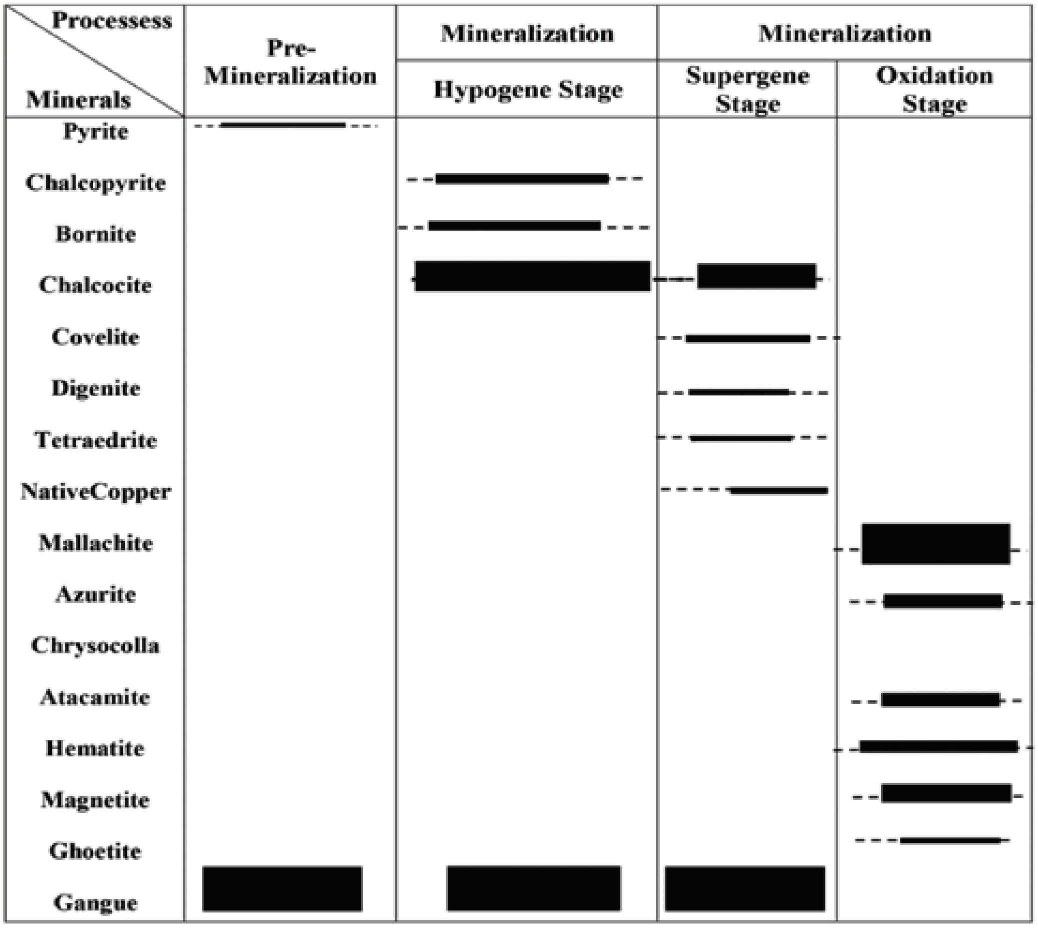
مرحله کانه‌زایی برون‌زاد (سوپرژن): در این مرحله و پس از فرآیندهای تکتونیکی و زمین‌ساختی در منطقه و در اثر چین‌خوردگی و بالاآمدگی سنگ میزبان کانه‌زایی، فرآیندهای سوپرژن سبب تغییراتی در ترکیب کانه‌نگاری سنگ‌ها شده و موجب تغییر و تبدیل کانه‌های سولفیدی اولیه کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت به کانه‌های ثانویه سولفیدی مس مانند کالکوسیت ثانویه، کوولیت، دیژنیت، تترائدریت و مس طبیعی و همچنین کانه‌های کربناتی و سیلیکاتی مس مانند مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا و آتاکامیت و کانه‌های اکسیدی و هیدروکسیدی مانند هماتیت، مگنتیت و گوتیت در شرایط کاملاً اکسیدان شده‌اند.

بحث

همانگونه که بیان شد معدن مس گل‌چشمه در جنوب نیشابور دارای شباهت‌هایی با کانسارهای مس تیپ مانتو است. ذخایر مس نوع چینه‌کران، یکی از بزرگ‌ترین ذخایر سولفیدی مس هستند. محیط نهشته شدن این ذخایر بسیار متنوع بوده و می‌توانند در همه مراحل یک چرخه زمین‌ساختی ماگمایی-رسوبی تشکیل شوند. برای مشخص شدن تیپ کانه‌زایی، ویژگی‌های بحرانی و اساسی کانسار مس گل‌چشمه با ویژگی‌های کانسارهای مس تیپ مانتو در شیلی مقایسه شده است.

محیط ژئوتکتونیکی و سنگ میزبان: در کانسارهای مس واقع در شیلی، بر اساس شواهد موجود کانه‌زایی مس لایه‌کران نوع مانتو عمدتاً در یک حوضه پشت کمانی و تحت تاثیر نیروهای کششی رخ داده است (Richards et al., 2001؛ Morata and Aguirre, 2003). در منطقه معدنی گل‌چشمه نیشابور سنگ‌های میزبان کانه‌زایی، گدازه‌های آندزیتی، آندزیتی-بازالتی و بازالت‌های کالک آلکالن با گرایش شوشونیتی هستند (شکل ۸-a). در حالی که سنگ‌های میزبان و همراه کانه‌زایی مس در کانسارهای شیلی شامل لایه‌های آندزیت و بازالت‌های کالک آلکالن تا تولئیتی با میزان پتاسیم بالا هستند (Tristá-Aguilera et al., 2006). بر اساس شواهد و بررسی‌های انجام شده در منطقه گل‌چشمه، سنگ میزبان، سنگ‌های آندزیتی مانند پیروکسن‌آندزیت، تراکی‌آندزیت، هورنبلندآندزیت، آندزیت و آندزیت‌بازالت با بافت عمده پورفیری در زمینه‌ای دانه‌ریز و آمیگدالوئیدال می‌باشد که به‌صورت متناوب با واحدهای دیگر شامل توف آندزیتی، توف ماسه‌سنگی، آگلومرا و سنگ آهک نومولیت‌دار همراه شده است. براساس بررسی شواهد موجود می‌توان گفت که سنگ میزبان کانه‌زایی در هر دو نوع کانسار تقریبا یکسان و مشابه می‌باشد.

ژئومتری و شکل ماده معدنی: به‌طورکلی کانسارهای تیپ مانتو در تمام مناطق دنیا به‌عنوان کانسارهایی چینه‌کران محسوب می‌شوند که به یک واحد چینه‌ای خاص محدود می‌گردند. در واقع این بدین معنی است که ماده معدنی تنها در یک واحد سنگی خاص شکل می‌گیرد، اما در برخی نقاط در این تیپ کانسارها دو یا سه واحد سنگی متفاوت به‌عنوان میزبان کانه‌زایی معرفی شده‌اند (Kojima et al., 2009). به‌طورکلی در این تیپ کانسارها کانه‌زایی ساختار لایه‌کران داشته و جا به‌جایی‌ها و گسل‌خوردگی‌های بعدی موجب انقطاع و گسستگی آنها شده است (سامانی، ۱۳۸۱؛ Tristá-Aguilera et al., 2006). در منطقه گل‌چشمه کانه‌زایی هیپوژن و سوپرژن در واحدهای آندزیتی موجود رخ داده است که این می‌تواند نشان‌دهنده وضعیت چینه‌کران کانه‌زایی در این محدوده باشد. در این محدوده ماده معدنی به‌طور گسترده به شکل رگه - رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و حفرات و بعضاً جانشینی نهشته شده است که از این نظر نیز با کانسارهای تیپ مانتو شباهت دارد. به دلیل اینکه در این تیپ کانسارها نیز ماده معدنی در داخل رگه - رگچه‌ها و به‌صورت پرکننده حفرات تشکیل شده است.



شکل ۸. مراحل تشکیل و توالی پاراژنتیکی کانسار، در سه مرحله هیپوژن، سوپرژن و اکسیدان در معدن مس گل‌چشمه

کانی‌شناسی و عناصر همراه: درکانسارهای تیپ مانتو در تمام نقاط دنیا و به‌طور خاص در شیلی، مهم‌ترین کانه‌های سولفیدی موجود در کانسار شامل کالکوسیت، بورنیت و کالکوپیریت به همراه مقادیری پیریت می‌باشد. البته بسته به نوع شرایط حاکم بر تشکیل کانسار، این کانه‌ها دارای مقادیر متفاوتی هستند، به‌طوری‌که در بعضی نقاط مقدار کالکوسیت از بورنیت بیش‌تر است و بالعکس. علاوه بر کانه‌های فوق در این تیپ کانسارها، مقادیری کوولیت، مس طبیعی، تترائدریت، دیژنیت، اسفالریت و همچنین کانه‌های اکسیدی مانند مالاکیت، کریزوکلا و آتاکامیت دیده می‌شود (سامانی، ۱۳۸۱) مهم‌ترین عنصر همراه با مس در این تیپ کانه‌زایی نقره می‌باشد که میزان آن از ۸ تا ۳۲ گرم در تن تغییر می‌کند (Maksaev and Zentilli، 2002)، در بعضی از نقاط به حضور بیتومن نیز به‌عنوان یک کانه اصلی که عمدتاً جانشین پیریت می‌شود اشاره شده است (ابولی پور و همکاران، ۱۳۹۴). در کانسار مس گل‌چشمه بر اساس نتایج به دست آمده از آنالیزهای ICP-OES و ICP-MS به ترتیب میزان نقره موجود بین ۱ تا ۱۲/۱ گرم در تن و ۰/۳۳ تا ۱/۱۷ گرم در تن متغیر است. علاوه بر این، مهم‌ترین کانه سولفیدی مس در این منطقه کالکوسیت می‌باشد. همچنین نوعی زون‌بندی در این تیپ کانسارها وجود دارد که در منطقه گل‌چشمه شامل پیریت، کالوپیریت‌بورنیت، کالکوپیریت‌کالکوسیت، بورنیت‌کالکوسیت و کالکوسیت می‌باشد.

دگرسانی و کانی‌های گانگ: به‌طورکلی دگرسانی در کانسارهای تیپ مانتو گسترش کمی دارد و به‌طور معمول نقش مهمی در تعیین تیپ کانه‌زایی ایفا نمی‌کند. مهم‌ترین دگرسانی‌ها در این تیپ کانه‌زایی شامل کربناتی، کلریتی،

اپیدوتی (پروپیلیتیک)، سیلیسی و سرسیتی شدن است. هرچند که دگرسانی آلبیتی فقط در بعضی از کانسارهای تیپ مانتو گزارش شده است، اما پدیده هماتیتی‌شدن سنگ میزبان در این تیپ کانسارها از اهمیت زیادی برخوردار است، به‌طوری که مجموعه سنگ‌های دارای رخداد کانه‌زایی دارای میزان بالایی از هماتیت و هیدروکسیدهای آهن هستند (Kojima et al.، 2009). در منطقه گل‌چشمه در مجموعه واحدهای آندزیتی میزبان کانه‌زایی، کربناتی شدن به‌طور چشمگیری رخ داده است و تمامی واحدها را با شدت کم تا زیاد در برگرفته است. اگرچه دگرسانی‌های هیدروکسیدی آهن (هماتیتی‌شدن)، سیلیسی، پروپلیتیک و مقادیر بسیار جزئی سرسیتی و آرژیلیکی شدن در آنها دیده می‌شود اما در مقیاس کلی رخداد دگرسانی در منطقه گسترش و اهمیت چندانی ندارد و از این نظر نیز با کانسارهای تیپ مانتو قرابت و نزدیکی دارد. در کانسارهای مانتو در شیلی، مهم‌ترین کانی‌های گانگ و باطله همراه با کانه‌زایی مس شامل کربنات، سیلیس، هماتیت و کلریت هستند. در برخی از این تیپ کانسارها آلکالی فلدسپار نیز به‌صورت گانگ و در همراهی با رخداد کانه‌زایی دیده می‌شود. در منطقه معدنی گل‌چشمه کانی‌های گانگ همراه با کانه‌زایی شامل کربنات، سیلیس آمورف و هماتیت هستند که در این بین کربنات بیش‌ترین فراوانی را دارا می‌باشد که از این نظر نیز این کانسار مشابه با کانسارهای موجود در شیلی است.

ساخت و بافت ماده معدنی: از مهم‌ترین ساخت و بافت‌های موجود در کانسارهای تیپ مانتو می‌توان به پرکننده فضاهای خالی و حفرات، رگه‌رگچه‌ای، دانه پراکنده و جانشینی اشاره کرد که در تمامی این مجموعه کانسارها قابل مشاهده است (Cisternas، 2006؛ Rieger 2008؛ Hermosilla and et al.،). در منطقه گل‌چشمه تمامی این بافت و ساخت‌ها در واحدهای سنگی قابل مشاهده و بررسی می‌باشد و کانه‌زایی به‌طور عمده در رگه - رگچه‌ها، فضاهای خالی و حفرات و شکستگی‌ها و زون‌های گسله رخ داده است، هرچند که در بسیاری نقاط نیز رخداد کانه‌زایی را به‌صورت تراوشی و آغشتگی در سنگ میزبان می‌توان مشاهده کرد.

تفاوت‌های این کانسار با تیپ مانتو: بر اساس بررسی‌های صورت گرفته کانسار مس گل‌چشمه از نظر ویژگی‌های مربوط به محیط ژئوتکتونیکی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، نوع سنگ میزبان، کانه‌ها، عناصر همراه و دگرسانی، شباهت زیادی با کانسارهای تیپ مانتو در شیلی نشان می‌دهند. اما علیرغم این شباهت‌ها، این کانسار تفاوت‌هایی با این ذخایر نیز نشان می‌دهد. کانسارهای تیپ مانتو در شیلی در بازه سنی ژوراسیک فوقانی - کرتاسه تحتانی تشکیل شده‌اند، حال آنکه در منطقه گل‌چشمه سن واحدهای سنگی مربوط به دوره زمانی ائوسن و یا جوان‌تر می‌باشد هرچند که این تفاوت سنی چندان حائز اهمیت نیست. علاوه بر این در پهنه سنندج - سیرجان در کانسار کشت مهکی شمال‌غرب صفاشهر این تیپ کانه‌زایی به سن کرتاسه تحتانی و در زیر پهنه دهج - ساردوئیه کانسار مس کشکوئیه در رفسنجان به سن ائوسن معرفی شده است (ابولی پور و همکاران، ۱۳۹۰؛ بویری کناری و همکاران، ۱۳۹۳؛). در این کانسارها حفرات علاوه بر کانی‌هایی مانند کلیست، کوارتز، کلریت، کلسدونی و کانه‌هایی مانند مالاکیت و کریزوکلا توسط زئولیت نیز پر شده است اما در منطقه گل‌چشمه آثاری از حضور زئولیت مشاهده نگردید، هرچند که در بعضی از مجموعه کانسارهای شیلی نیز زئولیت وجود ندارد. کانسارهای مس تیپ مانتو با ذخیره نزدیک به ۴۰۰ میلیون تن ذخایری با تناژ بالا هستند (Maksaev and Zentilli، 2002)، درحالی‌که ذخیره معدنی مس گل‌چشمه نزدیک به سه میلیون تن مس می‌باشد. البته باید در نظر داشت که ذخیره مجموع کل چندین کانسار در شیلی این مقدار برآورد شده است و احتمالاً تناژ هر ذخیره کانسار کمتر از این مقدار است. این در حالی است که منطقه گل‌چشمه فقط یک کانسار مجزا است که این میزان ذخیره برای آن تخمین زده شده است. در ادامه نیز منطقه معدنی گل‌چشمه با انواع مشابه کانسارها شامل عباس آباد سبزوار، بوئنااسپرانزا شیلی و میشیگان آمریکا مقایسه شده است می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱. مقایسه کانسار مس گل‌چشمه با انواع مشابه در ایران، شیلی و آمریکا

نام کانسار / ویژگی‌ها	نوع مانتو	نوع مانتو	نوع مانتو	نوع میشیگان
موقعیت	ایران (گل‌چشمه نیشابور)	ایران (عباس‌آباد سبزوار)	شیلی (کانسار بوئنااسپرانزا)	شبه‌جزیره کویناوی، ایالات‌متحده (کانسار میشیگان)
سنگ میزبان	آندزیت، آندزیت بازالت، بازالت با بافت پورفیری	آندزیت و بازالت پورفیری	بازالت ـ آندزیت	بازالت ـ آندزیت با میان لایه‌های گنگلومرا و برش
شکل واحدها	چینه‌کران	چینه‌کران	چینه‌کران	چینه‌کران
بافت ماده معدنی	رگه ـ رگچه‌ای، پرکننده حفرات و فضای خالی و جانشینی	پرکنده حفرات ـ رگه‌ای	رگه ـ رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی	رگه ـ رگچه‌ای، پرکننده حفرات
کانی‌های گانگ	کربنات، کلریت، اپیدوت و سیلیس	زئولیت، کلسیت و کلریت	کلریت،آلبیت، کوارتز، اپیدوت و زئولیت	زئولیت،کلسیت،آلبیت،اپیدوت و کلریت
دگرسانی	دگرسانی عمده کربناتی و اندکی پروپلیتیک و سیلیسی، سرسیتی	عمدتاً کربناتی، زئولیتی، کلریتی	عمدتاً کربناتی، جزئی سیلیسی پروپلیتیک، زئولیتی و سرسیتی - آلبیتی	عمدتاً کربناتی، جزئی پروپلیتیک، سیلیسی، زئولیتی و سرسیتی
پاراژنز کانه شناختی	کالکوسیت، کوولیت،آزوریت دیژنیت،کریزوکلا، مس طبیعی کالکوپیریت، بورنیت، مالاکیت	کالکوسیت، کوولیت، کالکوپیریت، پیریت، گالن، مس طبیعی	مس طبیعی، کالکوسیت، کوولیت، دیژنیت، بورنیت	مس طبیعی،مالاکیت، آزوریت،کالکوسیت کریزوکولا،پیریت، کالکوپیریت،دیژنیت
ژنز و تیپ	عناصر مشتق شده از سنگ میزبان توسط منبع ماگمایی (توده در عمق)؟	-	عناصر مشتق شده از سنگ میزبان طی دیاژنز	فعالیت‌های دگرگونی

پترولوژی و ژئوشیمی عناصرکمیاب و نادر خاکی

از مجموع نمونه‌های برداشت شده از لایه‌های ولکانیکی، پس از بررسی مقاطع نازک و انجام مطالعات پتروگرافی با توجه به شواهد و روابط صحرایی تعداد ۱۲ نمونه معرف، که کمترین میزان آلتراسیون را متحمل شده بودند، انتخاب و به‌منظور آنالیز اکسیدهای اصلی و عناصر جزئی توسط دستگاه XRF تحت آنالیز قرار گرفتند. همچنین پس از بررسی نتایج آنالیز عناصر اصلی، تمامی این نمونه‌ها به‌منظور آنالیز عناصر کمیاب و نادر خاکی (REE) به روش ICP-MS، ۵۸ عنصری در آزمایشگاه SGS کشور صربستان مورد تجزیه قرار گرفتند (جدول۲). براساس نمودار تغییرات SiO_2 در برابر K_2O، سنگ‌های آتشفشانی منطقه گل‌چشمه در قلمرو سری ماگماهای شوشونیتی قرار می‌گیرند (شکل ۹- a) (Peccerillo and Taylor، 1976). جهت تفکیک سنگ‌های آذرین منطقه از لحاظ سری‌های ماگمایی از نمودار، AFM، ($F=FeO_t$، $M= MgO$، $A=K_2O + Na_2O$) استفاده گردید و مشخص شد که تمامی نمونه‌ها در امتداد روند کالک آلکالن قرار می‌گیرند (شکل ۹- b) (Irvine and Bargar، 1971). در نمودار سه‌تایی (Al_2O_3 ، MgO، FeO_t) نیز سنگ‌های آتشفشانی منطقه، جزء سری‌های آندزیتی کوهزایی (اوروژنی) قرار می‌گیرند. یکی از نمونه‌ها به علت دگرسانی شدید جابه‌جایی نشان می‌دهد (شکل ۹- c). طبقه‌بندی سنگ‌های منطقه براساس شاخص آلومینیوم نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌ها در محدوده متاآلومینوس قرار می‌گیرند و فقط یکی از نمونه‌ها در محدوده پرآلومینوس واقع می‌گردد (شکل ۹- d) (Shand، 1943). براساس نمودار مقدار اکسید سیلیسیم به نسبت زیرکن به اکسید تیتانیم از مجموع نمونه‌های موجود ۱۰ نمونه در قلمرو آندزیت‌ها و یک نمونه در قلمرو آندزیت بازالت‌ها قرار می‌گیرد و همچنین یکی از نمونه‌ها به دلیل دگرسانی جابه‌جایی نشان می‌دهد که با مشاهدات اولیه و صحرایی کاملاً مطابقت دارد (شکل ۹- e) (Winchester and Floyd، 1977).

جدول ۲. نتایج آنالیز عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی سنگ‌های ولکانیکی محدوده مورد مطالعه

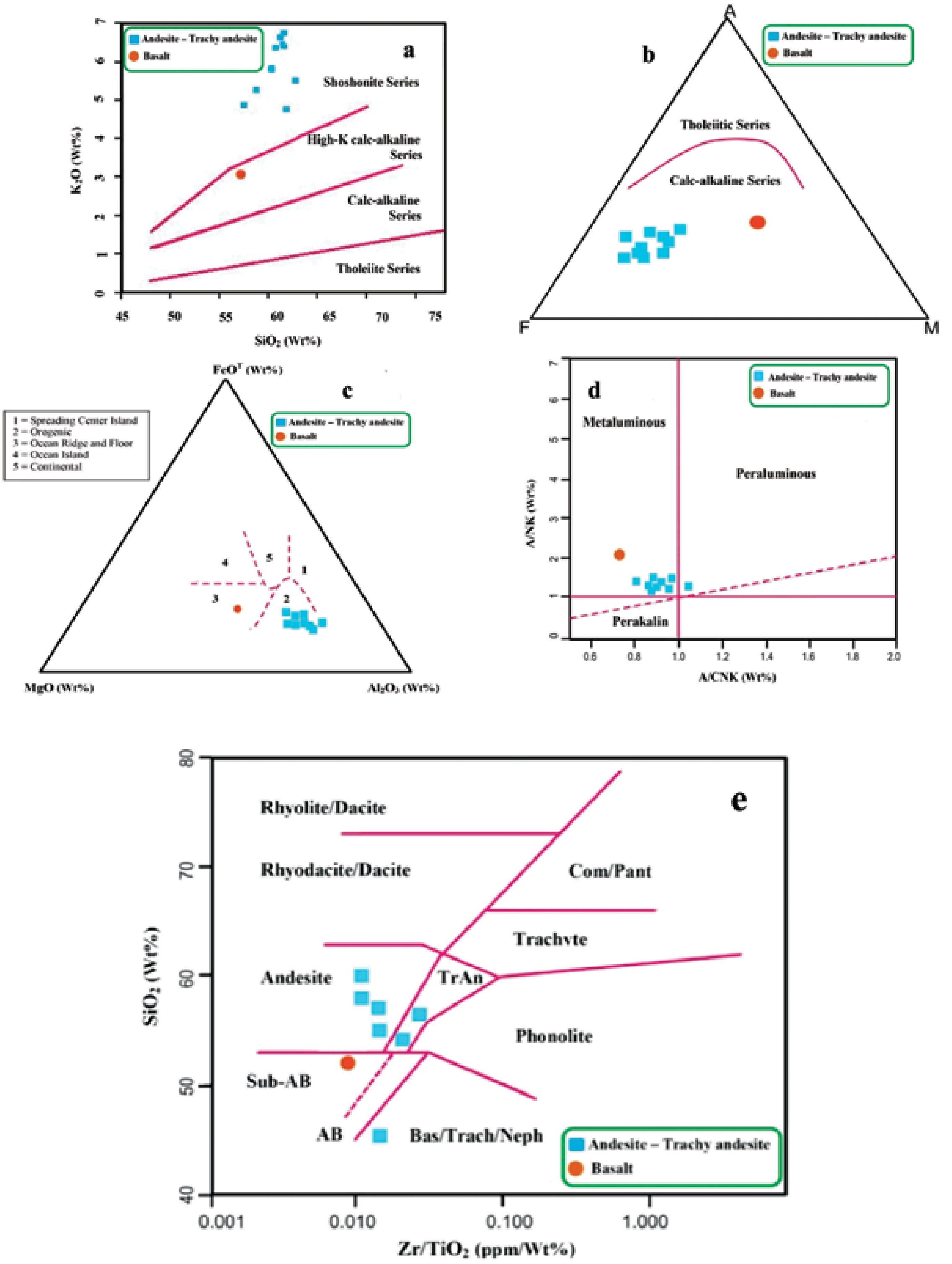
Sample	XRF2	XRF4	XRF14	XRF15	XRF17	XRF29	XRF30	XRF49	XRF3	XRF7	XRF23	XRF34
Wt%												
SiO_2	۵۳/۶۲	۵۶/۸۸	۵۸/۸۷	۵۷/۶۸	۵۲/۴۶	۵۸/۰۱	۵۶/۰۶	۴۴/۳۲	۵۷/۵۴	۵۷/۴۲	۵۷/۷۴	۵۴/۹۶
TiO_2	۰/۸۲	۰/۹۸	۱/۱۲	۰/۸	۰/۹۳	۰/۷۷	۰/۸۲	۰/۹۲	۰/۷۴	۱/۱۱	۱/۰۳	۰/۹۳
Al_2O_3	۱۸/۶۸	۱۸/۴۵	۱۸/۴۵	۱۸/۳۱	۱۵/۵۷	۱۷/۲۵	۱۷/۴۴	۱۳/۶۸	۱۸/۱	۱۸/۵۵	۱۸/۰۸	۱۸/۳۷
FeOt	۴/۷۴	۳/۹۲	۳/۷۵	۳/۶۸	۶/۶۸	۳/۷۴	۴/۰۵	۴/۱۲	۳۲/۳	۳/۳۷	۳/۳۱	۴/۷۲
SrO	۰/۰۸	<۰/۰۵	<۰/۰۵	<۰/۰۵	۰/۰۶	<۰/۰۵	۰/۰۶	<۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۷
MgO	۳/۶۸	۲/۹۷	۱/۵۵	۲/۷۱	۸/۵۵	۳/۷۲	۴/۳۷	<۰/۰۵	۲/۹۶	۲/۶	۲/۷۳	۲/۸۲
CaO	۵/۲۸	۲/۷	۳/۶۳	۳/۵۹	۷/۴۹	۳/۹۶	۳/۰۵	۱۵/۰۲	۳/۷۴	۲/۲۵	۳/۵۱	۵/۲۶
Na_2O	۵/۲۵	۴/۶۸	۴/۰۲	۴/۰۵	۳/۰۸	۴/۳۲	۵	۴/۷۵	۴/۳۲	۴/۱۵	۴/۰۶	۴/۵۷
K_2O	۴/۵۲	۶/۱۴	۵/۲۴	۶/۱۶	۲/۳۱	۴/۵	۵/۵۶	۵/۸۵	۶/۲۳	۶/۳۸	۶/۴۸	۵/۰۱
P_2O_5	۰/۸۸	۰/۹۸	۰/۸۷	۱/۰۴	۰/۷۳	۰/۸۹	۰/۷۹	۰/۵۳	۱/۵۴	۰/۹۵	۱/۰۹	۱/۴۹
LOI	۲/۴۴	۲/۰۱	۲/۰۵	۲/۰۱	۲/۱۶	۲/۵۴	۲/۳۵	۹/۵۴	۱/۵	۱/۴۹	۱/۸۹	۱/۷۹
ppm												
Ba	۴۶۴	۳۳۶	۳۱۶	۸۷۶	۴۷۴	۴۵۶	۴۵۴	۵۲۰	–	–	–	–
Rb	۹۹/۵	۷۰/۶	۹۴/۹	۹۹/۸	۹۶/۸	۱۱۷	۱۰۹	۱۳۱	–	–	–	–
Sr	۶۰۰	۲۳۳	۱۳۶	۳۰۰	۶۹۱	۳۴۶	۴۲۴	۳۲۵	–	–	–	–
Zr	۱۳۸	۱۲۵	۱۳۶	۱۶۶	۱۱۱	۱۵۹	۱۳۲	۱۳۱	–	–	–	–
Nb	۱۶/۹	۱۸/۹	۱۹/۸	۲۱/۲	۱۴/۵	۲۰/۹	۱۷/۳	۲۰/۲	–	–	–	–
Zn	۵۴/۶	۵۸/۵	۷۱/۲	۹۷/۱	۹۳/۳	۶۹/۹	۱۰۸	۴۴/۲	–	–	–	–
Cs	۰/۹۸	۳/۳۴	۳/۹۶	۳/۶۵	۲/۵۵	۳/۶۳	۱/۱۵	۲/۹۱	–	–	–	–
Ta	۱/۲۷	۱/۲۲	۱/۱۵	۱/۳۱	۱/۴۵	۱/۳۴	۱/۱۸	۱/۴۹	–	–	–	–
Hf	۳/۲۷	۲/۹۲	۳/۳۳	۳/۸۶	۳/۱۳	۳/۷۵	۳/۱۴	۳/۳۱	–	–	–	–
Ga	۱۶/۱	۱۶/۳	۱۵/۵	۱۷/۶	۱۸/۳	۱۸/۰	۱۵/۲	۱۳/۶	–	–	–	–
Th	۴/۵	۰/۹	۱/۴	۲/۴	۴/۹	۲/۴	۳/۴	۵/۵	–	–	–	–
U	۱/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۴	۱/۵	۰/۵	۱/۲	۲/۱	–	–	–	–
V	۲۶۴	۳۸۲	۳۷۷	۴۶۰	۲۸۸	۴۴۱	۳۵۸	۳۹۷	–	–	–	–
W	۲/۴	۲/۶	۱/۷	۱/۴	۱/۴	۲/۹	۱/۶	۲/۲	–	–	–	–
La	۱۸/۱	۳/۰	۳/۴	۱/۶	۱/۲۱	۸/۳	۱۴/۹	۱۹/۵	–	–	–	–
Ce	۳۵/۵	۵/۹۹	۷/۰۱	۱۲/۰	۴۴/۵	۱۶/۶	۲۸/۴	۳۷/۲	–	–	–	–
Pr	۴/۳۳	۰/۷۷	۰/۸۶	۱/۵۹	۵/۳۹	۲/۰	۳/۳۸	۴/۱۴	–	–	–	–
Nd	۱۶/۹	۳/۰۳	۳/۳۶	۶/۵۸	۲۲/۰	۸/۲۱	۱۳/۳	۱۴/۷	–	–	–	–
Sm	۳/۷۳	۰/۹۱	۰/۹۵	۱/۷۹	۵/۱۹	۲/۰۱	۲/۷۶	۲/۸۴	–	–	–	–
Eu	۱/۲۶	۰/۳۸	۰/۳۲	۰/۸۷	۱/۷۳	۰/۷۱	۱/۰۰	۰/۹۶	–	–	–	–
Gd	۳/۴۵	۰/۸۲	۰/۸۵	۱/۴۵	۵/۰۸	۱/۸۴	۲/۵۸	۲/۵۹	–	–	–	–
Tb	۰/۴۸	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۲۶	۰/۸۱	۰/۳۰	۰/۴۱	۰/۳۸	–	–	–	–
Dy	۲/۹۶	۰/۸۹	۱/۰۵	۱/۶۵	۴/۵۹	۱/۹۴	۲/۳۶	۲/۳۶	–	–	–	–
Ho	۰/۵۷	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۳۳	۰/۸۷	۰/۳۷	۰/۵۰	۰/۴۵	–	–	–	–
Er	۱/۸۰	۰/۶۲	۰/۷۱	۱/۲۰	۲/۵۹	۱/۴۳	۱/۵۳	۱/۴۹	–	–	–	–
Yb	۱/۶	۰/۷	۰/۸	۱/۳	۲/۲	۱/۴	۱/۳	۱/۵	–	–	–	–
Lu	۰/۲۵	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۲۱	۰/۳۴	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۴	–	–	–	–
Y	۱۶/۱	۴/۸	۶/۲	۹/۶	۲۴/۷	۱۱/۰	۱۳/۳	۱۲/۶	–	–	–	–
Eu/Eu^*	۱/۰۵	۱/۳۲	۱/۰۷	۱/۶	۱/۰۱	۱/۱۱	۱/۱۳	۱/۰۶	–	–	–	–
(La/Yb)N	۷/۶۳	۲/۸۹	۲/۸۶	۳/۱۶	۶/۴۷	۴	۷/۷۳	۸/۷۶	–	–	–	–
(Zr/Nb)N	۰/۵۷	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۴۵	–	–	–	–

عناصر کمیاب و نادر خاکی الگوی مهمی جهت بررسی فرآیندها و تحولات ماگمایی ارائه می‌نمایند. این عناصر در تعیین میزان غنی‌شدگی و تهی‌شدگی سنگ‌ها، نسبت به یک استاندارد اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به نوع سنگ‌های منطقه گل‌چشمه در بررسی عناصر نادر خاکی این محدوده، از نمودارهای عنکبوتی نرمالیزشده برحسب متوسط بازالت‌های پوسته اقیانوسی (MORB) و کندریت استفاده شد.

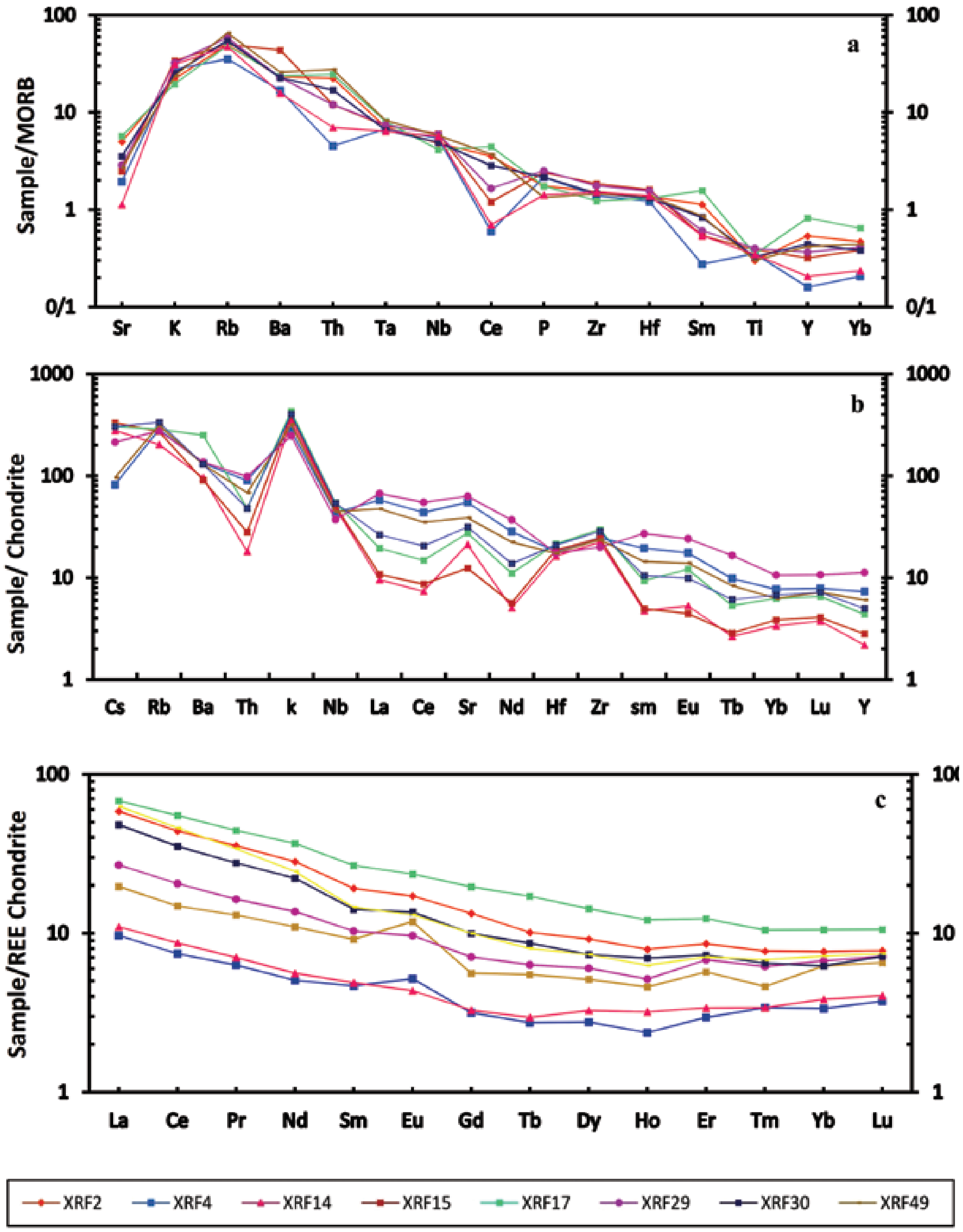
در نمودار نرمالیزشده نمونه‌های سنگی منطقه مورد مطالعه نسبت به استاندارد MORB، از مقادیر استاندارد ارائه شده توسط (Pearce، 1983) استفاده شد (شکل ۱۰-a). بر این اساس مشخص شد که سنگ‌های موجود در منطقه گل‌چشمه از نظر عناصر سبک غنی‌شدگی بیشتری نسبت به عناصر سنگین نشان می‌دهند. در این نمودار مشاهده شود که بیشترین غنی‌شدگی عناصر مربوط به عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LFS) مانند Rb، K و Ba می‌باشد. علاوه بر این، تهی‌شدگی در عناصر با شدت میدان بالا (HFS) مانند Ti ، Ce و Y دیده می‌شود. تهی‌شدگی در عناصر HFS مانند Ce، Y و Ti می‌تواند یکی از ویژگی‌های ماگماهای مرتبط با زون فرورانش به شمار رود (Pearce et al.، 1984). شایان ذکر است برخی از این مطالب در مورد تمامی نمونه‌ها صادق نیست. نمونه‌های XRF2، XRF17 و XRF30 بر اساس نتایج جدول ۱، تهی‌شدگی در Ce و Y نشان نمی‌دهند و متقابلاً تا حدودی Nb تهی‌شدگی نشان می‌دهد.

جهت مقایسه شیمی سنگ با ترکیب کندریتی و رفتار عناصر فرعی ماگما از نمودار عنکبوتی نرمالیزه شده نسبت به کندریت استفاده شده است. در نمودار نرمالیزه شده از مقادیر استاندارد (Gerlach et al.، 1988) استفاده شد (شکل ۱۰-b). بر اساس اطلاعات حاصل از این نمودار مشخص شد که عناصر کم‌تحرک (HFS) که شامل عناصر نادر خاکی هم می‌شوند از قبیل Y، Nd و Th به‌نوعی تهی‌شدگی نشان می‌دهند. بالا بودن غلظت عناصر متحرک (LIL) مانند K، Rb و Ba تابعی از رفتار سیال است که می‌تواند نشانگر حضور و تجمع این عناصر در مراحل انتهایی تبلور ماگما باشد. علاوه بر این، مقدار بالای Nb (بیش از ۱۶ گرم در تن) و غنی‌شدگی Rb و نسبت $(Zr/Nb)_N$ (کمتر از ۲ و بین ۰/۷ تا ۰/۴۶) می‌تواند نشان‌دهنده‌ی آغشتگی ماگما با پوسته قاره‌ای باشد (Rollinson، 1993).

نمونه‌های سنگی موجود در منطقه گل‌چشمه نیز نسبت به نمودار عناصر نادر خاکی کندریت با مقادیر استاندارد (Boynton، 1984) نرمالایز شده‌اند (شکل ۱۰-c). بر اساس نتایج حاصل از نمودار مشخص شد که سنگ‌های آتشفشانی این منطقه، غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سبک (LREE) مانند La، Ce و Sm نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) مانند Ho، Tb و Lu نشان می‌دهند. الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی در تمامی نمونه‌های منطقه گل‌چشمه یک الگوی پراکنده با شیب ملایم می‌باشد. به‌جز در دو نمونه که نوعی آنومالی مثبت در عنصر Eu مشاهده می‌شود، آنومالی مشخصی از این عنصر در نمونه‌های موجود مشاهده نمی‌شود. هرگاه نسبت Eu/Eu^* بیش از یک باشد ناهنجاری مثبت و هرگاه کمتر از یک باشد ناهنجاری منفی است. این نسبت در نمونه‌های منطقه گل‌چشمه بین ۱/۰۱ تا ۱/۶ در تغییر است (جدول ۲)، که بیانگر حضور مقدار کمتر و یا نبود پلاژیوکلاز در منشا ماگما و شرایط اکسیدان‌تر محلول است (Taylor and McLennan، 1985). به‌طورکلی ناهنجاری مثبت نسبت Eu/Eu^* در نمونه‌های منطقه گل‌چشمه می‌تواند نشان از این داشته باشد که کانی پلاژیوکلاز در سنگ منشا به‌عنوان کانی باقیمانده حضور کمرنگی داشته و یا اصلا حضور نداشته است و شرایط ذوب ماگما در حالت اکسیدان بوده است (Wilson، 1989). همچنین از نسبت $(La/Yb)_N$ می‌توان نسبت حضور گارنت و در نتیجه عمق ذوب ماگما را برآورد نمود. این نسبت در منطقه مورد مطالعه بین ۲/۸۵ تا ۸/۷۶ در تغییر است که نشان‌دهنده‌ی تشکیل ماگما در عمق کمتری از پایداری گارنت و درجه ذوب بخشی کم می‌باشد.



شکل ۹. a) نمودار تعیین شاخص پتاسیم (Peccerillo and Taylor، 1976)؛ b) نمودار تعین شاخص آلومینیوم (Shand، 1943)؛ c) نمودار AFM جهت تفکیک سـنگ‌های آذرین کالک آلکالن از تولئیتی؛ d) نمودار جداکننده محیط‌های تکتونیکی سـنگ‌های آتشفشانی؛ e) نمودار مقدار اکسید سیلیسیم به نسبت زیرکن به اکسید تیتانیم (Winchester and Floyd، 1977)



شکل۱۰. a) نمودار عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی نرمالایزه شده نسبت به MORB در منطقه گل‌چشمه، بر اساس مقادیر استاندارد (Pearce، 1983)؛ b) نمودار عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی نرمالیزه شده نسبت به کندریت در منطقه گل‌چشمه، بر اساس مقادیر استاندارد (Gerlach، 1988)؛ c) نمودار عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی نرمالیزه شده نسبت به کندریت در منطقه گل‌چشمه، بر اساس مقادیر استاندارد (Boynton، 1984)

نتیجه‌گیری

براســاس نتایج به دست آمده از مشــاهدات صحرایی، بررسی‌های آزمایشگاهی و آنالیزهای ژئوشیمیایی، در منطقه معدنی گل‌چشمه، کانه‌زایی شباهت‌هایی با کانسارهای تیپ مانتو نشــان می‌دهد. رخداد کانه‌زایی در یک افق چینه‌ای خاص رخ داده است و به‌طور گسترده در ارتباط با واحدهای آندزیتی موجود بوده اســت. کانه‌نگاری به‌طور عمده شامل کالکوســیت، بورنیت، کالکوپیریت و مقادیر جزئی کوولیت، دیژنیت، تترائدریت و مس خالص می‌باشد که به‌صورت رگه - رگچــه‌ای، پرکننده حفرات و فضاهای خالی، دانه پراکنده و جانشــینی رخ داده است. اما در این تیپ کانسارها ویژگی قابــل ملاحظــه‌ای وجــود دارد که کمتر به آن توجه شــده است، بایستی در این کانســارها محلول‌های حاوی مس را از نقطه نظر شــیمی محلول مورد بررسی قرار داد. مبنی بر اینکه که محلول‌های مــس عمدتاً فقیر از آهن بوده‌اند و به همین دلیل منجر به تشکیل کالکوسیت به‌جای کالکوپیریت شــده‌اند، به این دلیل که اگر محلول حاوی مس، سرشــار آهن بود می‌بایســت کالکوپیریت تشــکیل شــود حال آنکه در این سیســتم‌ها غالباً کالکوسیت به‌صورت اولیه تشکیل شــده است. لازم به ذکر اســت که در مورد شرایط تشکیل این کانســارها دو نظریه مهم وجــود دارد. عده‌ای معتقدند کــه این تیپ ذخایر در ارتبــاط با فرآیندهای دگرگونی ایجاد شــده‌اند که واحدهای ســنگی در حد رخســاره پرهنیت - پومپلهایت دگرگون شــده‌اند، در واقع این نظریه بیشــتر در مورد کانسارهای میشیگان ارائه شده است، که منشا مس را فرآیندهای دگرگونی در نظر می‌گیرند (Richards، 1989). اما طرفداران نظریه دیگر، معتقدند که این کانســارها تحت تاثیر فرآیندهای آتشفشــانی همراه با دیاژنز ایجاد شــده‌اند. بر اســاس این نظریــه فرآیندهای دیاژنزی موجب تشــکیل پیریت و احیایی شــدن محیط می‌شوند. سپس محلول‌های ماگمایی که از عمــق آمده‌اند در این واحدها حرکت کرده و در شــرایط احیایی مس موجود در سنگ میزبان را شسته و حمل کرده و در مکان مناسـب ته‌نشین کرده‌اند (Kojima et al.، 2009). در مورد شــرایط تشکیل منطقه گل‌چشمه پذیرش نظریه دگرگونی با توجه به اینکه هیچ‌گونه شواهدی از دگرگونی و حتی دیاژنز وجود ندارد این نظریه قابل پذیرش نیســت. اما در مورد نظریه دوم بر اساس شواهد موجود به نظر می‌رسد که دیاژنز هم در این منطقه رخ نداده است، اما احتمالا این منطقه در ارتباط با فرآیندهای آتشفشانی مرتبط با ائوســن رخ داده اســت. در منطقه گل‌چشمه با توجه به اینکــه در نزدیکی این محدوده دایک‌های دیابازی و دیوریتی وجود دارد، می‌توان چنین بیان کرد که این توده‌های نفوذی در عمق به‌عنوان منبع حرارتی مناسب عمل کرده است و در نتیجه حرارت لازم برای محلول‌هایی که از ســطح (آب‌های جوی و دریایی) و آب‌هایــی که از عمق می‌آمده‌اند را تامین کرده است. این محلول‌ها نیز بر روی سنگ میزبان آندزیتی اثر گذاشــته، در این زمان پیریت نیز به‌عنوان اولین سولفید حضور داشته است و شرایط محیط را احیایی‌تر کرده است. سپس محلول‌های موجود در ســنگ میزبان آندزیتی که از مس نیز غنی بوده است درون این واحدها به چرخش درآمده و در نتیجه مس آنها را شســته و در شــرایط احیایی محیط در مکان‌های مناسب مانند حفرات و رگه ـ رگچه‌ها بر جای گذاشته اســت. به‌طور خلاصه به نظر می‌رسد محتمل‌ترین نظریه برای نحوه تشکیل منطقه گل‌چشمه شسته شدن مس موجود در نتیجه فرآیندهای ماگمایی از سنگ میزبان غنی از مس باشد که در این زمان یک توده آذرین (دایک‌های گابرویی و دیوریتــی) موجود در عمق منبــع تامین کننده‌ی حرارت مورد نیاز بوده اســت. البته معرفی معدن مس گل‌چشــمه به‌عنوان یک کانسار تیپ مانتو به شواهد و اطلاعات بیشتری از قبیل مطالعات ســیالات درگیر برای تعیین دما و شوری محلول کانه‌دار، ایزوتوپ‌های پایدار S - O - H برای تعیین منشــا محلول کانه‌دار و ایزوتوپ‌های ناپایــدار Sm - Nd و Rb - Sr به جهت تعین منشــا و سن سنگ‌های آتشفشانی ضروری به نظر می‌رسد. اما بررسی رخداد کانه‌زایی در منطقه گل‌چشــمه از این جهت حائز اهمیت اســت که با توجه به موقعیــت این مکان در زیرپهنه ســبزوار و وجود اندیس‌های معدنی متعدد مس در این زیرپهنه و حتی نزدیک به محدوده مورد مطالعه (بزق، استایش)، این الگو می‌تواند به‌عنوان یک الگوی اکتشــافی جدید در این مناطق معرفی و به اکتشاف کانســارهای مشــابه در این زیرپهنه منجر شود، چرا که این

تیپ کانسارها بعد از ذخایر پورفیری به‌عنوان دومین منابع اقتصادی مس در دنیا معرفی شده‌اند.

منابع

- ابولی پور، م.، راستاد، ا. و رشید نژاد عمران، ن.، ۱۳۹۴. کانه‌زایی مس چینه‌کران نوع مانتو در آندزیت پورفیر پیروبیتومن‌دار کشکوئیه رفسنجان، زیرپهنه دهج-ساردوئیه. سی و چهارمین گردهمایی علوم زمین.
- ابولی پور، م.، راستاد، ا. و رشید نژاد عمران، ن.، ۱۳۹۰. کانه‌زایی مس لایه کران نوع مانتو (Manto-type) در زون دهج-ساردوئیه در منطقه کشکوئیه رفسنجان، دومین همایش ملی انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.
- اشرف‌پور، ا.، ۱۳۸۶. ویژگی‌های ژئوشیمیایی، کانی‌شناسی و دگرسانی محدوده طلای ارغش، جنوب‌غرب نیشابور. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۷.
- بویری کناری، م.، راستاد، ا. و رشیدنژاد عمران، ن.، ۱۳۹۳. کانه‌زایی مس-نقره Volcanic Red Bed در کانسار کشت مهکی، شمال باختر صفاشهر، پهنه سنندج - سیرجان جنوبی. سی و سومین گردهمایی علوم‌زمین.
- سامانی، ب.، ۱۳۸۱. متالوژنی کانسارهای مس نوع مانتو در ایران. ششمین همایش زمین‌شناسی ایران.
- سعادت، س.، ۱۳۹۱. گزارش نهایی عملیات اکتشاف مرحله دوم منطقه گل‌چشمه کدکن (مس). سازمان صنعت، معدن و تجارت استان خراسان رضوی.
- کیوانفر، م. و عسگری، ع.، ۱۳۷۸. طرح اکتشاف طلا، گزارش نقشه‌های زمین‌شناسی - معدنی ۱:۵۰۰۰ ناحیه ارغش - چشمه زرد، جنوب نیشابور. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نادری میقان، ن. و ترشیزیان، ح.، ۱۳۷۷. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کدکن. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- واعظی پور، م. ج. و علوی تهرانی ن.، ۱۳۷۰. نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تربت حیدریه. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- Berberian, F. and Berberian, M., 1981. Tectono-Plutonic Episodes in Iran, Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution. American Geophysical Union and Geological Society of America, Washington, 5-32.
- Boynton W. V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite studies. In: Henderson P. (ed.), Rare Earth Elements Geochemistry. Elsevier, 63-114.
- Cisternas, M.G. and Hermosilla, J., 2006. The role of bitumen in strata-bound copper deposit formation in the Copiapó area, Northern Chile. Mineralium Deposita, 41, 339 - 355.
- Irvine T. N. and Baragar W.R.A., 1971. A guide tothe chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, 8, 523-548.
- Kojima, S., Trista, D., Guilera, A. and Ken-ichiro ayashi, H., 2009. Genetic aspects of the Manto-type Copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits. Resource Geology, 59, (1), 87-98.
- Maksaev, V. and Zentilli, M., 2002. Chilean Strata-bound Cu-(Ag) Deposits: an Overview. In: Porter, T.M. (Ed.), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective, 2. PGC Publishing, Adelaide, 163-184.
- Morata, D. and Aguirre, L., 2003. Extensional lower Cretaceous volcanism in the coastal range (29°20 - -30°S), Chile: Geochemistry and petrogenesis. J. South Am. Earth Science., 16, 459 - 476.
- Pearce J. A., Harris N. B. W. and Tindle A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25, 956-983.
- Pecerillo A. and Taylor S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58, 63-81.
- Richards, J. P., Boyce, A. J. and Pringle, M. S., 2001. Geologic Evolution of the Escondida Area, Northern Chile, A Model for Spatial

and Temporal Localization of Porphyry Cu Mineralization. Economic Geology, 96, 271 - 305.

- Richards, J. P. and Spoonell, E.T.C., 1989. Evidence of or Cu-(Ag) Mineralization by Magmatic - Meteoric Fluid Mixing in Keweenawan Fissure Veins, Mamainse Point,Ontario. Economic Geology, 84(2), 360- 385.

- Rieger, A., Schwark, L., Cisternas, M. E. and Miller, H., 2008. Genesis and evolution of bitumen in Lower Cretaceous Lavas and Implications for strata-bound Copper deposits, North Chile. Economic Geology, 103, 387-404.

- Rollinson H., 1993. Using Geochemical Data, Evaluation, Presentation, Interpretation. Addison-Wesley /Longman, Harlow. England. 352p.

- Rollinson H., 1983. The geochemistry of mafic and ultramafic rocks from the Archaean greenstone belts of Sierra Leone. Mineral Magazine, 47, 267-280.

- Shand S. J., 1943. Eruptive Rocks; their Genesis, Composition, Classification and their Relation to Ore-deposits". Hafner Publishing Company, New York, 488.

- Stocklin J. and Nabavi M., 1972. Tectonic Map of Iran, Geological Survey of Iran.

- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution, Blackwell Scientific Publication, 312 p.

- Tristá-Aguilera, D., Barra, F., Ruiz, J., Morata, D., Talavera-Mendoza, O., Kojima, S. and Ferraris, F., 2006. Re-Os isotope systematics for theLince-Estefanía deposit: constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordilleraof Northern Chile. Miner Deposita, 41, 99-105.

- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20, 325-343.