

کانی‌شناختی و ژئوشیمی کانسار مس خوت، غرب تفت، استان یزد

اعظم زاهدی و محمد بومری *

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

کانسار خوت در ۴۰ کیلومتری غرب تفت در استان یزد و در کمر بند ولکانوپلوتونیک ایران مرکزی واقع شده است. نفوذ زبانه‌هایی از توده گرانودیوریتی خوت به درون سنگ‌های کربناته سازند نایبند به تشکیل مرمر، اسکارن و کانه‌زایی مس منجر شده است. اسکارن خوت در مرمر تشکیل شده و از نوع کلسیک است که به دو زون گارنت اسکارن و گارنت-پیروکسن اسکارن تقسیم می‌شود. فرآیندهای اسکارن‌زایی به دو مرحله مجزای پیش‌رونده و پس‌رونده تقسیم می‌شود. مرحله پیش‌رونده توسط کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب نظیر گارنت و پیروکسن مشخص می‌شود. در مرحله پس‌رونده بخشی از مرمر و کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب توسط کانی‌های کالک‌سیلیکاته آبدار، سولفیدها، اکسیدها و کربنات‌ها جانشین شده است. مقایسه ترکیب شیمیایی گارنت با جایگاه ترکیبی گارنت در سایر اسکارن‌های کلسیک نشان داد که گستره ترکیبی گارنت‌های کانسار خوت، منطبق با گستره ترکیبی گارنت در اسکارن‌های مس، آهن و طلای جهانی است. همچنین کانی‌شناسی و ژئوشیمی گرانیتوئید خوت مشابه گرانیتوئیدهای همراه با کانسارهای اسکارن است.

واژه‌های کلیدی: کانسار، کانی‌شناختی، ژئوشیمی، خوت، یزد

مقدمه

کانسارهای یادشده است که در سنگ‌های کربناته تشکیل شده است. هرچند کانی‌شناسی و ژئوشیمی این نوع کانسارها در سایر نقاط جهان و ایران به صورت گسترده مطالعه شده است (Calagari, 2003; Forster *et al.*, 2004; Meinert *et al.*, 2005) ولی مطالعات انجام شده برای شناخت کانسار خوت کم است. بر اساس مطالعات یزدی (۱۳۷۰) کانسار خوت از نوع اسکارن مس پورفیری است و ژنز این کانسار توسط محسنی (۱۳۸۴) مطالعه شده است. در این نوشتار ضمن مطالعه

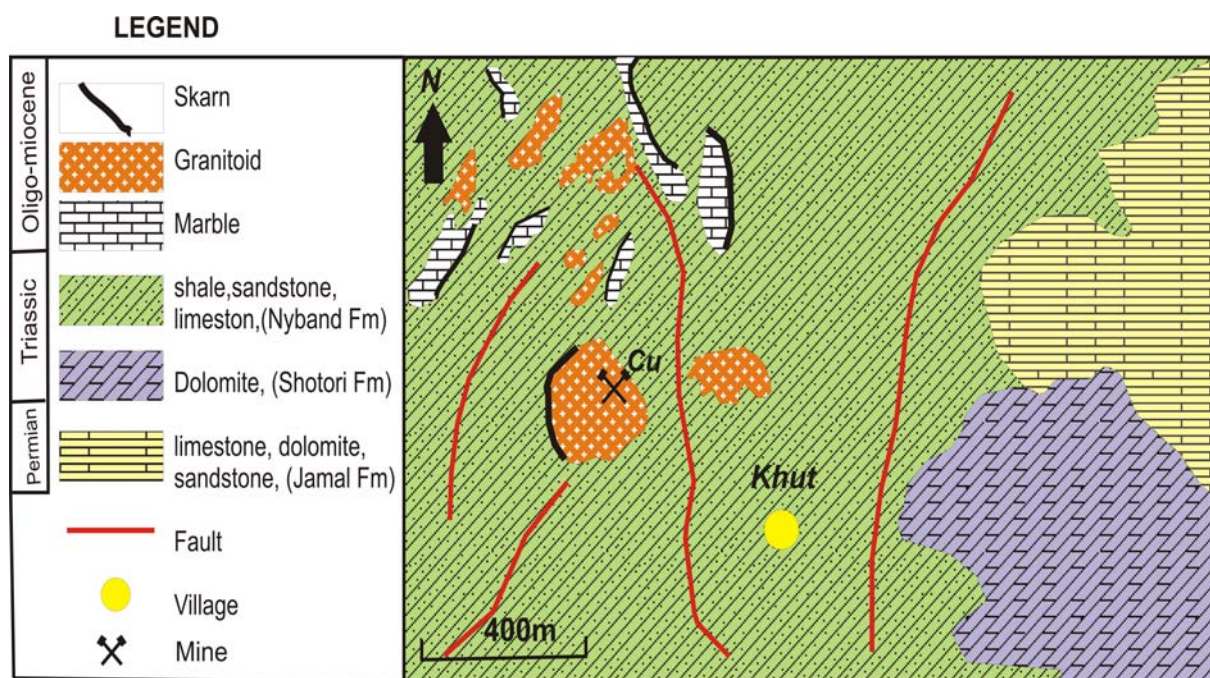
منطقه خوت در ۴۰ کیلومتری غرب تفت در استان یزد واقع شده است. این منطقه در طول و عرض‌های جغرافیایی ۳۱°۵۰' و ۵۳°۴۲' قرار دارد. در اطراف کانسار خوت در ناحیه تفت کانسارهای زیادی از جمله کانسارهای مس نصرآباد، چاه‌خطاب ندوشن، علی‌آباد و دره زرشک وجود دارند که همگی در امتداد گسل دهشیر-بافت و در راستای کانسار مس سرچشمه و میدوک قرار گرفته‌اند. کانسار خوت احتمالاً در ارتباط با

چینه‌نگاری ناحیه‌ای در منطقه خوت از قدیمی‌ترین تا جدیدترین، شامل سازند شتری (تریاس پایینی)، سازند ناینند (تریاس میانی)، سازند سنگستان (کرتاسه پایینی)، سازند تفت (کرتاسه میانی) و استوک گرانودیوریتی به سن الیگومیوسن است (شکل ۱). قدیمی‌ترین سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه شامل دولومیت‌های شتری است که در بخش غربی منطقه رخنمون دارد و گسترشی بیش از ۲۰۰ کیلومتر مربع دارد (شکل ۲- a). رسوبات شیلی، ماسه‌سنگی و آهکی سازند ناینند بیشترین گسترش را در منطقه دارند که توسط دایک‌ها و زبانه‌هایی با ترکیب گرانیتیویدی قطع شده‌اند (شکل ۲- b). سنگ‌های کربناته این سازند میزبان اصلی کانه‌زایی سولفیدی در منطقه خوت است. تکامل ستون چینه‌شناسی منطقه و مقطع عرضی آن به‌صورت شماتیک بر اساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است.

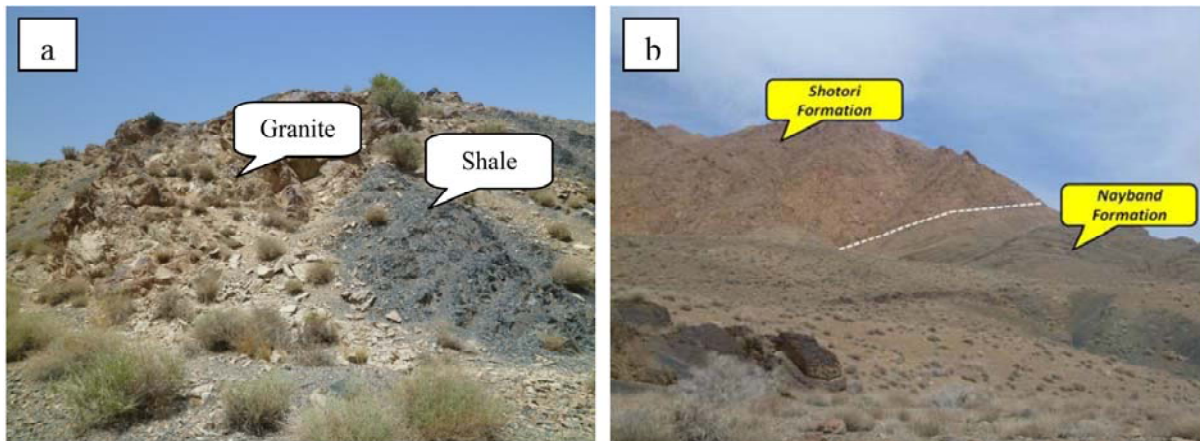
پتروگرافی دقیق سنگ‌های اسکارنی، سعی شد با استفاده از ترکیب دقیق کانی‌شناسی، شرایط فیزیکیوشیمیایی و دمای تشکیل اسکارن در منطقه خوت تعیین و بررسی شود.

زمین‌شناسی منطقه

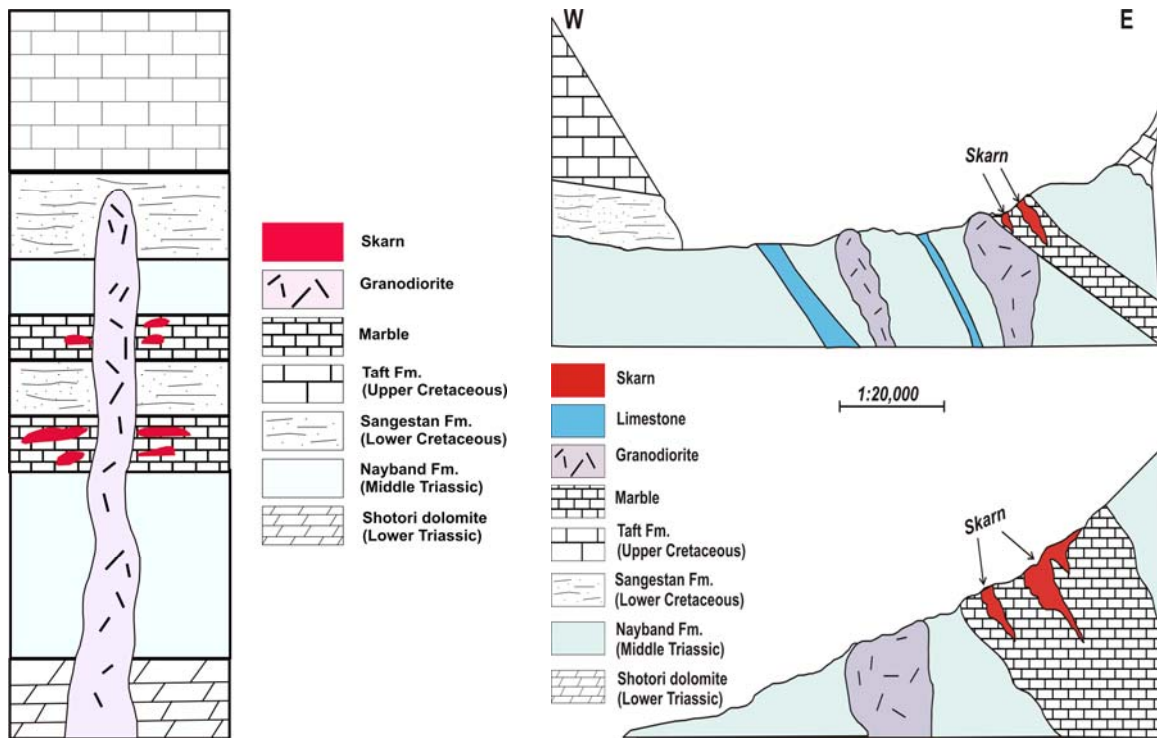
اسکارن خوت در قسمت مرکزی کمربند ولکانوپلوتونیک ایران مرکزی واقع شده است. کمربند ولکانوپلوتونیک ایران مرکزی مهم‌ترین جایگاه زمین‌شناسی کانسارهای مس پورفیری و همچنین بیشتر اسکارن‌ها و اسکارن-پورفیری‌های مس و کانسارهای اپی‌ترمال مرتبط با ماگماتیسم گرانیتیویدی سنوزوئیک در ایران است (Jankovic, 1984). منطقه خوت از نظر زمین‌ساختی تحت تأثیر گسل بزرگ دهشیر- بافت و شاخه‌های فرعی حاصل از آن واقع شده که از چند کیلومتری غرب معدن عبور می‌کند.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه خوت واقع در غرب استان یزد (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ خضرآباد با تغییرات (Hajmolla Ali, 1993)



شکل ۲- (a) نفوذ سنگ‌های گرانیتوئیدی به صورت آپوفیز در بین سازند نایبند (دید به سمت شمال غرب)، (b) رخنمون سازند شتری در مجاورت با سازند نایبند در بخش جنوب غربی منطقه خوت (دید به سمت شمال غرب)



شکل ۳- ستون چینه‌شناسی و مقطع عرضی شماتیک از منطقه خوت همراه با موقعیت اسکارن‌های تشکیل شده در مرمرها و جایگاه نفوذی گرانودیوریت

روش انجام پژوهش

کانی‌شناسی، تعداد ۵۰ نمونه از سنگ‌های آذرین، رسوبی، اسکارن و زون‌های کانه‌زایی شده توسط میکروسکوپ‌های پلاریزان عبوری و انعکاسی مطالعه شدند و بعضی از کانی‌های موجود در نمونه‌های اسکارنی با دستگاه آنالیز الکترون میکروپروب (EPMA) در بخش

بررسی‌های انجام شده بر روی اسکارن‌های منطقه خوت، شامل مطالعات صحرایی، آزمایشگاهی (میکروسکوپی، SEM و آنالیز نقطه‌ای) است. پس از بررسی‌های دقیق صحرایی به منظور مطالعات دقیق

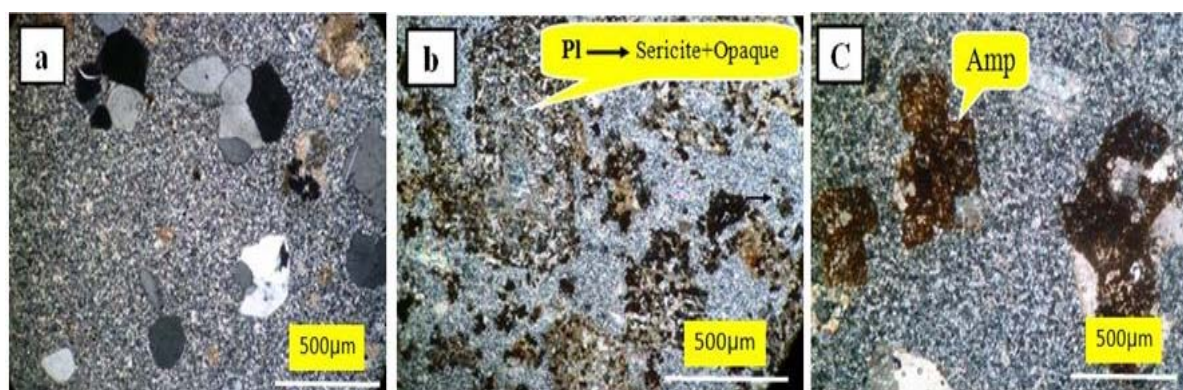
به وجود می‌آید (Shelley, 1993). کانی‌های فرعی شامل مسکویت، بیوتیت، و آمفیبول است. دگرسانی در گرانودیوریت‌های منطقه بسیار شدید و از نوع سریسیتی شدن است به طوری که تشخیص کانی‌ها و بافت اولیه را مشکل می‌سازد. گاه دگرسانی در سنگ‌های گرانودیوریتی به قدری شدید است که فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و فلدسپات‌های آلكالین عمدتاً به سریسیت، کلسیت و کانی‌های کدر تجزیه شده‌اند (شکل ۴- b). هورنبلند و بیوتیت در امتداد رخ‌ها به شدت به کلریت، دگرسان شده‌اند. معمولاً در اثر افزایش فوگاسیته اکسیژن به هنگام برخورد ماگما با آب‌های زیرزمینی و گرمایی، هورنبلندهای موجود در سنگ به شدت اکسیده شده و تنها قالبی از آن باقی مانده است (شکل ۴- b). فراوانی بافت پورفیری در توده‌های نفوذی خوت نشان‌دهنده تفریق بخشی و سردشدن مذاب در چندمرحله است. از طرف دیگر ترکیب کانی‌شناسی توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی مبین فراوانی کانی‌های آبدار مانند هورنبلند و بیوتیت است. گسترش وسیع دگرسانی‌های سریسیتی و سیلیسی بیانگر تفریق بخشی شدید ماگمای اولیه گرانیتوئیدی و محلول‌های گرمایی در ابتدای کانی‌زایی است.

علوم زمین و محیط زیست دانشگاه یاماگاتا در کشور ژاپن آنالیز شدند. آنالیزهای نقطه‌ای عمدتاً بر روی کانی‌های گارنت و پیروکسن به منظور تعیین ترکیب شیمیایی با دستگاه سوپرپروب اتوماتیک مدل JEOL JXA-8600 با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ kV و جریان اشعه‌ای ۲۰ nA انجام شدند. تعدادی نمونه از توده نفوذی مرتبط با اسکارن‌های منطقه به منظور تعیین مقادیر عناصر اصلی و جزئی به روش XRF آنالیز شد.

پتروگرافی

توده نفوذی

توده‌های نفوذی منطقه مطالعه شده به صورت استوک، دایک و آپوفیز هستند. به علت دگرسانی و نوع فرسایش، شکل آن در رخنمون‌ها به خوبی مشخص نیست. با نگرش به بررسی‌های پتروگرافی، این توده‌های نفوذی، نیمه عمیق بوده و غالباً دارای ترکیب گرانودیوریت با بافت پورفیری هستند. کوارتز و پلاژیوکلاز فراوان‌ترین فنوکریست تشکیل‌دهنده آن‌ها هستند که در آن کوارتز ۴۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد و دارای شکل‌های خلیجی، کروی و مضرسی است (شکل ۴- a) که به علت رشد غیرتعدادی یا تأثیرات انحلالی ناشی از کاهش فشار در حین صعود ماگما به سطح زمین



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی (XPL) از توده نفوذی پورفیری در منطقه خوت، (a) خوردگی خلیجی و گردشگری بلورهای کوارتز در گرانودیوریت‌های منطقه خوت، (b) جانشینی کامل پلاژیوکلازها با سریسیت و اپاک و (c) جانشینی کامل آمفیبول‌ها توسط اپاک در گرانیت‌های منطقه خوت

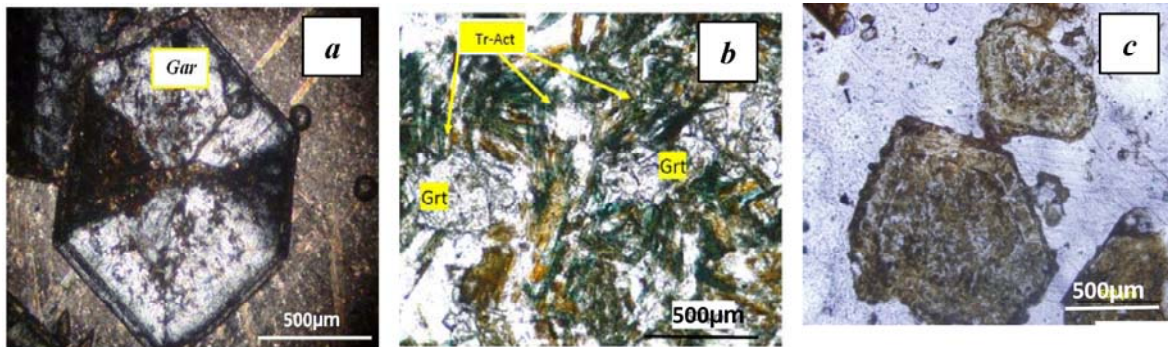
اسکارن

اسکارن تشکیل شده در کانسار خوت از نوع اگزواسکارن است که در آن دو زون اسکارنی گارنت-پیروکسن اسکارن و گارنت اسکارن مشاهده می‌شود.

زون گارنت- پیروکسن اسکارن

گارنت یکی از شاخص‌ترین کانی‌های موجود در اسکارن خوت است. گارنت در زون گارنت- پیروکسن درشت‌بلور و ناهمسانگرد بوده و دارای منطقه‌بندی نوسانی و ماکل قطاعی است (شکل ۵- a). منطقه‌بندی

نوسانی در بلورهای گارنت، بیانگر عدم تعادل و تغییرات ترکیب فاز سیال در حین رشد کانی است (Ciboanu and Cook, 2004). گارنت در اثر واکنش‌های قهقرایی در مرحله متاسوماتیسم پس‌رونده به کلریت، ترمولیت-اکتینولیت، اپیدوت، کلسیت و اکسیدهای آهن تبدیل شده است (شکل ۵- b). گاه دگرسانی پس‌رونده به قدری شدید است که گارنت‌ها به شدت تجزیه شده و کاملاً به کلریت، اپیدوت و هماتیت تبدیل شده‌اند به طوری که تنها شکل دروغینی (psedomorph) از گارنت باقی مانده است (شکل ۵- c).



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی از زون گارنت- پیروکسن اسکارن در منطقه خوت، (a) زونینگ نوسانی گارنت‌های ناهمسانگرد در اسکارن‌های منطقه خوت (XPL)، (b) جانشینی گارنت توسط ترمولیت- اکتینولیت در مرحله متاسوماتیسم پس‌رونده (PPL)، (c) جانشینی کامل گارنت توسط اپیدوت، کلریت و هماتیت با حفظ شکل اولیه گارنت و تشکیل شکل دروغین حاصل از آن در مرحله متاسوماتیسم پس‌رونده (PPL)

پس‌رونده است (شکل ۶- a). کلینوپیروکسن عمدتاً به صورت بلورهای ریز بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار مشاهده می‌شود. این کانی به صورت ادخال در گارنت تشکیل شده است که نشان‌دهنده رشد همزمان این دو کانی یا تبلور زودتر کلینوپیروکسن است (شکل ۶- b). ترمولیت- اکتینولیت به صورت بلورهای سوزنی‌شکل تشخیص داده می‌شود. کلسیت فراوان‌ترین کانی تشکیل‌دهنده در زمینه سنگ‌های اسکارنی است که به صورت جانشینی، رگچه‌ای و بین بلوری نیز مشاهده می‌شود (شکل ۶- c). کلسیت در اثر

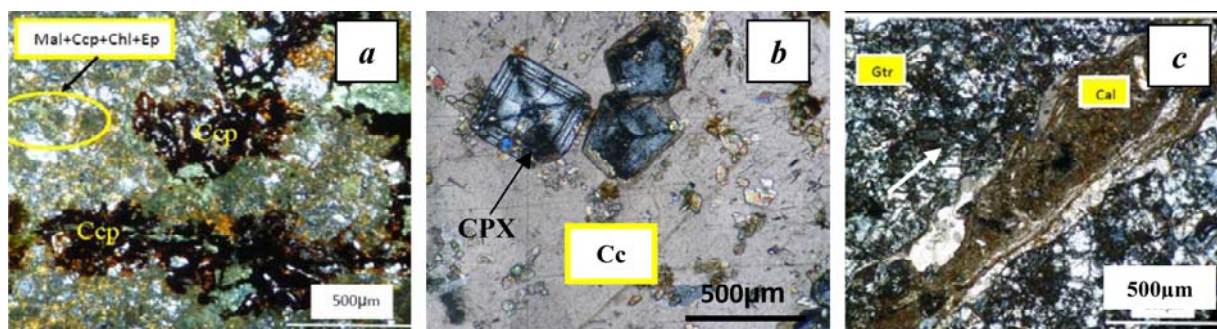
دگرسانی پس‌رونده اغلب در مناطق برشی یا گسلی رخ داده است زیرا در سیستم شکستگی‌ها فشار کاهش می‌یابد و در این نقاط جریان محلول زیاد است. همچنین در این نقاط، استرین‌های منطقه برشی باعث تجدیدتبلور کامل، تغییر بافت، حذف شواهد و آثار مربوط به وجود مواد اولیه دمابالتر می‌گردد (Shelley, 1993). گاهی شدت دگرسانی به حدی است که گارنت‌های انیزوتروپ توسط کالکوپیریت جانشین شده‌اند که نشان‌دهنده تأثیر سیالات هیدروترومال در شکل‌گیری کانسار در مرحله متاسوماتیسم

گارنت- پیروکسن اسکارن است. همراه با این گارنت‌ها (شکل ۷- a و b) کانه‌زایی مس مشاهده می‌شود. این دسته از گارنت‌ها، منطقه‌بندی نوسانی و ماکل قطاعی را به وضوح نشان می‌دهند. دسته دوم گارنت اسکارن‌هایی هستند که دارای بافت گرانوبلاستیک بوده و از گارنت‌های همسانگرد و خودشکل تشکیل شده‌اند (شکل ۷- c). این دسته از گارنت‌ها فاقد منطقه‌بندی نوسانی و ماکل قطاعی هستند و تنها ناهمسانگردی ضعیفی را در حاشیه نشان می‌دهند. دگرسانی گارنت‌های همسانگرد به اپیدوت، کلریت و کلسیت در قسمت مرکزی آشکار است (شکل ۷- d). همراه با این دسته از گارنت‌ها کانه‌زایی مس مشاهده نمی‌شود.

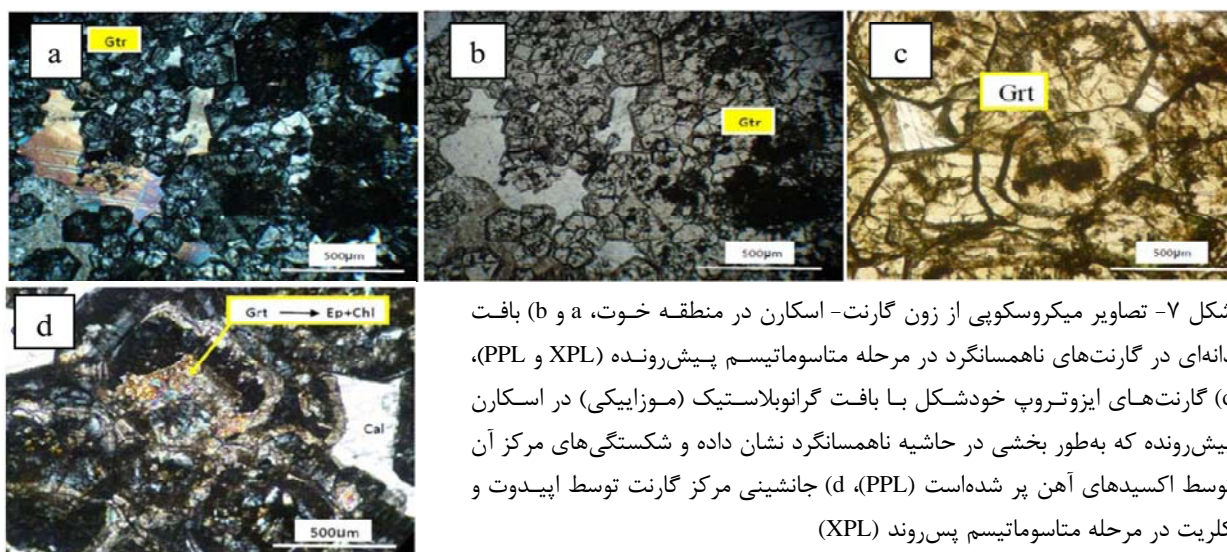
خوردگی توسط کوارتز، بافت حلقوی نشان می‌دهد که بیانگر تأثیر دگرسانی پس‌رونده در منطقه است. کوارتز نیز به‌صورت جانشینی، رگچه‌ای و بین‌بلوری تشکیل شده است.

گارنت اسکارن

میزان گارنت در این زون به بیش از ۹۰ درصد نیز می‌رسد. زون گارنت اسکارن در منطقه خوت به دو شکل کاملاً متفاوت وجود دارد. یک دسته گارنت اسکارن‌هایی هستند که دارای بافت دانه‌ای بوده و به‌طور کل از گارنت‌های خودشکل و ناهمسانگرد تشکیل شده است. گارنت‌های این زون شبیه به گارنت‌های زون



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی XPL از زون گارنت- پیروکسن اسکارن در منطقه خوت، (a) تبدیل کامل گارنت به کالکوپیریت، مالاکیت، اپیدوت و کلریت در زون گارنت- پیروکسن اسکارن‌های منطقه خوت در مرحله متاسوماتیسم پس‌رونده، (b) ادخال‌های کلینوپیروکسن در گارنت‌های منطقه خوت و (c) کلسیت به‌صورت رگچه‌ای فضای بین گارنت‌های اینزوتروپ را پر نموده است.

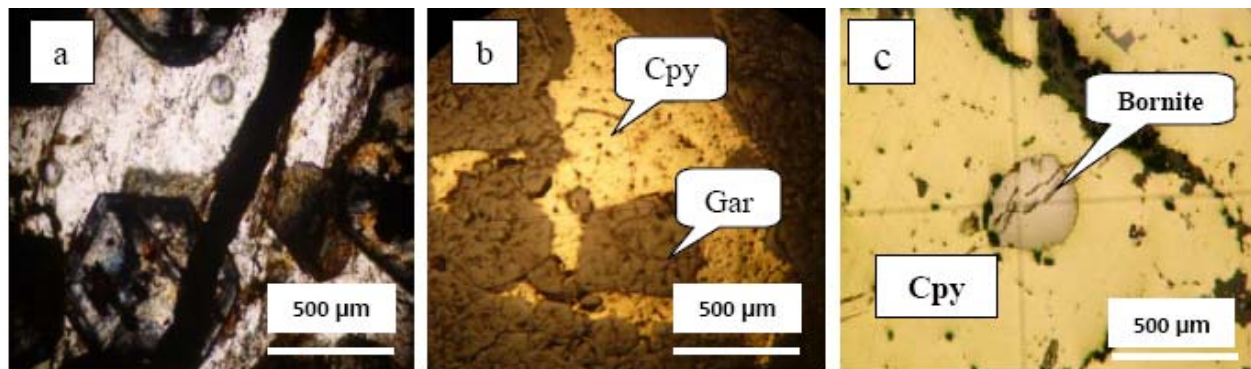


شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی از زون گارنت- اسکارن در منطقه خوت، (a و b) بافت دانه‌ای در گارنت‌های ناهمسانگرد در مرحله متاسوماتیسم پیش‌رونده (XPL و PPL)، (c) گارنت‌های اینزوتروپ خودشکل با بافت گرانوبلاستیک (موزایکی) در اسکارن پیش‌رونده که به‌طور بخشی در حاشیه ناهمسانگرد نشان داده و شکستگی‌های مرکز آن توسط اکسیدهای آهن پر شده‌است (PPL)، (d) جانشینی مرکز گارنت توسط اپیدوت و کلریت در مرحله متاسوماتیسم پس‌روند (XPL)

کانه‌زایی

بیشترین کانه‌زایی مس در زون گارنت-پیروکسن اسکارن صورت گرفته است و کانه‌زایی کالکوپیریت به صورت انتشاری، رگچه‌ای و شکافه پرکن مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تشکیل کانسار پس از اسکارن‌زایی است (شکل ۸- a و b). کانه‌زایی در مرمها اغلب به صورت رگه‌ای، رگچه‌ای و گاهی به صورت انتشاری و جان‌شینی مشاهده می‌شود (شکل ۸- c). کانی‌های فلزی مشاهده شده که به صورت اولیه تشکیل شده‌اند به طور عمده شامل پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، بورنیت و مگنتیت است. کانی‌هایی که به صورت ثانویه در اثر اکسیداسیون و تجزیه کانی‌های

اولیه حاصل شده‌اند شامل اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن مثل هماتیت، لیمونیت و گوتیت و کربنات‌های مس مانند ملاکیت و آزوریت هستند. کانه‌های فلزی تقریباً ۳ درصد مقاطع مطالعه شده را تشکیل می‌دهند. بر اساس مطالعه مقاطع صیقلی، پیریت و کالکوپیریت، کانی‌های سولفیدی اصلی در این زون هستند که با مقادیر کمتری از کانی‌های اکسیدی نظیر هماتیت و مگنتیت همراهی می‌شوند. پیریت و کالکوپیریت اغلب فضای بین کانی‌های کالکسیلیکاته را پر کرده‌اند و احتمالاً در پایان مرحله پیش‌رونده یا در مرحله دگرسانی پس‌رونده تشکیل شده‌اند.



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی از کانه‌زایی در مرمها و اسکارن‌های منطقه خوت، (a) شکل‌گیری کالکوپیریت به صورت رگچه‌ای پس از تشکیل اسکارن پیش‌رونده در مرحله متاسوماتیسم پس‌رونده (XPL)، (b) کالکوپیریت به صورت شکافه پرکن در فضای بین گارنت‌ها و (c) بورنیت به صورت انتشاری در داخل کالکوپیریت

و طلا را دارد (شکل ۹).

بر اساس نمودار Pearce و همکاران (۱۹۸۴) مشخصات ژئوشیمیایی گرانیتوئید خوت مشابه با گرانیتوئیدهای قوس آتشفشانی است و اسکارن‌های آهن، طلا، مس و روی اغلب در ارتباط با توده‌های نفوذی هستند که در قوس‌های آتشفشانی تشکیل می‌شوند. بر این اساس گرانیتوئیدهای بررسی شده با گرانیتوئیدهای اسکارنی مس تطابق دارند (شکل ۱۰).

مقایسه ویژگی‌های ژئوشیمیایی عناصر اصلی و فرعی

ژئوشیمی توده نفوذی و بررسی ارتباط آن با

اسکارن‌زایی

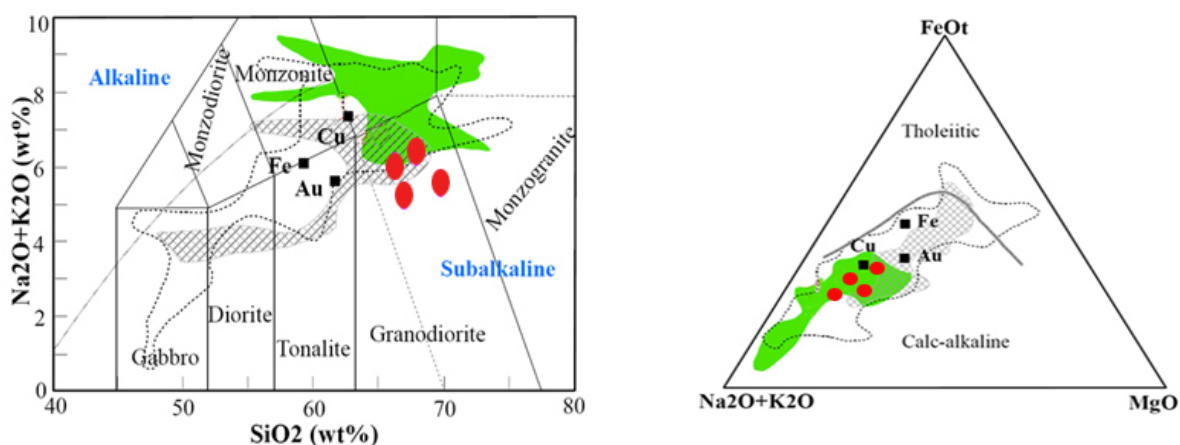
به منظور بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی توده نفوذی مرتبط با اسکارن خوت، ۴ نمونه از سنگ‌های گرانیتوئیدی جهت تعیین مقادیر عناصر اصلی و کمیاب به روش XRF آنالیز شدند. نتایج این آنالیز در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس دی‌اگرام‌های Baragar و Irvine (۱۹۷۱) بیشتر سنگ‌های نفوذی خوت متعلق به سری کالک‌آلکان بوده که پتانسیل کانه‌زایی مس، آهن

Au-Cu کمر بند طلای ریونارسا است، بنابراین اسکارن خوت می‌تواند از نظر پتانسیل کانه‌زایی Au-Cu-Fe دارای اهمیت باشد (شکل ۱۱).

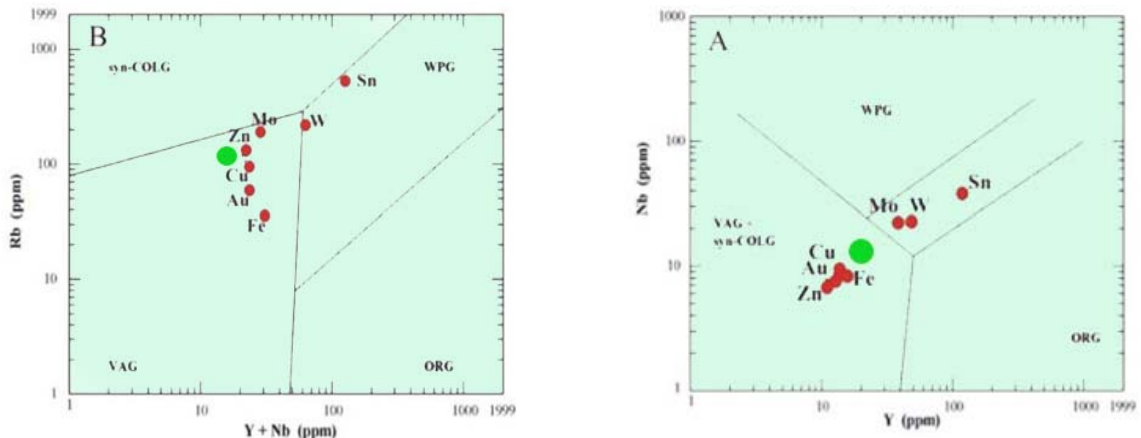
توده نفوذی خوت با سایر گرانیتوئیدهای اسکارنی دنیا نشان می‌دهد که این توده شبیه گرانیتوئیدهای اسکارنی Cu-Fe میلستریم کانادا، Cu مکنزی کانادا و

جدول ۱- نتایج آنالیز عناصر اصلی (wt%) و جزئی (PPm) در گرانیتوئیدها و مرمهای منطقه

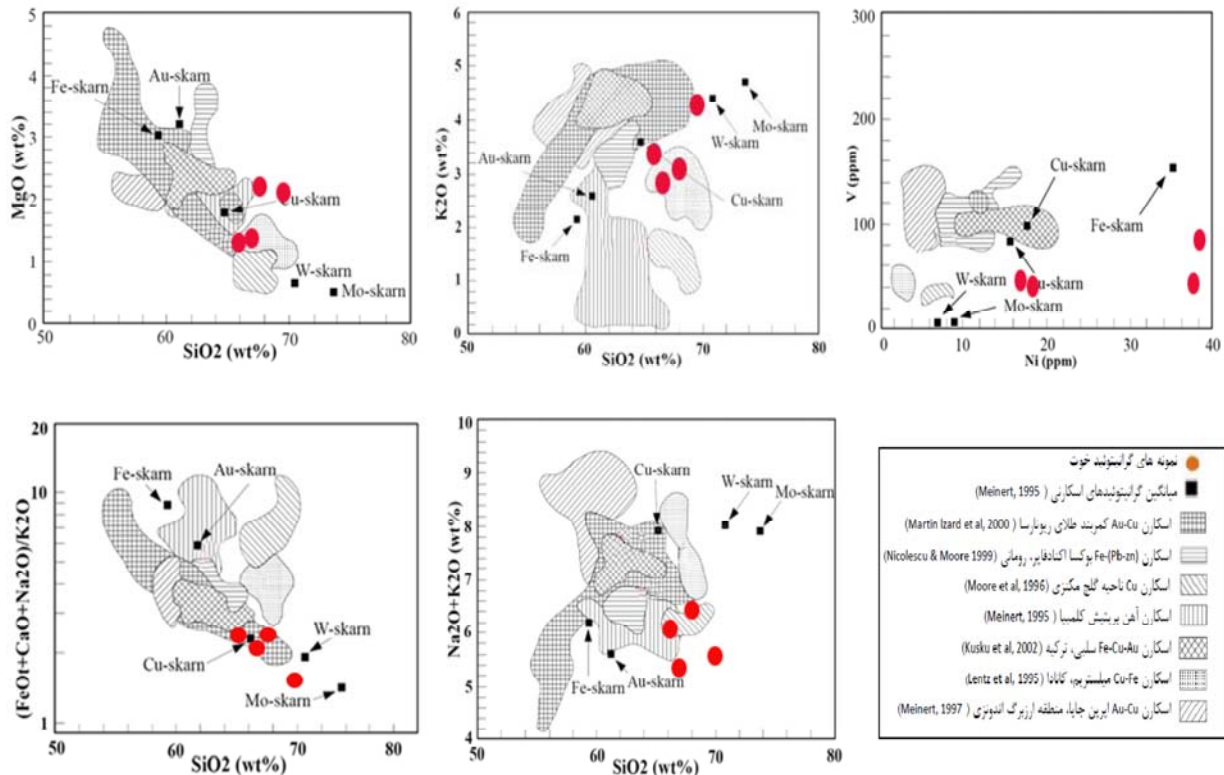
Sample	granitoid	granitoid	granitoid	granitoid	Marble	
SiO ₂	67.90	69.77	66.09	66.85	SiO ₂	4.71
Al ₂ O ₃	14.34	14.99	16.05	15.85	Al ₂ O ₃	1.19
FeO ^(T)	3.17	3.77	2.56	2.87	FeO ^(T)	1.69
CaO	2.80	0.95	4.22	3.55	CaO	88.27
Na ₂ O	3.35	1.28	2.74	2.57	Na ₂ O	0.05
MgO	2.19	2.09	1.25	1.34	MgO	3.14
K ₂ O	3.08	4.28	3.32	2.76	K ₂ O	0.42
TiO ₂	0.410	0.755	0.343	0.337	TiO ₂	0.22
MnO	0.029	0.018	0.019	0.061	MnO	0.18
P ₂ O ₅	0.106	0.115	0.094	0.090	P ₂ O ₅	0.10
CO ₂	2.390	1.940	3.080	3.480	Total	99.96
Rb	84	173	97	102	Rb	12
Sr	427	74	290	418	Sr	274
V	41	83	44	38	V	16
W	285	139	292	283	W	25
Y	16	27	16	17	Y	7
Zr	119	195	115	111	Zr	12
Zn	24	21	15	34	Zn	20
Mo	3	2	1	5	Mo	7
Ba	401	286	179	273	Ba	5
Ce	10	35	6	8	Ce	20
Ga	12	11	15	16	Ga	13
Co	19	16	23	12	Co	1
Cr	17	46	14	1	Cr	1
Cu	2	50	51	27	Cu	20
Nb	1	11	7	1	Nb	6
Ni	38	39	17	18	Ni	1
Pb	8	6	6	8	Pb	5
U	2	9	5	1	U	1
Th	8	11	12	2	Th	2



شکل ۹- تعیین سری ماگمایی توده نفوذی خوت جهت تعیین نوع کانه‌زایی اسکارن با استفاده از نمودار Baragar و Irvine (۱۹۷۱)



شکل ۱۰- نمودارهای تعیین‌کننده خاستگاه تکتونیکی گرانیتوئید خوت بر اساس عناصر کمیاب (Pearce *et al.*, 1984). میانگین ترکیب نمونه‌های گرانیتوئید خوت. ●: میانگین ترکیب توده‌های نفوذی مرتبط با کانسارهای اسکارنی (Meinert, 1995)



شکل ۱۱- مقایسه نمودارهای هارکر گرانیتوئید اسکارنی خوت با سایر گرانیتوئیدهای اسکارنی دنیا به منظور ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی در اسکارن کلسیک خوت برگرفته از Kusku و همکاران (۲۰۰۲)

خوت هستند. ترکیب گارنت‌های ناهمسانگرد از نوع گراسولار- آندرادیت است و تنها درصد ناچیزی اسپسارتین و آلماندین دارند (جدول ۲ و شکل ۱۲). بر

شیمی کانی‌های اسکارنی گارنت

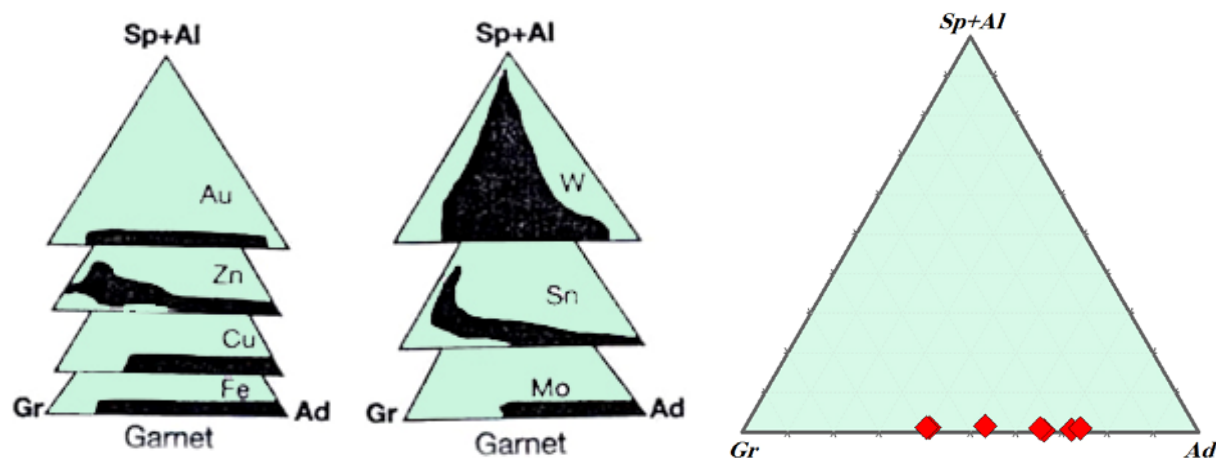
گارنت‌های ناهمسانگرد عمده‌ترین گارنت در کانسار

گارنت‌های مشاهده شده در اسکارن‌های مس، آهن و طلای جهانی دنیا است (شکل ۱۲).

اساس نمودار Meinert (۱۹۸۹) گستره ترکیبی گارنت‌های این اسکارن‌ها منطبق با گستره ترکیبی

جدول ۲- نتایج آنالیز نقطه‌ای گارنت‌های ناهمسانگرد در گارنت اسکارن‌های منطقه خوت

sample	Kh10-1-1	Kh10-1-2	Kh10-1-3	Kh10-1-4	Kh10-1-5	Kh10-1-6	Kh10-1-8
SiO ₂	37.52	38.72	38.46	37.20	38.29	37.40	37.79
TiO ₂	0.23	0.17	0.01	0.20	0.00	0.27	0.15
Al ₂ O ₃	7.21	13.21	13.12	5.89	10.30	5.35	7.28
FeO ^(T)	19.86	12.95	12.28	21.16	16.32	22.38	19.68
MnO	0.12	0.39	0.33	0.16	0.46	0.30	0.26
MgO	0.00	0.05	0.01	0.04	0.04	0.06	0.04
CaO	35.16	35.87	35.81	35.01	35.47	34.43	34.87
Total	100.13	101.36	100.02	99.66	100.88	100.19	100.07
O#	12	12	12	12	12	12	12
Si	2.98	2.98	2.99	2.99	2.99	3.00	3.01
Ti	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01
Al	0.68	1.20	1.20	0.56	0.95	0.51	0.68
Fe ³⁺	1.33	0.83	0.81	1.45	1.08	1.47	1.29
Fe ²⁺	-0.01	0.00	-0.02	-0.03	-0.01	0.03	0.02
Mn	0.01	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02
Mg	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	3.00	2.95	2.98	3.01	2.97	2.96	2.97
Total	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al+Fe+Mn	2.01	2.05	2.04	2.02	2.06	2.00	1.99
And	66.00	40.51	39.92	71.84	52.46	73.68	64.79
Gr	33.60	58.28	59.00	27.62	46.08	25.31	34.31
Sp	0.40	1.22	1.08	0.55	1.46	1.00	0.91

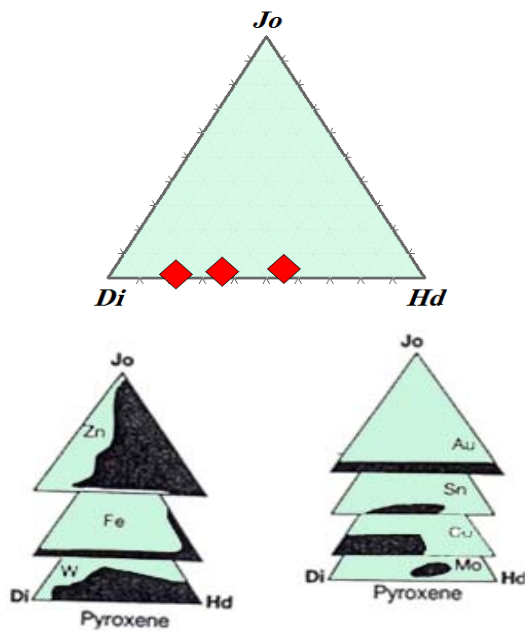


شکل ۱۲- نمودار توزیع ترکیب گارنت‌های ناهمسانگرد و مقایسه آن با اسکارن‌های جهان (Meinert, 1989). نمودار نشان می‌دهد که ترکیب گارنت‌های اسکارن خوت با ترکیب گارنت‌های اسکارن‌های مس، آهن و طلای جهانی مطابقت دارد (Ad: andradite, Gr: grossular, Al: almandine, Sp: spessartine)

نشده است (جدول ۳). بر اساس نمودار نام‌گذاری پیروکسن‌ها (شکل ۱۳)، پیروکسن‌های خوت در مقایسه با اسکارن‌های جهان در جایگاه پیروکسن‌های اسکارن‌های مس و آهن قرار می‌گیرند.

کلینوپروکسن

ترکیب کلینوپروکسن در اسکارن خوت از نوع دیوپسید- همدنبرژیت است و هیچ آثاری از تغییرات ترکیبی و منطقه‌بندی در بلورهای پیروکسن مشاهده



شکل ۱۳- نمودار توزیع ترکیب کلینوپیروکسن‌ها و مقایسه آن با اسکارن‌های جهان (Meinert, 1989). (Hd: hedenbergite, Di: diopside, Jo: johannsenite)

جدول ۳- نتایج آنالیز نقطه‌ای کلینوپیروکسن در اسکارن خوت

Sample	Kh6-1	Kh6-2	Kh6-3
SiO ₂	53.65	52.35	56.27
TiO ₂	0	0.02	0
Al ₂ O ₃	0.35	0.14	0.19
Fe ₂ O ₃	0.65	2.12	0
FeO	6.45	10.26	16.71
MnO	0.46	0.75	1.21
MgO	13.73	10.42	7.4
CaO	25.32	25.11	20.67
Na ₂ O	0.07	0.18	0.12
Total	100.61	101.15	102.56
O#	6	6	6
Si	1.99	2.00	2.15
Ti	0.00	0.00	0.00
Al ^{IV}	0.01	0.00	-0.15
Al ^{VI}	0.01	0.01	0.15
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.20	0.33	0.53
Mn	0.01	0.02	0.04
Mg	0.76	0.59	0.42
Ca	1.01	1.03	0.84
Na	0.01	0.01	0.01
Fe+Mg+Mn	0.98	0.95	0.99
Di	77.98	62.76	42.38
Hd	20.54	34.67	53.68
Jo	1.48	2.57	3.94

فرآیندهای اسکارن‌زایی

تشکیل کانی‌های اسکارنی اغلب بر اثر برخورد محلول‌های هیدروترمال ماگمایی با سنگ‌های مسیر حرکت به‌ویژه در اثر برخورد با سنگ‌های کربناته در حرارت‌های بالا تشکیل می‌شوند. علاوه بر این، عواملی چون فوگاسیته اکسیژن، فوگاسیته گوگرد، غلظت دی‌اکسیدکربن در آب، وجود کلر، فلور و دیگر عناصر گازی و فعال، روی نوع کانی، ترکیب شیمیایی کانی، دامنه پایداری کانی و غیره تأثیر می‌گذارند. امروزه شرایط تشکیل چنین کانی‌هایی هم در آزمایشگاه‌های معروف دنیا به‌طور تجربی و هم برای کانسارهای اسکارن مطالعه شده است (Taylor and Liou, 1978). معمولاً تشکیل اسکارن در سه مرحله اتفاق می‌افتد که در مرحله اول نفوذ ماگما در بخش‌های سطحی پوسته باعث تشکیل یک هاله دگرگونی می‌گردد. در منطقه خوت هاله دگرگونی به‌صورت محلی صورت گرفته و شیل‌ها تا حدی حالت تجدید تبلور یافته‌اند، ولی لایه‌بندی در شیل‌ها هنوز مشخص است. بهترین مشخصه مرحله

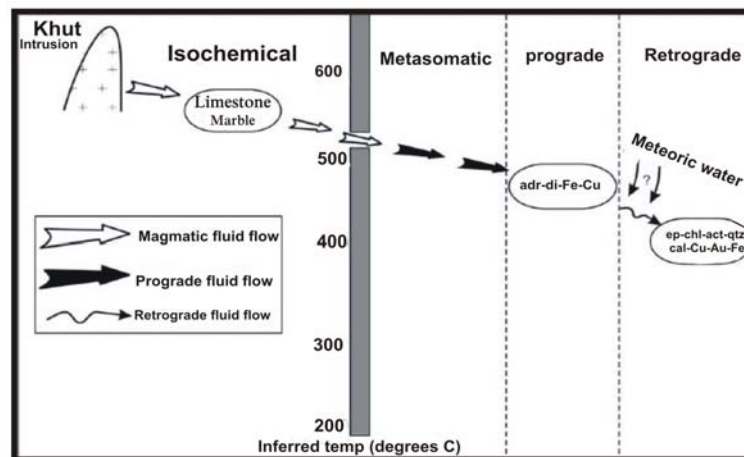
دگرگونی، مرمر و کوارتزیت‌های تشکیل شده در خود کانسار خوت است که میزبان عمده کانه‌زایی مس و کانی‌های اسکارنی است. مرحله دوم، جدایش محلول‌های ماگمایی و تشکیل اسکارن پیش‌رونده است که خود به دو صورت اسکارن پیشین با تشکیل کانی‌های بی‌آب مثل گارنت و کلینوپیروکسن و اسکارن پسین با تشکیل کانی‌های آبدار مثل آمفیبول‌ها مشخص می‌گردد. کانه‌زایی اغلب همراه با اسکارن پسین رخ می‌دهد. شکستگی‌های حاصل از فشار ناشی از حرکت رو به بالای ماگما و فشار فاز سیال (hydrofracturing) امکان پخش و نفوذ سیالات در سنگ‌های پیرامون را فراهم می‌کند. شواهد این مرحله در کانسار خوت نیز کاملاً مشخص است که می‌توان به تشکیل گارنت نوع گراسولار-آندرادایت و کلینوپیروکسن نوع دیوپسید-هدنبرژیت با بافت‌های معرف اسکارن پیش‌رونده اشاره کرد. از جمله این بافت‌ها می‌توان به بافت‌های گرانوبلاستیک و دانه‌ای در گارنت اشاره کرد (شکل‌های a تا c).

مرحله پس‌رونده معروف است. روابط پاراژنتیکی کانی‌ها در اسکارن خوت در جدول ۴ و شکل ۱۴ به صورت شماتیک نشان داده شده است.

در مرحله سوم کانی‌های تشکیل شده در مرحله اول در برخورد با آب‌های جوی با دمای کمتر به کانی‌های ثانویه آبدار مثل کلریت و اپیدوت تبدیل می‌شوند که به

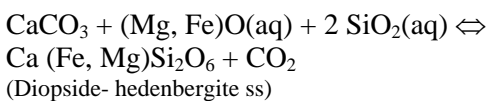
جدول ۴- روابط پاراژنتیکی کانی‌ها در اسکارن خوت

Mineral	decreasing age				
	Metasomatic alteration				Supergene
Stage	Prograde stage		Retrograde stage		
substage	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV	
Clinopyroxene	_____				
Garnet		_____			
Tremolite-Actinolite			_____		
Quartz				_____	
Calcite			_____		
Ore mineral					_____



شکل ۱۴- نمودار شماتیک از روابط پاراژنتیکی کانی‌ها به همراه مسیر حرکت سیال

بر سنگ‌های آهکی به پیدایش پیروکسن از نوع دیوپسید- هدنبرژیت در اسکارن‌های متاسوماتیکی منجر شده است (Deer *et al.*, 1991). واکنش احتمالی چنین واکنشی به صورت زیر است:

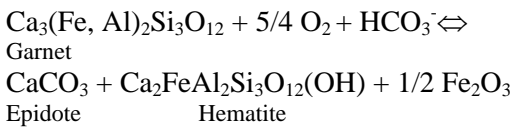


واکنش‌های کانیایی مرتبط با فرآیندهای اسکارن‌زایی

مرحله پیش‌رونده (Prograde stage)

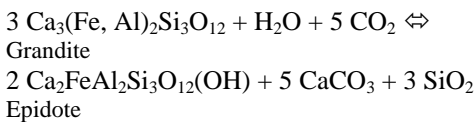
در فرآیند متاسوماتیسم پیش‌رونده، تأثیر سیالات جریان یافته حاوی SiO_2 ، MgO و FeO

است. اپیدوت، متداول‌ترین کانی دگرسانی در این مرحله است. احتمالاً افزایش محلی فوگاسیته اکسیژن نقش مهمی در تشکیل اپیدوت طبق واکنش زیر ایفا کرده است (Perkins *et al.*, 1986; Berman *et al.*, 1988).

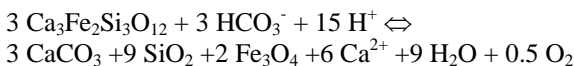


در محل شکستگی‌ها و در مناطقی که محلول‌های هیدروترمال غنی از H_2O و CO_2 حضور دارند، اپیدوت می‌تواند در نتیجه ناپایداری گارنت توسط واکنش زیر تشکیل شود (شکل ۷-د) (Perkins *et al.*, 1986; Berman *et al.*, 1988).

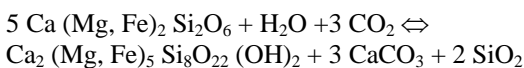
در محل شکستگی‌ها و در مناطقی که محلول‌های هیدروترمال غنی از H_2O و CO_2 حضور دارند، اپیدوت می‌تواند در نتیجه ناپایداری گارنت توسط واکنش زیر تشکیل شود (شکل ۷-د) (Perkins *et al.*, 1986; Berman *et al.*, 1988).



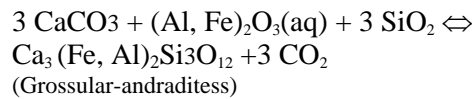
مجموعه کانی‌شناسی کوارتز به همراه مگنتیت و کلسیت، بر اثر دگرسانی گارنت توسط واکنش زیر در این مرحله تشکیل می‌شود (Einaudi and Burt, 1982).



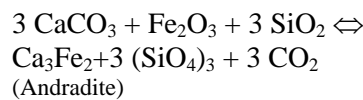
از آن‌جا که فروپاشی پیروکسن به کلسیت، کوارتز و ترمولیت-اکتینولیت در مشاهدات پتروگرافی آشکار است (شکل ۱۵-ا و b)، بنابراین واکنش زیر در مرحله پس‌رونده پیشین نیز در اسکارن خوت رخ داده است (Deer *et al.*, 1991).



ترکیب گارنت بستگی به ترکیب سنگ میزبان و سیال نفوذی دارد به طوری که در سنگ‌های کربناته مارنی گارنت‌های نوع گروسولار به همراه آندرادیت شکل می‌گیرند (Winkler, 1915). با پیشرفت متاسوماتیسم، عناصر دیگر مثل Al، Fe و Si وارد ترکیبات واکنش‌های متاسوماتیکی شده و در تشکیل اسکارن شرکت می‌کنند. خصوصیات پترولوژیک نشان می‌دهد که گارنت‌های ناهمسانگرد با ترکیب گروسولار-آندرادیت در منطقه خوت می‌تواند در اثر نفوذ سیال ماگمایی آهن و سیلیسیم‌دار توسط انجام واکنش‌های متاسوماتیک با سنگ کربناته میزبان توسط واکنش زیر تشکیل گردد (Deer *et al.*, 1991).



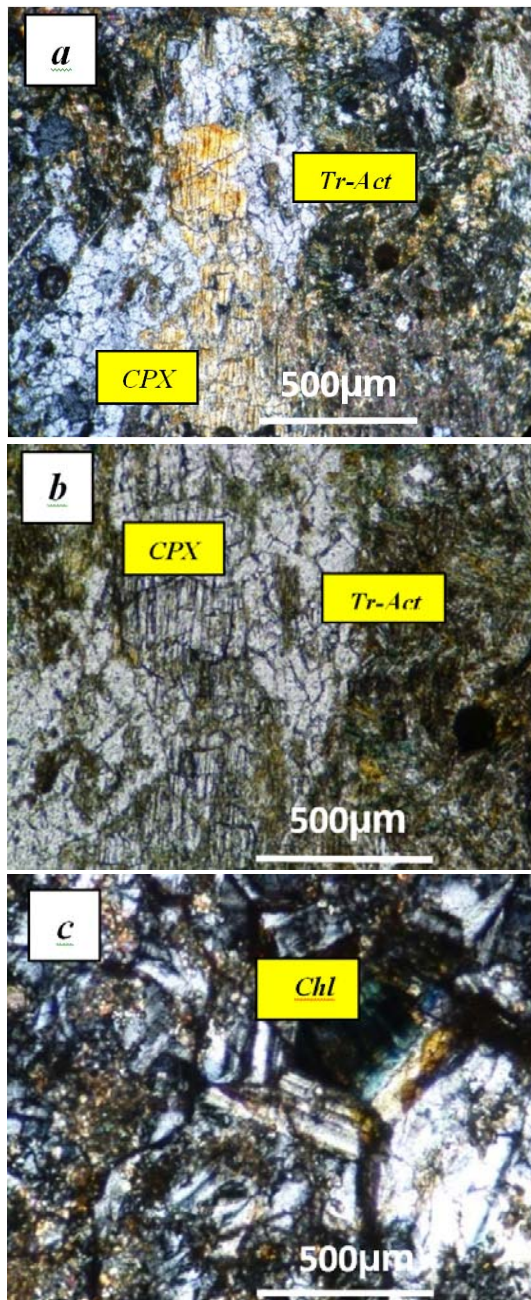
از آن‌جا که سنگ‌های آهنی به دلیل مارنی بودن، مقداری اکسید آلومینیم نیز در ترکیب خود دارند (جدول ۱)، بنابراین می‌توانند Al مورد نیاز برای تشکیل گارنت گروسولار-آندرادیت را فراهم نمایند. گارنت‌های همسانگرد در منطقه خوت توسط واکنش زیر تشکیل شده‌اند (Deer *et al.*, 1991).



مرحله پس‌رونده (Retrograde stage)

مطالعات کانیایی و بافتی نشان می‌دهد که این مرحله از فرآیند اسکارن‌زایی در دو مرحله زیر رخ داده است:

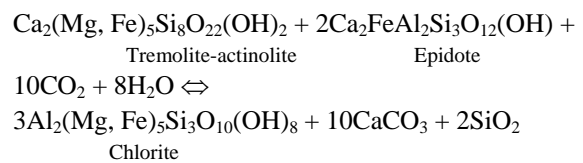
الف) مرحله پس‌رونده پیشین: در این مرحله در اثر برهمکنش سیالات هیدروترمالی دما پایین با مجموعه‌های کالک‌سیلیکاتی تشکیل شده در مرحله پیش‌رونده، مقادیر زیادی فازهای سیلیکاتی (کوارتز) و کالک‌سیلیکاتی آبدار (اپیدوت، ترمولیت-اکتینولیت) به همراه سولفیدها (پیریت، کالکوپیریت و بورنیت)، اکسیدها (مگنتیت و هماتیت) و کربنات تشکیل شده



شکل ۱۵- تصاویر میکروسکوپی از اسکارن‌ها؛ (a و b) جانشینی دیوپسید با ترمولیت- اکتینولیت در مرحله متاسوماتیسم پس‌رونده پیشین (a: XPL، b: PPL)، (c) جانشینی کامل مرکز گارنت با کلریت در مرحله متاسوماتیسم پس‌رونده پسین (XPL)

در دماهای بیش از ۴۳۰ درجه‌سانتیگراد حتی در غلظت بالای گوگرد، آندرادیت پایدار است (شکل ۱۶) اما در دماهای کمتر از ۴۳۰ درجه‌سانتیگراد و با فوگاسیته گوگرد نسبتاً بالا (بیشتر از 10^{-6}) سیالات در

(ب) مرحله پس‌رونده پسین: در این مرحله مجموعه کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب و آبدار تشکیل شده در مراحل قبلی، توسط سیالات نسبتاً دما پایین، مجدداً دگرسان شده و به مجموعه کانیایی بسیار ریزدانه متشکل از کانی‌های رسی، کلریت، کوارتز و هماتیت تبدیل شده‌اند (شکل ۵- c و ۱۵- c). تشکیل کلریت، کلسیت و کوارتز از اپیدوت و ترمولیت- اکتینولیت ممکن است در نتیجه واکنش کربن‌گیری زیر رخ داده باشد (Deer et al., 1991):



شرایط فیزیکوشیمیایی فرایندهای اسکارن‌زایی

عدم وجود ولاستونیت در اسکارن‌های منطقه خوت نشان‌دهنده این است که مجموعه گارنت (آندرادیت- گراسولار) و کلینوپیروکسن (دیوپسید- هیدنبرژیت) در دمای کمتر از ۵۵۰ درجه‌سانتیگراد تشکیل شده است (Einaudi and Burt, 1982) (شکل ۱۶). هم‌رشدی و نبود مرز جانشینی بین آندرادیت و هیدنبرژیت می‌تواند نشان‌دهنده تشکیل هم‌زمان آن‌ها در محدوده دمایی ۴۳۰ تا ۵۵۰ درجه‌سانتیگراد و فوگاسیته اکسیژن ($f\text{O}_2$) 10^{-23} تا 10^{-26} باشد (شکل ۱۶). در دماهای کمتر از ۴۷۰ درجه‌سانتیگراد در محدوده فوگاسیته اکسیژن 10^{-21} تا 10^{-24} به مجموعه کانیایی کوارتز، کلسیت و مگنتیت و در دماهای کمتر از ۴۵۰ درجه‌سانتیگراد و فوگاسیته اکسیژن بیشتر از 10^{-21} به مجموعه کوارتز، کلسیت و هماتیت تبدیل می‌شود (شکل ۱۶). با توجه به تشکیل مجموعه مگنتیت، هماتیت، کلسیت و کوارتز در مرحله پس‌رونده (در دمای کمتر از ۴۵۰ درجه‌سانتیگراد) فوگاسیته اکسیژن سیال در آغاز تقریباً 10^{-21} بوده است (شکل ۱۶).

با سنگ دیواره سبب ناپایداری کمپلکس‌های کلریدی و نهشت کانه‌های اکسیدی (مگنتیت-هماتیت) و سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت و بونیت) شده است. در مرحله پایانی، مجموعه کانیایی کلریت، کلسیت، کوارتز و کانی‌های رسی در اثر دگرسانی پس‌رونده تأخیری مجموعه‌های پیشین، تشکیل شده است. پس از فرآیند اسکارن‌زایی، کانه‌های اکسیدی و سولفیدی با منشأ اسکارنی متحمل دگرسانی سوپرژن و تشکیل اکسیدهای آهن آبدار (گوتیت-لیمونیت) و کربنات‌های مس (مالاکیت-آزوریت) شده است.

سپاسگزاری

از همکاری‌های بی‌دریغ پروفیسور ناکاشیما از بخش علوم زمین دانشگاه یاماگاتا ژاپن برای انجام آنالیز نقطه‌ای کانی‌ها و تهیه تصاویر SEM و همچنین آقای دکتر محمدعلی مکی‌زاده از گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان و خانم محبوبه حسینی به‌خاطر در اختیار گذاشتن آنالیز XRF تقدیر و تشکر می‌شود.

و ماسه‌سنگی سازند نایبند به مرمر و کوارتزیت شده است. پس از جای‌گزینی کامل توده گرانودیوریتی خوت و شروع انجماد، به‌تدریج سیال‌های موجود در ماگما به حد اشباع رسیده و به‌صورت یک فاز جدایش‌پذیر از آن جدا شده است. این سیالات ماگمایی با دمای بالا (حدود ۶۰۰ درجه سانتیگراد) باعث متاسوماتیسم پیش‌رونده شده و موجب پیدایش کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب (گارنت و کلینوپیروکسن) شده است.

مرحله پس‌رونده شامل دو مرحله مجزا ولی پیوسته (مرحله پس‌رونده پیشین و مرحله پس‌رونده پسین) است. در مرحله دگرسانی پس‌رونده پیشین، کاهش تدریجی دمای سامانه گرمایی-ماگمایی و احتمالاً آمیختگی آن با آب‌های جوی به تشکیل مجموعه‌های کالک‌سیلیکاتی آبدار (اپیدوت و ترمولیت-اکتینولیت) در دماهای کمتر از ۴۷۰ درجه سانتیگراد منجر شده است. در این مرحله، کاهش دما و افزایش pH سیال در اثر برهم‌کنش

منابع

- محسنی، ج. (۱۳۸۴) مطالعه ژئوشیمیایی و ژنز کانسار اسکارن خوت در جنوب غرب یزد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
- یزدی، م. (۱۳۷۰) مطالعه زمین‌شناسی اقتصادی و سنگ‌شناسی در نهشته معدنی خوت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهیدبهبشتی، تهران، ایران.
- Berman, R. G. (1988) Internally- consistent thermodynamic data for minerals in the system Na₂O- K₂O- CaO- MgO- FeO- Fe₂O₃- Al₂O₃- SiO₂- TiO₂-H₂O-CO₂. *Journal of Petrology* 29: 455-522.
- Ciboanu, C. L. and Cook, N. J. (2004) Skarn texture and a case study: The oca de Fier- Dogncea ore field, Banat, Romania, *Ore Geology Reviews* 24: 315-370.
- Calagari, A. A. (2003) Stable isotope (S, O, H and C) studies of phyllic and potassic- phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, east Azarbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21: 767-780.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1991) An introduction to the rock forming minerals. 7th impression, Longman, London.

- Einaudi, M. T. and Burt, D. M. (1982) Introduction terminology, classification and composition of Skarn deposits. *Economic Geology* 77: 745-754.
- Forster, D. B., Seccombe, P. K. and Phillips, D. (2004) Controls on skarn mineralization and alteration at the Cadia deposits, New South Wales, Australia. *Economic Geology* 99: 761-88.
- Hajmolla Ali, A. (1993) Geological quadrangle map of Khezr abad: Series sheet 6753. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- 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.
- Jankovic, S. (1984) Metallogeny of the Alpine granitoids in the Tethyan- Eurasian metallogenic belt. 27th International Geological Congress, Moscow, Russia.
- Kusku, I., Kascu, G., Meinert, L. and Floyed, P. (2002) Tectonic setting and petrogenesis of the Celebi granitoid (Turkey) and comparison with world skarn granitoids. *Geochemical Exploration* 76: 175-194.
- Meinert, L. D. (1989) A review of skarns that contain gold. In: Lentz, D. R. (Ed.): Mineralized intrusion-related skarn systems. *Mineralogical Association of Canada, Short Course* 26: 359-414.
- Meinert, L. D., Dipple, G. M. and Nicolescu, S. (2005) World skarn deposits. In: Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J. and Richards, J. P. (Eds.): *Economic Geology. 100th Anniversary Volume, Society of Economic Geologists* 299-336.
- Meinert, L. D. (1995) Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits: chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization. *Mineralogical Association of Canada* 23: 401-418.
- Perkins, E. H., Brown, T. H. and Berman, R. G. (1986) PTX-SYSTEM: Three programs for calculation of pressure- temperature- composition phase diagrams. *Computers and Geoscience* 12: 749-755.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G. (1984) Trace element discrimination diagrams for tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25: 956-983.
- Shelley, D. (1993) *Igneous and metamorphic rocks under the microscope, classification, textures, microstructures and mineral preferred-orientations*. Chapman and Hall, London.
- Taylor, B. E. and Liou, J. G. (1978) The low temperature stability of andradite in C-O-H fluids. *American Mineralogist* 63: 378-393.
- Winkler, G. F. (1915) *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer-Verlag, New York.

Mineralogy and geochemistry of Khut copper deposit West of Taft, Yazd provinc

Azam Zahedi and Mohammad Boomeri *

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Abstract

The Khut deposit is located 40 Km west of Taft in the Yazd province and in the central Iranian volcano-plutonic belt. The intrusion of apophyses of granodiorite intrusion into the carbonate rocks of the Nayband Formation has led to the formation of marble, skarn and copper mineralization. The Khut skarn which is formed in the marble is calcic type and is divided into the garnet skarn and garnet-pyroxene skarn zones. Skarnification processes can be divided into the two distinct stages prograde and retrograde. The prograde stage is characterized by anhydrous calc-silicate minerals such as clinopyroxene and garnet. During retrograde stage, part of marble and anhydrous calc-silicates have been replaced by hydrous calc-silicates, sulfides, oxides and carbonates. The calc-silicate minerals in the Khut deposit were analyzed by electron microprobe. The comparison of chemical composition of garnet with the composition position of other calcic skarns show that the composition range of garnets in the Khut deposit is consistent with the composition range of garnet in the world's gold, iron and copper skarns. Also, the mineralogy and geochemistry of the Khut granitoid is similar to that of granitoids associated with skarn deposits. In this paper, by using petrographic and geochemical studies, the conditions of skarn formation in the Khut copper deposit is investigated.

Key words: Deposit, Mineralogy, Geochemistry, Khut, Yazd

* boomeri@hamoon.usb.ac.ir