

# زمین‌شناسی، دگرسانی، کانه‌زایی و مطالعات ژئوشیمیایی

## در معدن مس، منطقه گل‌چشمه، جنوب نیشابور

فاطمه نجمی<sup>۱\*</sup>، سید احمد مظاهری<sup>۲</sup>، سعید سعادت<sup>۳</sup> و اعظم انتظاری هرسینی<sup>۴</sup>

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

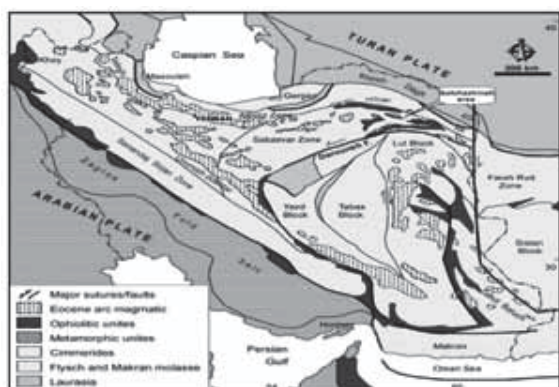
معدن مس گل‌چشمه در شمال شرق ایران (جنوب شهر نیشابور) در حاشیه زون ساختاری سبزوار واقع گردیده است. براساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، رخنمون‌های سنگی این منطقه شامل سنگ‌های آتشفشانی منسوب به ائوسن و یا جوان‌تر با ترکیب آندزیت تا بازالت به همراه واحدهای رسوبی، سنگ‌آهک و میان‌لایه‌هایی از توف و برش می‌باشد. زون‌های دگرسانی مرتبط با لایه‌های آندزیتی - بازالتی شامل کربناتی شدن، پروپلیتیک، 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، تتراهدريت 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 کالک‌آلکان با گرایش شوشونیتی را داشته و از نظر جایگاه زمین‌ساختی احتمالاً شاخص ماگماتیسیم 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 نشان‌دهنده 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، پارائز 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

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. به‌طور کلی 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.



شکل ۱. نقشه ساختاری ایران. موقعیت محدوده مورد مطالعه در حاشیه زون سبزواری 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 در مقیاس ۱:۵۰۰۰ تهیه شد. آنالیز عناصر اصلی توسط دستگاه XRF در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران بر روی دوازده نمونه 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 + اسید نیتریک + تیزاب سلطانی) برای آنالیز

منطقه گل‌چشمه در ۲۲۰ کیلومتری جنوب‌غرب مشهد و ۴۰ کیلومتری جنوب شهرستان نیشابور در حفاصل  $35^{\circ} 36' 50''$  شرقی و  $58^{\circ} 44' 48''$  -  $58^{\circ} 42' 09''$  -  $35^{\circ} 48' 59''$  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 کیمیرین 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 سندج - 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 سبزواری 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 و کالک 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 نظر گرفته 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

ارتباطی به لحاظ کانه‌زایی ندارند (شکل ۳).

### پتروگرافی

به منظور تفکیک بیشتر و دقیق‌تر واحدهای سنگی منطقه، نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۵۰۰۰ از محدوده مطالعاتی تهیه شد (شکل ۲). در مجموع واحدهای سنگی منطقه به انواع زیر تفکیک شدند:

سنگ آهک: این واحد در شمال شرق منطقه به رنگ سفید تا نخودی رنگ گسترش یافته است. دارای مرز مشترک با واحد آندزیتی بوده (شکل ۳-ا) و در مقیاس میکروسکوپی دارای فسیل نومولیت هستند (شکل ۴-ا).

آگلومرا - توف آندزیتی: این واحد نیز گسترش چندانی در منطقه به جز 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 (شکل ۳-ب). آندزیت: این واحد بیشترین گسترش را در محدوده مورد بررسی دارا می‌باشد. بافت این واحد سنگی عمدتاً پورفیری و به‌طور فرعی شامل فلتی تا گلوپورفیری 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 (شکل ۴-ب). 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 ۱۰ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۴-ج).

تراکی آندزیت: این واحد گسترش کمی در محدوده مورد بررسی دارد و عمدتاً در بخش مرکزی تا جنوب شرقی دیده می‌شود. بافت این واحد سنگی عمدتاً پورفیری و گاهی جریان‌ی می‌باشد. میزان فنوکریست‌های آن بین ۵ تا ۱۲

عناصر کمیاب و نادر خاکی به آزمایشگاه SGS کشور صربستان ارسال شد. مطالعات ژئوشیمیایی سطحی بر روی 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 شمال غرب ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ کدکن و در حاشیه زون ساختاری سبزووار واقع شده است (نادری و ترشیزیان، ۱۳۷۷). منطقه مورد مطالعه بخشی از ارتفاعات شمال غرب کدکن می‌باشد که روندی شمال غرب - جنوب شرق 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، تراکی آندزیت، ریوداسیت، آگلومرا و برش می‌باشد.
۲. واحد آذرآواری - آتشفشانی ائوسن بالایی.
۳. توده‌های گرانیتوئیدی شامل گابرو دیوریت، دیوریت، گرانودیوریت و گرانیت به سن اواخر ائوسن تا الیگوسن. واحدهای آذرین این ناحیه به سمت شمال غرب (محدوده معدنی طلا- آنتیموان ارغش)، در امتداد نوار ماگماتیسیم پس از کرتاسه هستند که داخل و اطراف زون افیولیتی سبزووار و در امتداد شمال غرب - جنوب شرق 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 شمال غرب - جنوب شرق 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

در این واحد اندازه فنوکریست‌های پلاژیوکلاز بین یک تا پنج میلی‌متر و هورنبلند بین ۵/۰ تا دو میلی‌متر متغیر است. پلاژیوکلازها به همراه هورنبلند در حال تبدیل به کربنات، اپیدوت و کلریت هستند (شکل ۴-۴).

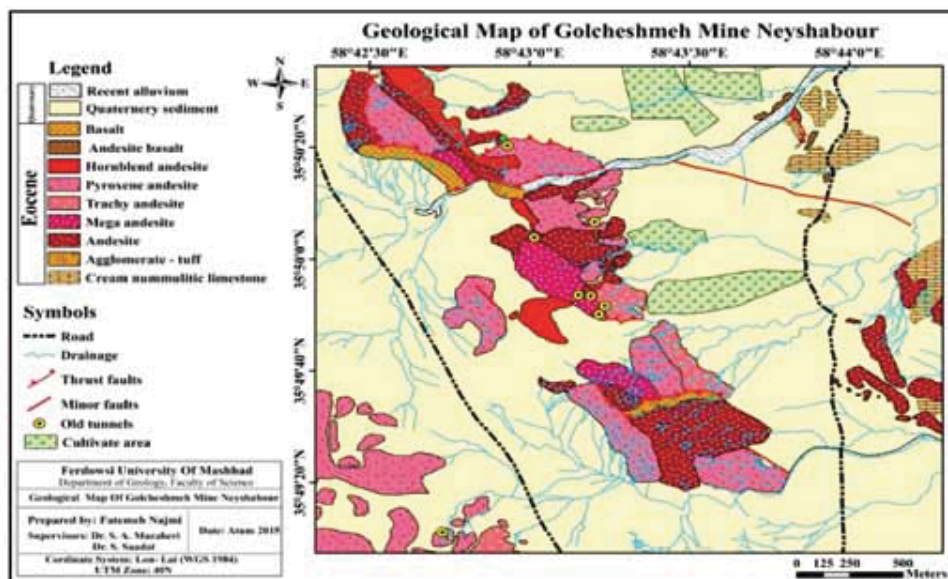
آندزیت‌بازالت: این واحد رخنمون کوچکی در بخش شرقی منطقه در مجاورت واحدهای آهکی دارد. بافت این واحد سنگی، پورفیری، آمیگدالوئید تا گلوپوروفیری با زمینه دانه‌ریز می‌باشد. میزان فنوکریست‌های آن از پنج تا ۱۰ درصد متغیر است و شامل پلاژیوکلاز، الیوین ادینگزیتی و پیروکسن به صورت اومفاسیتی و دیوپسیدی می‌باشد. در این واحد اندازه فنوکریست‌های پلاژیوکلاز بین یک تا پنج میلی‌متر متغیر است و به همراه پیروکسن‌ها در حال تبدیل به کربنات و مقدار جزئی کلریت هستند. این واحد دارای حفراتی است که با کربنات پر شده است (شکل ۴-۴).

بازالت: بافت این واحد سنگی پورفیری است که رخنمون کوچکی در بخش شمال غرب 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 ۲/۰ تا ۱۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد (شکل ۴-۴).

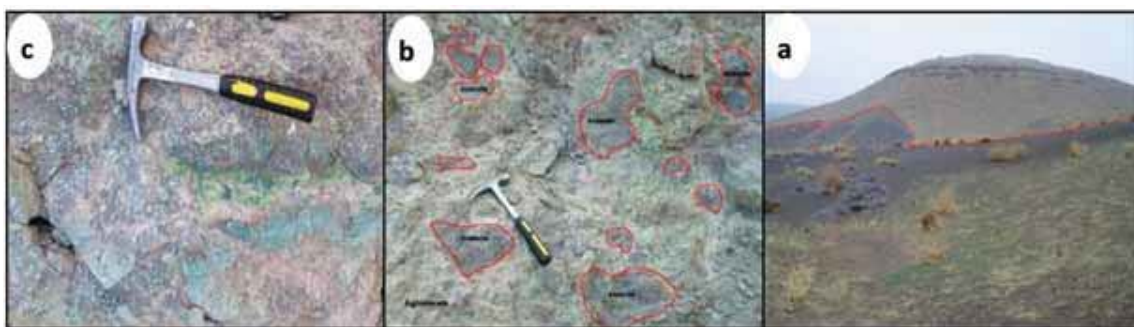
درصد متغیر بوده و شامل پلاژیوکلاز و آلکالی فلدسپات است که اندازه دانه‌های پلاژیوکلاز بین یک تا هفت میلی‌متر و آلکالی فلدسپات‌ها بین یک تا سه میلی‌متر متغیر می‌باشد، همچنین کمتر از دو درصد هورنبلند اوپاسیتی و پیروکسن اومفاسیتی شده نیز در این واحد قابل مشاهده می‌باشد که در بعضی نقاط پلاژیوکلازها در حال تبدیل به کربنات و کانی‌های رسی می‌باشند (شکل ۴-۴).

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

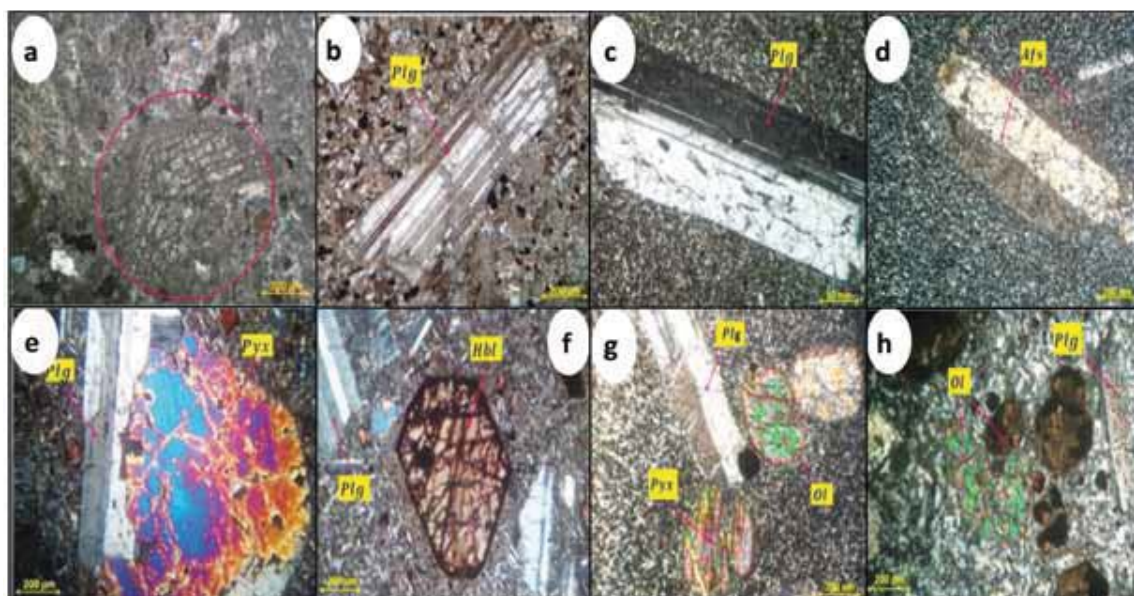
هورنبلند آندزیت: این واحد سنگی کمترین رخنمون را در محدوده مورد بررسی دارا می‌باشد و عمدتاً در بخش مرکزی و شمال غرب دیده می‌شود. بافت این واحد سنگی عمدتاً پورفیری و به طور فرعی آمیگدالوئید تا گلوپوروفیری با زمینه دانه‌ریز می‌باشد. میزان فنوکریست‌های آن از ۱۰ تا ۱۲ درصد متغیر است و شامل پنج تا ۱۰ درصد پلاژیوکلاز و چهار تا شش درصد هورنبلند به صورت اوپاسیتی می‌باشد.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در مقیاس ۱:۵۰۰۰



شکل ۳. تصاویر صحرایی (a) واحد سنگ آهک دارای مرز مشترک با آندزیت؛ (b) آگلومرا - توف آندزیتی دارای قطعات آندزیت؛ (c) واحد آندزیت



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از واحدهای ولکانیکی منطقه (تمامی تصاویر در نور xpl می‌باشند): (a) واحد آندزیت دارای فنوکریست پلاژیوکلاز در زمینه میکروولیتی؛ (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

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 تبدیل شدگی به کربنات نشان می‌دهند.

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

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 شمال غرب، واحدهای آندزیت و پیروکسن آندزیت را تحت تاثیر قرار داده است. به‌طور عمده بیش از ۵۰ درصد پلاژیوکلازها و پیروکسن‌ها به کربنات تبدیل شده‌اند.

۱۸ مقطع نازک صیقلی و بلوک صیقلی، کانه سولفیدی اصلی مس در این منطقه کالکوسیت می‌باشد که به صورت رگچه‌های کم ضخامت (کمتر از یک سانتی‌متر) در بخش مرکزی و جنوب‌غربی منطقه و به‌طور عمده در واحدهای مگان‌اندزیت، اندزیت و پیروکسن‌اندزیت قابل بررسی و مشاهده می‌باشد. علاوه بر آن در این مقاطع آثاری از حضور دیگر سولفیدها مانند پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، کولیت و به مقدار جزئی 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 کولیت می‌باشد و نسل دوم کالکوسیت که احتمالاً از تبدیل بورنیت و کالکوپیریت 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 عمدتاً از تجزیه هورنبلندهای موجود در منطقه به وجود آمده‌اند (شکل‌های ۷-۷a تا ۷-۷i). 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 اندزیتی این منطقه معدنی قابل مقایسه با کانسارهای تیپ ماننو و کویناوی (میشیگان) می‌باشد.

دگرسانی کربناته متوسط-آرژلیک ضعیف: این دگرسانی در بخش جنوب‌شرقی، منطقه واحدهای اندزیت، تراکی‌اندزیت و پیروکسن‌اندزیت 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.

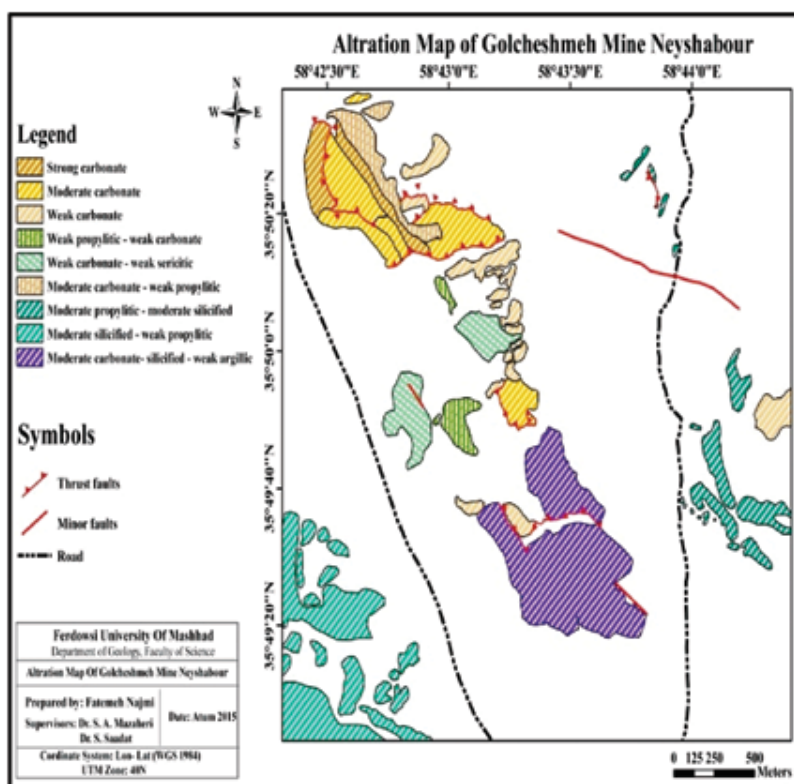
دگرسانی کربناته متوسط-پروپلتیک ضعیف: این دگرسانی در بخش شمال‌غرب واحد هورنبلند‌اندزیت را در بر گرفته است که پلاژیوکلاز و هورنبلند در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد به کربنات و پنج تا ۱۰ درصد به اپیدوت-کلریت تبدیل شده‌اند.

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

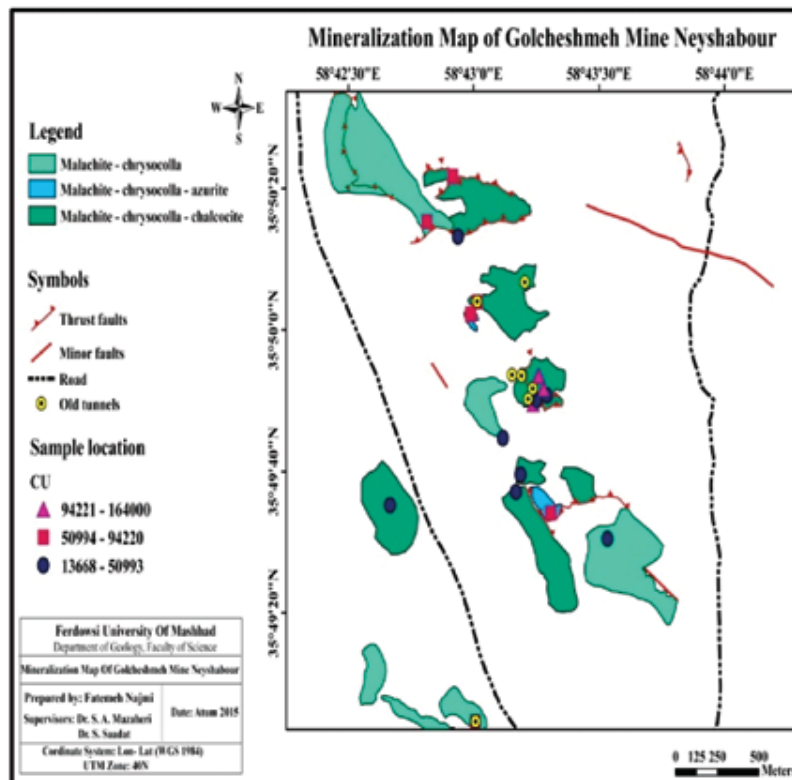
دگرسانی پروپلتیک ضعیف: این دگرسانی واحد پیروکسن‌اندزیت و هورنبلند‌اندزیت را در مرکز و جنوب‌غرب منطقه در بر گرفته است. در حدود پنج تا ۱۰ درصد پلاژیوکلازها، پیروکسن‌ها و هورنبلندها به اپیدوت-کلریت تجزیه شده‌اند.

## کانه‌زایی

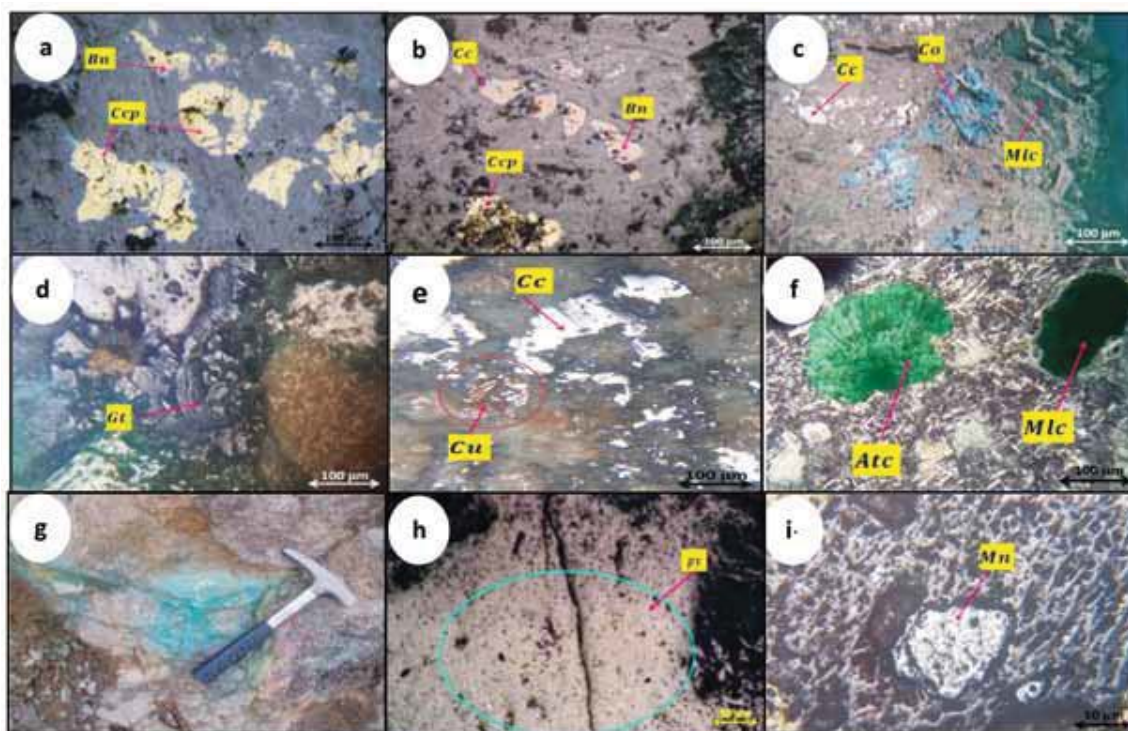
شواهد کانه‌زایی در منطقه گل‌چشمه بسیار گسترده می‌باشد و به‌طور کلی کانه‌زایی به اشکال سولفیدی و اکسیدی مس قابل مشاهده است (شکل ۶). کانه‌زایی مس عمدتاً شامل فاز اکسیدی است که به‌طور ثانویه کانه‌های کربناتی مس شامل مالاکیت، آزوریت، کانی سیلیکاته مس کریزوکلا و احتمالاً کانی هیدروکلر مس آتاکامیت را شامل 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 اندزیت‌ها و پیروکسن‌اندزیت‌ها را تحت تاثیر خود قرار داده‌اند. برپایه مطالعه بیش از



شکل ۵. نقشه آلتراسیون محدوده مورد مطالعه



شکل ۶. نقشه کانه‌زایی محدوده مورد مطالعه



شکل ۷. (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 پر شده 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 به صورت زیر به دست آمده است:

کانه‌زایی به‌طور عمده در واحدهای آندزیتی رخ داده است. ترکیب کانی‌شناسی ماده معدنی شامل کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، کوولیت، دیژنیت، تتراندريت، مس طبیعی، پیریت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا و آتاکامیت می‌باشد که به صورت 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، تراکی آندزیتی و بازالتی موجود در حدود ۲۰۸ تا ۳۸۳۸ گرم در تن اندازه‌گیری شده است (جدول ۲) 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 میزان 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 (هیپوزن): در این مرحله سیال‌های

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

کانه‌زایی به‌طور عمده در واحدهای آندزیتی رخ داده است. ترکیب کانی‌شناسی ماده معدنی شامل کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، کوولیت، دیژنیت، تتراندريت، مس طبیعی، پیریت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا و آتاکامیت می‌باشد که به صورت 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



فاطمه نجمی و همکاران

ماگمایی - گرمایی 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 به جای 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، به صورت کمپلکس کلریدی حمل شده و پس از واکنش با پیریت، به صورت 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 بالآمدگی 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، تتراندريت و مس طبیعی و همچنین کانه‌های کربناتی و سیلیکاتی مس مانند مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا و آتاکامیت و کانه‌های اکسیدی و هیدروکسیدی مانند همتایت، مگنتیت و گوتیت در شرایط کاملاً اکسیدان شده‌اند.

همانگونه که بیان شد معدن مس گل‌چشمه در جنوب نیشابور دارای شباهت‌هایی با کانسارهای مس تپ‌مانتو 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 تپ کانه‌زایی، ویژگی‌های بحرانی و اساسی کانسار مس گل‌چشمه با ویژگی‌های کانسارهای مس تپ‌مانتو 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 پشت‌کمانی و تحت تاثیر نیروهای کششی رخ داده است (Richards et al., 2003; Morata and Aguirre, 2001). در منطقه معدنی گل‌چشمه نیشابور سنگ‌های میزبان کانه‌زایی، گدازه‌های آندزیتی، آندزیتی-بازالتی و بازالت‌های کالک‌آلکانل با گرایش شوشونیتی هستند (شکل ۸-ا). در حالی که سنگ‌های میزبان و همراه کانه‌زایی مس در کانسارهای شیلی شامل لایه‌های آندزیت و بازالت‌های کالک‌آلکانل تا تولییتی 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 زمینه‌های دانه‌ریز و آمیگدالوئیدال می‌باشد که به صورت 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 تقریباً یکسان و مشابه می‌باشد.

ژئومتری و شکل ماده معدنی: به‌طور کلی کانسارهای تپ‌مانتو 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 تپ کانسارها دو یا سه واحد سنگی متفاوت به‌عنوان میزبان کانه‌زایی معرفی شده‌اند (Kojima et al., 2009). به‌طور کلی در این تپ 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 تپ‌مانتو شباهت دارد. به دلیل اینکه در این تپ کانسارها نیز ماده معدنی در داخل رگه - رگچه‌ها و به‌صورت پرکننده حفرات تشکیل شده است.

## بحث

معمولاً اکسیدان شده‌اند.

همانگونه که بیان شد معدن مس گل‌چشمه در جنوب نیشابور دارای شباهت‌هایی با کانسارهای مس تپ‌مانتو 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 تپ کانه‌زایی، ویژگی‌های بحرانی و اساسی کانسار مس گل‌چشمه با ویژگی‌های کانسارهای مس تپ‌مانتو 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 پشت‌کمانی و تحت تاثیر نیروهای کششی رخ داده است (Richards et al., 2003; Morata and Aguirre, 2001). در منطقه معدنی گل‌چشمه نیشابور سنگ‌های میزبان کانه‌زایی، گدازه‌های آندزیتی، آندزیتی-بازالتی و بازالت‌های کالک‌آلکانل با گرایش شوشونیتی هستند (شکل ۸-ا). در حالی که سنگ‌های میزبان و همراه کانه‌زایی مس در کانسارهای شیلی شامل لایه‌های آندزیت و بازالت‌های کالک‌آلکانل تا تولییتی 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 زمینه‌های دانه‌ریز و آمیگدالوئیدال می‌باشد که به صورت 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 تقریباً یکسان و مشابه می‌باشد.

Processes Minerals	Pre- Mineralization	Mineralization		
		Hypogene Stage	Supergene Stage	Oxidation Stage
Pyrite	██████████			
Chalcopyrite		██████████		
Bornite		██████████		
Chalcocite		██████████	██████████	
Covelite			██████████	
Digenite			██████████	
Tetraedrite			██████████	
NativeCopper			██████████	
Malachite				██████████
Azurite				██████████
Chrysocolla				██████████
Atacamite				██████████
Hematite				██████████
Magnetite				██████████
Ghoetite				██████████
Gangue	██████████	██████████	██████████	

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

حضور بیتومن نیز به‌عنوان یک کانه اصلی که عمدتاً جانشین پیریت می‌شود اشاره شده است (ابولی پور و همکاران، ۱۳۹۴). در کانسار مس گل چشمه 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 زون بندی در این تیپ کانسارها وجود دارد که در منطقه گل چشمه شامل پیریت، کالوپیریت بورنیت، کالکوپیریت کالکوسیت، بورنیت کالکوسیت و کالکوسیت می‌باشد.

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

کانی‌شناسی و عناصر همراه: در کانسارهای تیپ مانته 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، به طوری که در بعضی نقاط مقدار کالکوسیت از بورنیت بیش‌تر است و بالعکس. علاوه بر کانه‌های فوق در این تیپ کانسارها، مقادیری کولیت، مس طبیعی، تتراندريت، 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

مشاهده کرد.

تفاوت‌های این کانسار با تیپ مانتو: بر اساس بررسی‌های صورت گرفته کانسار مس گل چشمه از نظر ویژگی‌های مربوط به محیط ژئوتکتونیک، 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 گل چشمه 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 شمال غرب 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؛ بوبری کناری و همکاران، ۱۳۹۳). در این کانسارها حفرات علاوه بر کانی‌هایی مانند کلیست، کوارتز، کلریت، کلسدونی و کانه‌هایی مانند مالاکیت و کریزوکلا توسط ژئولیت نیز پر شده است اما در منطقه گل چشمه آثاری از حضور ژئولیت مشاهده نگردید، هرچند که در بعضی از مجموعه کانسارهای شیلی نیز ژئولیت 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 گل چشمه 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 گل چشمه فقط یک کانسار مجزا است که این میزان ذخیره برای آن تخمین زده شده است. در ادامه نیز منطقه معدنی گل چشمه با انواع مشابه کانسارها شامل عباس آباد سبزواری، بوئناسپرانزا شیلی و میشیگان آمریکا مقایسه شده است می‌باشد (جدول ۱).

اپیدوتی (پروپیلیتیک)، سیلیسی و سرسیتی شدن است. هرچند که دگرسانی آلبیتی فقط در بعضی از کانسارهای تیپ مانتو گزارش شده است، اما پدیده هماتیتی شدن سنگ میزبان در این تیپ کانسارها از اهمیت زیادی برخوردار است، به طوری که مجموعه سنگ‌های دارای رخداد کانه‌زایی دارای میزان بالایی از هماتیت و هیدروکسیدهای آهن هستند (Kojima et al., 2009). در منطقه گل چشمه در مجموعه واحدهای آندزیتی میزبان کانه‌زایی، کربناتی شدن به طور چشمگیری رخ داده است و تمامی واحدها را با شدت کم تا زیاد در برگرفته است. اگرچه دگرسانی‌های هیدروکسیدی آهن (هماتیتی شدن)، سیلیسی، پروپیلیتیک و مقادیر بسیار جزئی سرسیتی و آرژیلیکی شدن در آنها دیده می‌شود اما در مقیاس کلی رخداد دگرسانی در منطقه گسترش و اهمیت چندان 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 به صورت گانگ و در همراهی با رخداد کانه‌زایی دیده می‌شود. در منطقه معدنی گل چشمه 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). در منطقه گل چشمه تمامی این بافت و ساخت‌ها در واحدهای سنگی قابل مشاهده و بررسی می‌باشد و کانه‌زایی به طور 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 به صورت تراوشی و آغشتگی در سنگ میزبان می‌توان

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

نام کانسار و ویژگی‌ها	نوع مانتو	نوع مانتو	نوع مانتو	نوع میشیگان
موقعیت	ایران (گل چشمه نیشابور)	ایران (عباس‌آباد سبزوار)	شیلی (کانسار بوئنا اسپرانزا)	شبه جزیره کوبیناوی، ایالات متحده (کانسار میشیگان)
سنگ میزبان	آندزیت، آندزیت بازالت، بازالت با بافت پورفیری	آندزیت و بازالت پورفیری	بازالت - آندزیت	بازالت - آندزیت با میان لایه‌های گنگلومرا و برش
شکل واحدها	چینه کران	چینه کران	چینه کران	چینه کران
بافت ماده معدنی	رگه - رگچه‌ای، پرکننده حفرات و فضای خالی و جانیشینی	پرکننده حفرات - رگه‌ای	رگه - رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی	رگه - رگچه‌ای، پرکننده حفرات
کانی‌های گانگ	کربنات، کلریت، اپیدوت و سیلیس	ژئولیت، کلسیت و کلریت	کلریت، آلبیت، کوارتز، اپیدوت و ژئولیت	ژئولیت، کلسیت، آلبیت، اپیدوت و کلریت
دگرسانی	دگرسانی عمده کربناتی و اندکی پروپلیتیک و سیلیسی، سرسیتی	عمدتاً کربناتی، ژئولیتی، کلریتی	سیلیسی پروپلیتیک، ژئولیتی و سرسیتی - آلبیتی	عمدتاً کربناتی، جزئی پروپلیتیک، سیلیسی، ژئولیتی 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 کریزوکلا، 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 عناصر کمیاب و نادر خاکی

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 ( $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $FeO$ ) 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 متآلومینوس قرار می‌گیرند و فقط یکی از نمونه‌ها در محدوده پراآلومینوس 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).

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 به منظور آنالیز اکسیدهای اصلی و عناصر جزئی توسط دستگاه XRF تحت آنالیز قرار گرفتند. همچنین پس از بررسی نتایج آنالیز عناصر اصلی، تمامی این نمونه‌ها به منظور آنالیز عناصر کمیاب و نادر خاکی (REE) به روش ICP-MS، ۵۸ عنصری در آزمایشگاه SGS کشور صربستان مورد تجزیه قرار گرفتند (جدول ۲). براساس نمودار تغییرات  $SiO_2$  در برابر  $K_2O$ ، سنگ‌های آتشفشانی منطقه گل چشمه 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،  $(F=FeO, M=MgO, A=K_2O + Na_2O)$ ، AFM،

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 <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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	۳/۳	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 <sub>2</sub> O	۵/۲۵	۴/۶۸	۴/۰۲	۴/۰۵	۳/۰۸	۴/۳۲	۵	۴/۷۵	۴/۳۲	۴/۱۵	۴/۰۶	۴/۵۷
K <sub>2</sub> O	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 <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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	-	-	-	-

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).

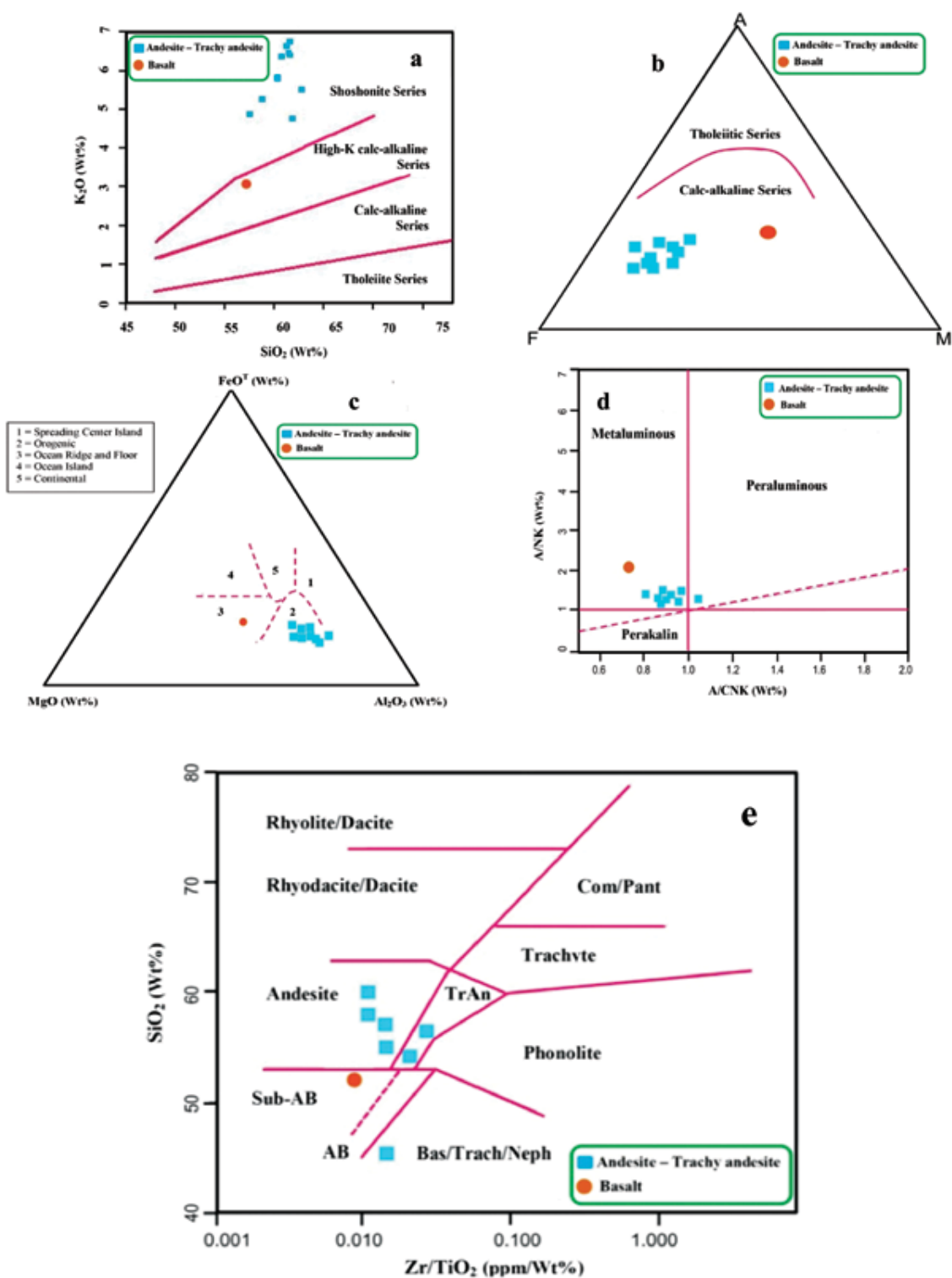
بر اساس نتایج حاصل از نمودار مشخص شد که سنگ‌های آتشفشانی این منطقه، غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سبک (LREE) مانند La، Ce و Sm نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) مانند Ho، Tb و Lu نشان می‌دهند. الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی در تمامی نمونه‌های منطقه گل‌چشمه یک الگوی پراکنده با شیب ملایم می‌باشد. به‌جز 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 ۱/۰۶ 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). به‌طور کلی 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 اصلاً 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.

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 نرمالیز شده برحسب متوسط بازالت‌های پوسته اقیانوسی (MORB) و کندریت استفاده شد.

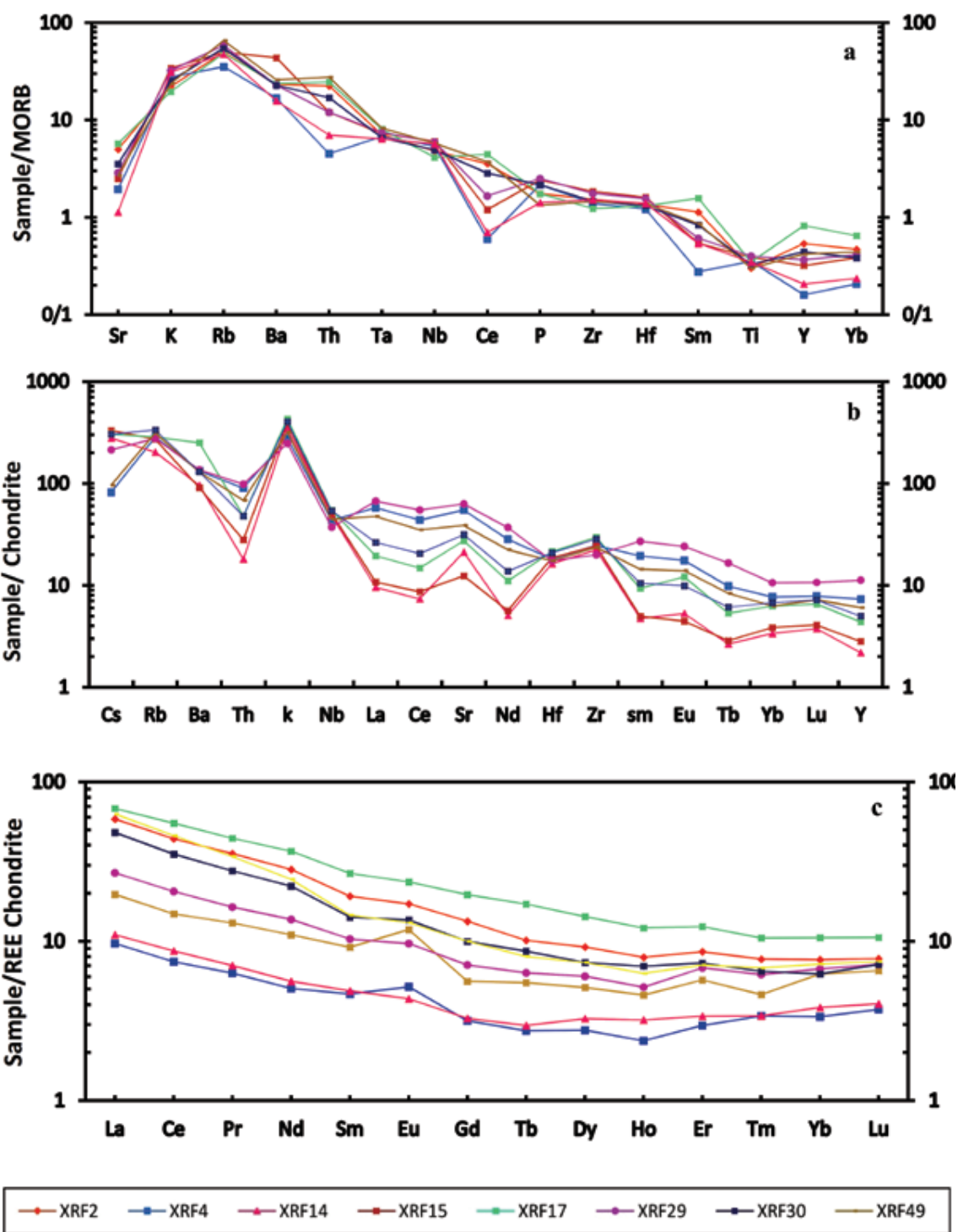
در نمودار نرمالیز شده نمونه‌های سنگی منطقه مورد مطالعه نسبت به استاندارد MORB، از مقادیر استاندارد ارائه شده توسط (Pearce, 1983) استفاده شد (شکل ۱۰-a). بر این اساس مشخص شد که سنگ‌های موجود در منطقه گل‌چشمه از نظر عناصر سبک غنی‌شدگی بیشتری نسبت به عناصر سنگین نشان می‌دهند. در این نمودار مشاهده شود که 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 Y، Ce 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 Nd، Y و Th به‌نوعی تهی‌شدگی نشان می‌دهند. بالا بودن غلظت عناصر متحرک (LIL) مانند Rb، K و Ba تابعی از رفتار سیال است که

فاطمه نجمی و همکاران



شکل ۹. (a) نمودار تعیین شاخص پتاسیم (Peccerillo and Taylor, 1976); (b) نمودار تعیین شاخص آلومینیوم (Shand, 1943); (c) نمودار جهت تفکیک سنگ‌های آذرین کالک آلکان از تولیتی؛ (d) نمودار جداکننده محیط‌های تکتونیکی سنگ‌های آتشفشانی؛ (e) نمودار مقدار اکسید سیلیسیم به نسبت زیرکن به اکسید تیتانیوم (Winchester and Floyd, 1977)



شکل ۱۰. (a) نمودار عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی نرمالایزه شده نسبت به MORB در منطقه گل چشمه، بر اساس مقادیر استاندارد (Pearce, 1983)؛ (b) نمودار عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی نرمالایزه شده نسبت به کندریت در منطقه گل چشمه، بر اساس مقادیر استاندارد (Gerlach, 1988)؛ (c) نمودار عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی نرمالایزه شده نسبت به کندریت در منطقه گل چشمه، بر اساس مقادیر استاندارد (Boynton, 1984)



## نتیجه‌گیری

از دگرگونی و حتی دیاژنز وجود ندارد این نظریه قابل پذیرش نیست. اما در مورد نظریه دوم بر اساس شواهد موجود به نظر می‌رسد که دیاژنز هم در این منطقه رخ نداده است، اما احتمالاً این منطقه در ارتباط با فرآیندهای آتشفشانی مرتبط با ائوسن رخ داده است. در منطقه گل‌چشمه با توجه به اینکه 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 سطح (آب‌های جوی و دریایی) و آب‌هایی که از عمق می‌آمده‌اند را تامین کرده است. این محلول‌ها نیز بر روی سنگ میزبان آندزیتی اثر گذاشته، در این زمان پیریت نیز به‌عنوان اولین سولفید حضور داشته است و شرایط محیط را احیایی‌تر کرده است. سپس محلول‌های موجود در سنگ میزبان آندزیتی که از مس نیز غنی بوده است درون این واحدها به چرخش درآمده و در نتیجه مس آنها را شسته و در شرایط احیایی محیط در مکان‌های مناسب مانند حفرات و رگه - رگچه‌ها بر جای گذاشته است. 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 گابروبی و دیوریتی) موجود در عمق منبع تامین‌کننده حرارت مورد نیاز بوده است. البته معرفی معدن مس گل‌چشمه به‌عنوان یک کانسار تیپ مانتو به شواهد و اطلاعات بیشتری از قبیل مطالعات سیالات درگیر برای تعیین دما و شوری محلول کانه‌دار، ایزوتوپ‌های پایدار  $S - O - H$  برای تعیین منشأ محلول کانه‌دار و ایزوتوپ‌های ناپایدار  $Sm - Nd$  و  $Rb - Sr$  به جهت تعیین منشأ و سن سنگ‌های آتشفشانی ضروری به نظر می‌رسد. اما بررسی رخداد کانه‌زایی در منطقه گل‌چشمه از این جهت حائز اهمیت است که با توجه به موقعیت این مکان در زیرپهنه سبزووار و وجود اندیس‌های معدنی متعدد مس در این زیرپهنه و حتی نزدیک به محدوده مورد مطالعه (بِزق، استایش)، این الگو می‌تواند به‌عنوان یک الگوی اکتشافی جدید در این مناطق معرفی و به اکتشاف کانسارهای مشابه در این زیرپهنه منجر شود، چرا که این

براساس نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی، بررسی‌های آزمایشگاهی و آنالیزهای ژئوشیمیایی، در منطقه معدنی گل‌چشمه، کانه‌زایی شباهت‌هایی با کانسارهای تیپ مانتو نشان می‌دهد. رخداد کانه‌زایی در یک افق چینه‌ای خاص رخ داده است و به‌طور گسترده در ارتباط با واحدهای آندزیتی موجود بوده است. کانه‌نگاری به‌طور عمده شامل کالکوسیت، بورنیت، کالکوپیریت و مقادیر جزئی کوولیت، دیژنیت، تتراندريت و مس خالص می‌باشد که به‌صورت رگه - رگچه‌ای، پرکننده حفرات و فضاهای خالی، دانه پراکنده و جانشینی رخ داده است. اما در این تیپ کانسارها ویژگی قابل ملاحظه‌ای وجود دارد که کمتر به آن توجه شده است، بایستی در این کانسارها محلول‌های حاوی مس را از نقطه نظر شیمی محلول مورد بررسی قرار داد. مبنی بر اینکه که محلول‌های مس عمدتاً فقیر از آهن بوده‌اند و به همین دلیل منجر به تشکیل کالکوسیت به‌جای کالکوپیریت شده‌اند، به این دلیل که اگر محلول حاوی مس، سرشار آهن بود می‌بایست کالکوپیریت تشکیل شود حال آنکه در این سیستم‌ها غالباً کالکوسیت به‌صورت اولیه تشکیل شده است. لازم به ذکر است که در مورد شرایط تشکیل این کانسارها دو نظریه مهم وجود دارد. عده‌ای معتقدند که این تیپ ذخایر در ارتباط با فرآیندهای دگرگونی ایجاد شده‌اند که واحدهای سنگی در حد رخساره پره‌نیت - پومپله‌ایت دگرگون شده‌اند، در واقع این نظریه بیشتر در مورد کانسارهای میشیگان ارائه شده است، که منشأ مس را فرآیندهای دگرگونی در نظر می‌گیرند (Richards, 1989). اما طرفداران نظریه دیگر، معتقدند که این کانسارها تحت تاثیر فرآیندهای آتشفشانی همراه با دیاژنز ایجاد شده‌اند. بر اساس این نظریه فرآیندهای دیاژنزی موجب تشکیل پیریت و احیایی شدن محیط می‌شوند. سپس محلول‌های ماگمایی که از عمق آمده‌اند در این واحدها حرکت کرده و در شرایط احیایی مس موجود در سنگ میزبان را شسته و حمل کرده و در مکان مناسب ته‌نشین کرده‌اند (Kojima et al., 2009). در مورد شرایط تشکیل منطقه گل‌چشمه پذیرش نظریه دگرگونی با توجه به اینکه هیچ‌گونه شواهدی

- 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 to the 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

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 پورفیری پیروبیومندار کاشکوئیه 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 کاشکوئیه رفسنجان، دومین همایش ملی انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.

- اشرف‌پور، ا.، ۱۳۸۶. ویژگی‌های ژئوشیمیایی، کانی‌شناسی و دگرسانی محدوده طلای ارغش، جنوب غرب نیشابور. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۷.

- بویری کناری، م.، راستاد، ا. و رشید نژاد عمران، ن.، ۱۳۹۳. کانه‌زایی مس-نقره Volcanic Red Bed در کانسار کشت مهکی، شمال باختر صفاشهر، پهنه سندج-سیرجان جنوبی. سی و سومین گردهمایی علوم زمین.

- سامانی، ب.، ۱۳۸۱. متالوژنی کانسارهای مس نوع مانتو در ایران. ششمین همایش زمین‌شناسی ایران.

- سعادت، س.، ۱۳۹۱. گزارش نهایی عملیات اکتشاف مرحله دوم منطقه گل چشمه 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 ۱:۱۰۰۰۰ کدکن. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- واعظی پور، م. ج. و علوی تهرانی، ن.، ۱۳۷۰. نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ 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.

- 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 Keweenaw 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.
  - Tristán-Aguilera, D., Barra, F., Ruiz, J., Morata, D., Talavera-Mendoza, O., Kojima, S. and Ferraris, F., 2006. Re-Os isotope systematics for the Lince-Estefanía deposit: constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of 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.