



بررسی شیمی و چگونگی تشکیل کانی‌های کالک سیلیکاتی در پهنه اسکارنی آغبلاغ، شمال اشنویه، استان آذربایجان غربی، شمال غرب ایران

نسرین خواجه محمدلو^{۱*}، علی اصغر کلاگری^۱، کمال سیاه چشم^۱، علی عابدینی^۲

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۵/۳۰، نسخه نهایی: ۹۸/۹/۱۱)

چکیده: منطقه آغبلاغ در ۲۱ کیلومتری شمال شهرستان اشنویه، در استان آذربایجان غربی، شمال غرب ایران واقع است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که ذخیره اسکارن آهن- مس این منطقه به دو پهنه گارنت اسکارن و گارنت- پیروکسن اسکارن قابل تفکیک است. بر پایه نتایج ریز کاوالکترونی، ترکیب شیمیایی گارنت‌های این ذخیره از نوع آندرادیت-گروسولار با جزء غالب آندرادیتی است. پیروکسن‌ها نیز از نظر ترکیبی از نوع دیوپسید- هدرنرژیت هستند. فرایندهای اسکارن‌زایی در دو مرحله پیشرونده و پسرونده صورت گرفته است. نبود ولاستونیت، هم رشدی بلورهای گارنت و کلینوپیروکسن و نبود بافت‌های جانشینی نشان می‌دهد که گارنت و پیروکسن به صورت همزمان در گستره دمایی $450-500^{\circ}\text{C}$ با گریزندگی اکسیژن 10^{-26} تا 10^{-23} $f\text{O}_2$ در مرحله پیشرونده تشکیل شده‌اند. در مرحله پسرونده، در دماهای کمتر از 430°C ، کانی‌های کالک سیلیکاتی بدون آب به کانی‌های کالک سیلیکاتی آبدار، سولفیدها (پیریت و کالکوپیریت)، اکسیدها، کلریت، کوارتز و کربنات‌ها دگرسان شده‌اند. در این مرحله، در دماهای کمتر از 430°C ، آندرادیت در گریزندگی گوگرد، $10^{-6} > f\text{S}_2$ به مجموعه‌های کوارتز+کلسیت+پیریت و در $10^{-6} < f\text{S}_2$ به کوارتز + کلسیت + مگنتیت دگرسان شده است.

واژه‌های کلیدی: آغبلاغ؛ اشنویه؛ شیمی‌کانی؛ کالک سیلیکاتی؛ آذربایجان غربی.

مقدمه

آهن پهناور [۵] و آهن میانه [۶] می‌توان اشاره کرد که بررسی‌های دقیقی بر آنها انجام شده است. این در حالی است که تاکنون پژوهش بسیار کمی پیرامون ذخیره اسکارن آهن- مس آغبلاغ صورت گرفته است. تشکیل و گسترش اسکارن آهن- مس آغبلاغ در ارتباط با مجموعه نفوذی اشنویه به سن کرتاسه پسین است. مجموعه نفوذی یاد شده ۹ توده با ابعادی در حد استوک را شامل می‌شود که در سه خانواده گرانیته، دیوریت و گرانیته قلیایی سینیت قلیایی قابل رده‌بندی است [۷]. بر پایه پژوهش قلمقاش و همکاران [۷]، جایگیری توده‌های نفوذی اشنویه در دو مرحله زمانی رخ داده است، نخست، توده‌های دیوریتی و گرانیته به طور همزمان (یا با اختلاف زمانی کوتاه)

اسکارن آهن- مس آغبلاغ در استان آذربایجان غربی (شمال غرب ایران) و در ۲۱ کیلومتری شمال شهرستان اشنویه، بین طول‌های جغرافیایی $37^{\circ} 1' 59''$ تا $45^{\circ} 4' 34''$ و عرض‌های جغرافیایی $37^{\circ} 8' 59''$ تا $37^{\circ} 12' 41''$ واقع است. بر پایه مشاهدات صحرایی در این منطقه، نفوذ توده گرانیته کرتاسه پسین به درون سنگ‌های کربناتی، ماسه‌سنگی و شیلی کامبرین با رخداد پدیده اسکارن‌زایی همراه شده است. در بخش شمالی کمر بند ارومیه-گلپایگان در شمال پهنه ساندج-سیرجان به ذخایر اسکارنی مهمی چون اسکارن مس مزرعه [۱]، مس انجرد [۲]، آهن آستامال [۳]، مس سونگون [۴]،

صحرائی، به منظور بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی، تعداد ۵۰ نمونه مقطع نازک صیقلی تهیه شد. برای تعیین ترکیب و محاسبه فرمول ساختاری، شماری از کانی‌ها (گارنت، پیروکسن و اپیدوت) توسط دستگاه Cameca مدل Sx100 ساخت شرکت فرانسه با ولتاژ ۲۰ کیلو الکترون ولت، جریان ۲۰ نانو آمپر و قطر باریکه ۵ میکرون در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران تجزیه نقطه‌ای شدند.

بحث و بررسی

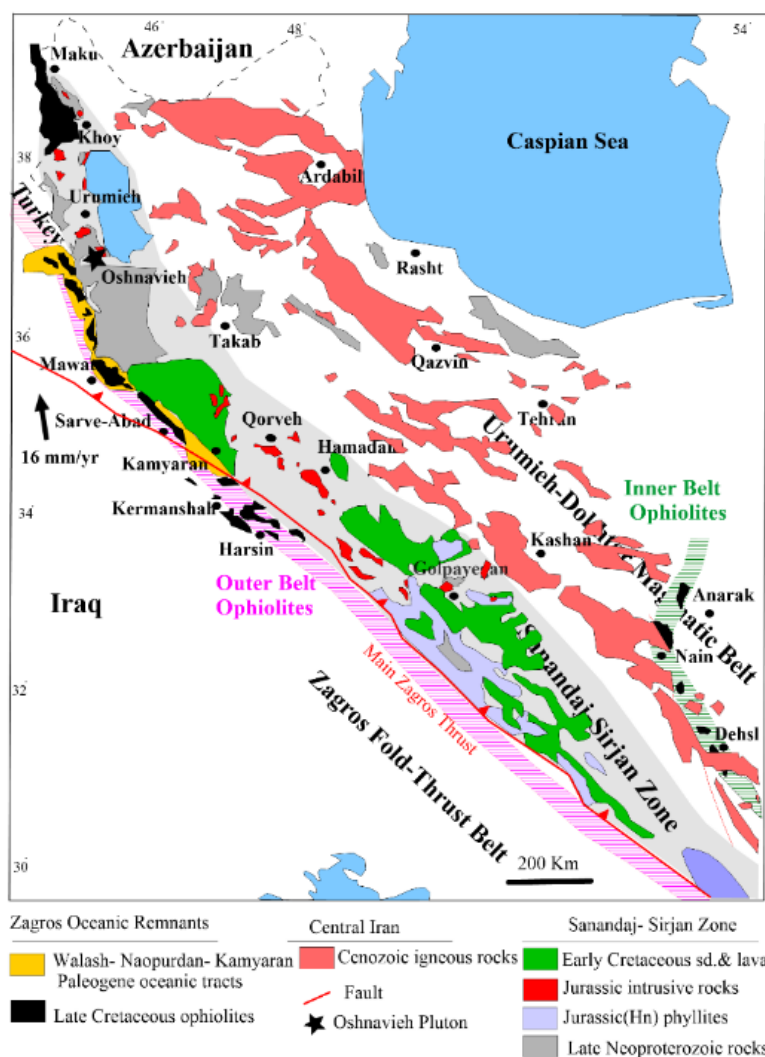
جایگاه زمین‌شناسی

اسکارن آغبالغ در ارتباط با توده نفوذی کرتاسه پسین اشنویه است که از نظر تقسیمات ساختاری ایران در بخش انتهای شمال غربی پهنه سهندج-رسیرجان قرار دارد (شکل ۱) [۸].

پدید آمده‌اند و سپس توده‌های سینیت قلیایی گرانیتی قلیایی با قطع کردن آنها جایگزین شده‌اند. مرحله نخست فعالیت ماگمایی حدود ۱۰۰ میلیون سال پیش و مرحله دوم حدود ۸۰ میلیون سال پیش رخ داده است [۷]. در این پژوهش، کانی‌شناسی، دگرزه‌ادی و کانی‌سازی در مراحل پیشرونده و پسروده فرآیند اسکارنی و شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل اسکارن بررسی شده است.

روش پژوهش

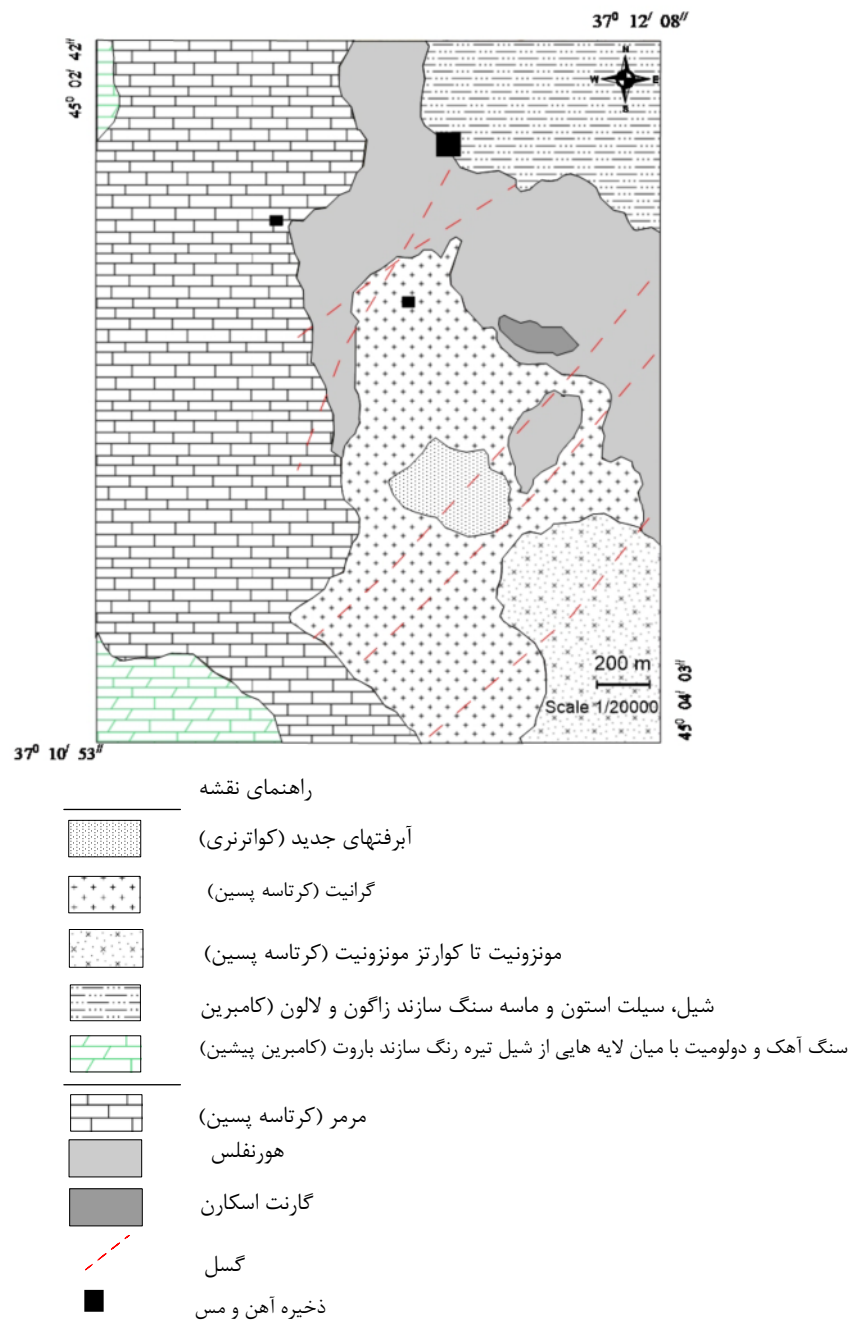
بررسی‌های انجام شده بر اسکارن آغبالغ شامل دو بخش صحرائی و آزمایشگاهی (میکروسکوپی و تجزیه نقطه‌ای) است. بررسی‌های صحرائی شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی منطقه، شناسایی مرز واحدها و نمونه برداری از پهنه‌های اسکارنی برای بررسی‌های آزمایشگاهی است. پس از بررسی‌های دقیق



شکل ۱ نقشه بخشی از پهنه ساختاری ایران (بر گرفته از مرجع [۸] با تغییرات) که در آن جایگاه منطقه آغبالغ با علامت ستاره نشان داده شده است.

(کرتاسه پسین) است (شکل ۲). سنگ کالک، دولومیت با میان‌لایه‌های شیل سازند باروت با بیشترین گسترش عمده‌ترین سنگ‌های رسوبی منطقه مورد بررسی محسوب می‌شوند. بر پایه شواهد صحرایی و بررسی‌های زمین‌شناسی، تزریق توده نفوذی گرانیتی به درون مجموعه رسوبی یاد شده سبب دگرگونی همبری، تشکیل اسکارن و کانی‌سازی آهن و مس در منطقه آغبلاغ شده است.

توده نفوذی یاد شده سبب تشکیل اسکارن‌هایی از جمله ذخایر تنگستن (دوریه) [۹]، اسکارن آهن (گرده گل) [۱۰] و اسکارن آهن-مس آغبلاغ [۱۱] در منطقه اشنویه شده است. واحدهای سنگی منطقه بر پایه بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی و با استناد به نقشه زمین‌شناسی تهیه شده از منطقه [۱۲] (شکل ۲) به ترتیب از قدیم به جدید شامل سازند باروت (کامبرین پیشین)، سازند زاگون-لالون (کامبرین پیشین) و واحدهای نفوذی با ترکیب گرانیت و کوارتزمونزونیت تا مونزودیوریت

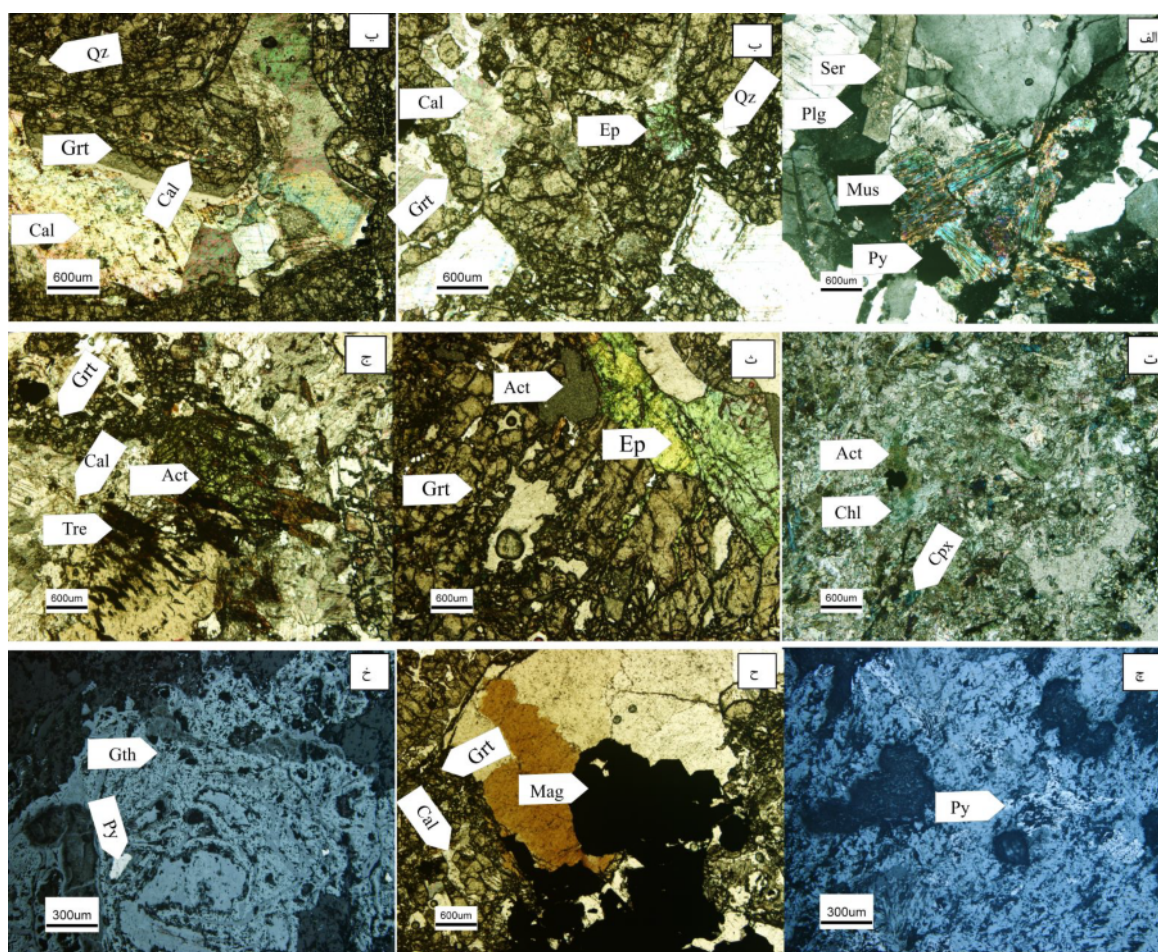


شکل ۲ نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه آغبلاغ اشنویه (برگرفته از مرجع [۱۲] با تغییرات).

سنگ‌نگاری و کانه‌زایی

واحد گرانیته: سنگ‌های این واحد در نمونه دستی به رنگ سفید و دربردارنده بلورهای درشت فلدسپار، کوارتز و مسکوویت با بافت دانه‌ای هستند. در زیر میکروسکوپ، کانی‌های اصلی شامل فلدسپارهای قلیایی، کوارتز، پلاژیوکلاز، هورنبلند و مسکوویت هستند و به طور عمده بافت دانه‌ای نشان می‌دهند. میکروکلین (۲۰ تا ۶۰٪) در اندازه ریز تا متوسط (تا ۲ mm) به صورت بلورهای بی‌شکل و نیمه شکل‌دار با بافت مشبک و پرتیتی در نمونه‌ها دیده می‌شود. کوارتز (۲۰ تا ۴۰٪) در

اندازه ریز تا متوسط (تا ۱ mm) به صورت بلورهای بی‌شکل با خاموشی موجی فضای بین بلورها را پر می‌کند. پلاژیوکلاز در اندازه ریز تا متوسط (تا ۲ mm) به صورت بلورهای بی‌شکل و نیمه شکل‌دار با ماکل چندریخت دیده می‌شود. کانی مسکوویت در اندازه ریز تا درشت (تا ۱۰ mm) به صورت صفحه‌های بی‌شکل حضور دارد (شکل ۳ الف). توده نفوذی به شدت دگرسان شده و کانی‌های میکروکلین و پلاژیوکلاز به رس‌ها، کلریت و سریسیت تبدیل شده‌اند. پیریت مهمترین کانی سولفیدی در این سنگ‌هاست.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های سنگی توده نفوذی و پهنه برون‌اسکارن در منطقه آغبالاغ: (الف) تشکیل سریسیت و کانی‌های رسی در اثر دگرسانی پلاژیوکلاز همراه با مسکوویت و پیریت در توده نفوذی تهیه شده در نور قطبیده متقاطع (xpl)، (ب) گارنت نیمه شکل‌دار ریز بلور همراه با گارنت درشت‌بلور که در اثر دگرسانی پسروده به اپیدوت و کلسیت دگرسان شده‌اند در نور xpl. (پ) گارنت درشت‌بلور با شکستگی‌های فراوان که محل آنها توسط کلسیت و کوارتز پر شده است، در نور xpl، (ت) کانی کلینوپیروکسن که به صورت بخشی یا کامل توسط آکتینولیت و کلریت جانشین شده است، در نور xpl، (ث) اپیدوت و آکتینولیت که جانشین گارنت‌ها شده‌اند، (ج) جانشینی گارنت و کلینوپیروکسن توسط ترمولیت-آکتینولیت، در نور xpl، (چ) حضور پیریت بین کانی‌های کالک سیلیکاتی، در نور قطبیده صفحه‌ای (ppl)، (ح) حضور مگنتیت همراه با گارنت، در نور xpl. (خ) اکسایش پیریت به گوتیت و حضور بقایایی از آن درون گوتیت، در نور ppl. علائم اختصاری کانی‌ها Plg: پلاژیوکلاز، Mus: مسکوویت، Act: آکتینولیت، Chl: کلریت، Mag: مگنتیت، Grt: گارنت، Cpx: کلینوپیروکسن، Py: پیریت، Gth: گوتیت، Qz: کوارتز، Cal: کلسیت، Tre: ترمولیت، Ser: سریسیت، (برگرفته از مرجع [۱۳]) هستند.

واحد اسکارن: سنگ‌های کربناتی ناخالص سازند باروت و ماسه-سنگ و شیل سازند زاگون سنگ‌های مادر هاله اسکارنی به شمار می‌آیند. این سنگ‌ها در اثر جایگیری گرانیته، به سنگ‌های کالک‌سیلیکاتی و مرمر تبدیل شده‌اند. بر پایه بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری در این منطقه، پهنه درون‌اسکارن دیده نشد و اسکارن اصلی پهنه برون‌اسکارن است. گارنت و پیروکسن از جمله کانی‌های مرحله پیشرونده و اپیدوت، آکتینولیت، ترمولیت، کلریت، کلسیت و کوارتز از کانی‌های مرحله پسرونده هستند. بر پایه چیرگی کانی‌های موجود در مقاطع میکروسکوپی و همبریه‌های شاخص، سنگ‌های برون‌اسکارن را می‌توان به دو دسته گارنت اسکارن و پیروکسن-گارنت اسکارن تقسیم نمود. نتایج سنگ‌نگاری کانی‌های پهنه برون‌اسکارنی در زیر بیان شده است:

گارنت: بر پایه مشاهدات سنگ‌نگاری، گارنت کانی غالب پهنه برون‌اسکارن است که بیش از ۷۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد. بر اساس ویژگی‌های نوری، دو نوع گارنت قابل تشخیص است نوع نخست در اندازه‌های ریز (تا ۱ میلی‌متر) به صورت بلورهای نیمه شکل‌دار و شکل‌دار با بافت توده‌ای و همسانگرد دیده می‌شود. این نوع گارنت‌ها به شدت دگرسان شده و توسط کانی‌هایی چون اپیدوت، آکتینولیت، مگنتیت، کلسیت و کوارتز طی مراحل بعدی فرآیند تکاملی اسکارنی جانشین شده‌اند (شکل ۳ ب). گارنت نوع دوم درشت بلور است (تا ۱ سانتی‌متر) و به صورت بلورهای نیمه شکل‌دار با شکستگی‌های فراوان دیده می‌شود. این نوع گارنت‌ها توسط کلسیت، کوارتز و اپیدوت پر شده‌اند (شکل ۳ پ).

پیروکسن: کانی پیروکسن به عنوان کانی سیلیکاتی بدون آب در مراحل اولیه فرآیند تکاملی اسکارن (مرحله پیشرونده) تشکیل شده و اغلب توسط گارنت همراهی می‌شود. بر پایه ویژگی‌های نوری، پیروکسن‌ها از نوع کلینوپیروکسن هستند و در اندازه‌های ریز بلور نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل دیده می‌شوند. اغلب پیروکسن‌ها به شدت دگرسان شده و توسط ترمولیت-آکتینولیت و کلریت جانشین شده‌اند (شکل ۳ ت). کلینوپیروکسن‌های سالم به صورت پراکنده و در یک زمینه کلسیتی دیده می‌شوند.

اپیدوت: کانی اپیدوت پس از گارنت و پیروکسن فراوان‌ترین کانی پهنه اسکارنی است. این کانی در اندازه‌های متوسط تا

درشت به صورت بی‌شکل و تخته‌ای قابل مشاهده بوده و اغلب گارنت‌ها را جانشین کرده است (شکل‌های ۳ ب و ث).
ترمولیت-آکتینولیت: این کانی در اندازه ریز تا متوسط و به صورت بلورهای دسته جارویی و رشته‌ای به رنگ‌های قهوه‌ای (ترمولیت) و سبز (آکتینولیت) که جانشین کلینوپیروکسن‌ها شده‌اند، دیده می‌شود (شکل ۳ ج).

کلریت: این کانی فرعی به صورت پولک‌های ریز و بی‌شکل طی مراحل پایانی فرآیند تکاملی اسکارن از دگرسانی اپیدوت و ترمولیت-آکتینولیت شکل گرفته است (شکل ۳ ت).

کلسیت: این کانی در اندازه ریز تا متوسط و به صورت بلورهای نیمه شکل‌دار و شکل‌دار با بافت موزائیکی، پرکننده فضاهای خالی و یا جانشینی با رخ لوزوجهی دیده می‌شود. کلسیت به صورت اولیه همراه با کانی گارنت و یا در اثر دگرسانی بعدی این کانی تشکیل شده است (شکل‌های ۳ ب و پ).

کوارتز: این کانی در اندازه ریز و به صورت بلورهای بی‌شکل با خاموشی موجی دیده می‌شود. کوارتز هم به صورت اولیه و هم به صورت ثانویه در اثر دگرسانی پسرونده کانی‌های کالک سیلیکاتی بدون آب (گارنت و پیروکسن) شکل گرفته و اغلب فضای شکستگی‌ها را پر کرده است (شکل‌های ۳ ب و پ).

کانی‌های فلزی: پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت مهم‌ترین کانی‌های تیره در اسکارن اغبالغ هستند. پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی است و در اندازه‌های ریز تا متوسط به صورت بلورهای شکل‌دار و نیمه شکل‌دار دیده می‌شود و اغلب توسط کالکوپیریت جانشین شده است (شکل ۳ ج). مگنتیت در اندازه‌های ریز تا متوسط نیمه شکل و بی‌شکل به صورت رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی دیده می‌شود که فرآورده دگرسانی گارنت‌هاست (شکل ۳ ح). هماتیت در اثر مارتیتی-شدن مگنتیت تشکیل شده است. کالکوپیریت در اندازه ریز و به صورت بلورهای بی‌شکل بلورهای پیریت را جانشین کرده است. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در اثر فرآیندهای هوازدگی سولفیدهای آهن شکل گرفته‌اند، به طوریکه در پهنه برون‌زاد، برخی از پیریت‌ها به طور کامل توسط گوتیت جانشین شده و گاهی ذراتی از پیریت هنوز در گوتیت دیده می‌شوند (شکل ۳ خ). توالی همبریهی این کانی‌ها بر اساس مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی و با در نظر گرفتن روابط بافتی بین کانی‌های سازنده اسکارن اغبالغ، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ روابط همبستگی کانی‌های روشن و تیره در اسکارن آغللاغ.

سیلیکاتهای متاسوماتیک، سولفیدها، اکسیدها و کربناتها		کاهش سن			
		پیشرونده		پسرونده	
		مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۱	مرحله ۲
سیلیکاتها	گارنت				
	پیروکسن				
	آمفیبول				
	اپیدوت				
	کلریت				
کوارتز					
سولفیدها	سست				
	کالکوپیریت				
اکسیدها	مگنتیت				
	هماتیت				
	گوتیت				
کربنات					
	کلسیت				

پیروکسن: نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی نشان می‌دهد که پیروکسن در گستره ترکیبی $aHd_{0.29-0.42}$, $aDi_{0.56-0.65}$ قرار دارد (جدول ۳). کانی‌های پیروکسن نیز مانند گارنت منطقه‌بندی ندارند و تغییرات نوسانی نشان نمی‌دهند [۱۵] (شکل‌های ۵ و ۶). پیروکسن‌های اسکارن آغللاغ از نوع سالت بوده و از نظر ترکیب شیمیایی در سری محلول جامد دیوپسید-هیدنبرژیت قرار دارند (شکل ۶) [۱۶]. نتایج عنصرسنجی آن به صورت زیر است:

$Al_{(0.07-6.38)}Ca_{(16.51-21.2)}Mn_{(1.28-2.9)}Si_{(16.92-24.26)}$
 $Ti_{(0-0.08)}Fe_{(8.24-12.75)}Mg_{(0.06-6.25)}Na_{(0-0.01)}P_{(0-0.01)}$ (۲)
 کلینوپيروکسن‌های ذخیره آغللاغ دارای مقدار بالایی از نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ و مقادیر کمی از TiO_2 , MnO و Cr_2O_3 هستند. جانشینی Fe و Mg به وسیله Mn معمول است، زیرا دیوپسید-هیدنبرژیت-ژوهانسینیت تشکیل محلول جامد می‌دهند. مقدار Mn در پیروکسن با رابطه Fe/Mg نسبت مستقیم دارد و با افزایش Mn این نسبت نیز افزایش می‌یابد [۱۷].

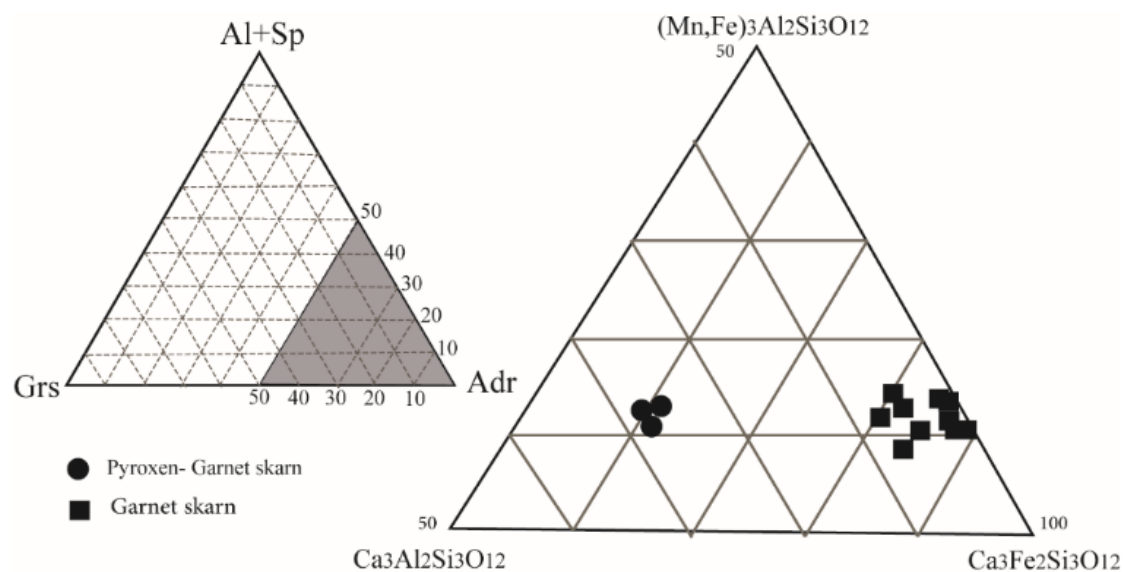
شیمی کانی‌ها: در این بخش شیمی کانی، سه کانی گارنت، پیروکسن و اپیدوت که از مهم‌ترین و فراوان‌ترین کانی‌های موجود در اسکارن آغللاغ هستند بررسی شده است.

گارنت: نتایج ریزکاوالکترونی (جدول ۲) گارنت‌های موجود در پهنه گارنت-اسکارن گستره ترکیبی $Gr_{0.05-6.8} Alm_{5.6-10.7}$ و در پهنه پیروکسن-گارنت اسکارن، گستره ترکیبی $Adr_{81.97-89.1} Alm_{5.1-7.5} Gr_{25.4-27.2}$ را نشان می‌دهند. ترکیب شیمیایی گارنت‌ها از نوع محلول جامد (آندرادیت-گروسولار) و به طور غالب آندرادیت است (شکل ۴) [۱۴]. بخش عمده بلورهای گارنت در تصویرهای الکترونی پس پراکنده (BSE) همسانگرد و بدون منطقه‌بندی هستند. فقط تغییرات بسیار کمی در ترکیب گارنت دیده می‌شود که این تغییرات می‌توانند ناشی از تغییرات جزئی در ترکیب سیال‌های کانه ساز باشند (شکل‌های ۵ الف، ب و پ). عنصرسنجی این گارنت‌ها به صورت زیر است:

$Al_{(0.01-3.42)}Ca_{(22.07-22.83)}Mn_{(0.7-1.91)}Si_{(17.28-18.12)}$
 $Ti_{(0-0.15)}Fe_{(17.28-21.56)}Mg_{(0-0.05)}Na_{(0-0.06)}P_{(0-0.02)}$ (۱)

جدول ۲ نتایج تجزیه ریزکوالکترونی کانی گارنت از پهنه‌های گارنت اسکارن و پیروکسن-گارنت در اسکارن آغبلاغ. مقادیر آهن سه ظرفیتی بر اساس روش مرجع [۱۴] محاسبه شده است.

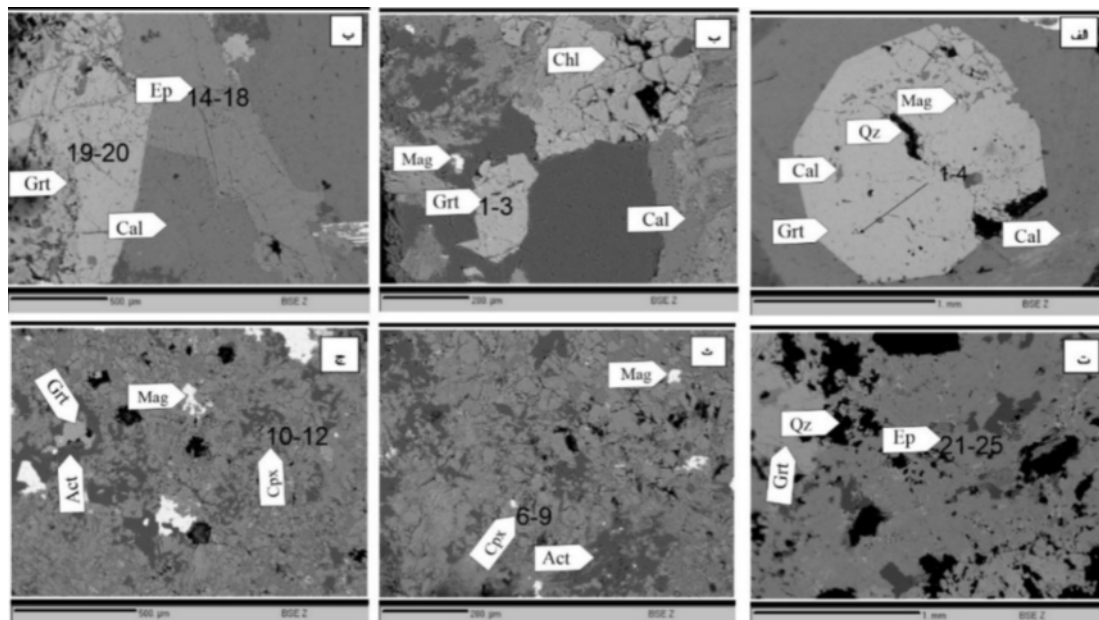
پهنه گارنت اسکارن														پهنه پیروکسن-گارنت اسکارن
N1-B-1		N1-B-2		N1-B-3		N1-B-4		N1-B-5		N11-A				
نمونه														
	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز	لبه
اکسیدهای اصلی (Wt%)														
SiO ₂	۳۷٫۵۶	۳۸٫۲۴	۳۸٫۶۵	۳۸٫۶۵	۳۸٫۷۷	۳۷٫۷۶	۳۷٫۹۲	۳۷٫۸۷	۳۸٫۵۶	۳۷٫۹۵	۳۷٫۶۲	۳۸٫۷۳	۳۶٫۹۶	۳۷٫۴۲
TiO ₂	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۲۰	۰٫۲۵
Al ₂ O ₃	۰٫۸۶	۰٫۹۰	۰٫۸۸	۰٫۱۶	۰٫۱۲	۰٫۱۵	۰٫۱۳	۰٫۱۵	۰٫۱۶	۰٫۰۱	۱٫۳۷	۱٫۲۱	۶٫۴۶	۵٫۷۱
FeO	۲۶٫۸۴	۲۷٫۵۲	۲۶٫۵۴	۲۷٫۶۴	۲۶٫۵۹	۲۷٫۷۴	۲۷٫۶۰	۲۷٫۶۲	۲۶٫۸۰	۲۷٫۲۸	۲۶٫۶۰	۲۵٫۸۶	۲۳٫۳۴	۲۳٫۱۷
MnO	۱٫۴۲	۱٫۲۱	۰٫۹۴	۰٫۹۷	۱٫۰۰	۰٫۹۸	۰٫۹۱	۱٫۰۰	۰٫۹۰	۱٫۳۰	۱٫۰۳	۱٫۰۰	۲٫۰۵	۱٫۸۳
MgO	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۸
CaO	۳۱٫۶۵	۳۰٫۹۲	۳۱٫۴۷	۳۱٫۴۱	۳۱٫۷۶	۳۱٫۵۰	۳۱٫۷۳	۳۱٫۶۹	۳۱٫۹۴	۳۱٫۵۹	۳۲٫۲۶	۳۲٫۰۴	۳۰٫۹۸	۳۰٫۸۸
مجموع	۹۸٫۴۱	۹۸٫۸۵	۹۸٫۵۰	۹۸٫۸۱	۹۸٫۳۴	۹۸٫۱۶	۹۸٫۳۱	۹۸٫۳۷	۹۸٫۳۷	۹۸٫۱۶	۹۸٫۹۲	۹۸٫۸۵	۱۰۰٫۰۴	۹۹٫۳۴
تعداد یونها محاسبه شده بر پایه ۱۲ اتم اکسیژن و عضو پایانی گارنت														
Si	۳٫۱۲	۳٫۱۷	۳٫۲۱	۳٫۲۰	۳٫۲۳	۳٫۱۵	۳٫۱۶	۳٫۱۶	۳٫۲۱	۳٫۱۷	۳٫۱۰	۳٫۲۰	۲٫۹۸	۳٫۰۴
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۲
Al	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۶۱	۰٫۵۵
Cr	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ³⁺	۱٫۶۷	۱٫۵۷	۱٫۵۰	۱٫۵۸	۱٫۵۳	۱٫۶۸	۱٫۶۶	۱٫۶۷	۱٫۵۷	۱٫۶۶	۱٫۶۶	۱٫۴۹	۱٫۴۰	۱٫۳۴
Fe ²⁺	۰٫۲۰	۰٫۳۴	۰٫۳۴	۰٫۳۴	۰٫۳۲	۰٫۲۶	۰٫۲۶	۰٫۲۵	۰٫۳۰	۰٫۲۵	۰٫۱۸	۰٫۲۹	۰٫۱۷	۰٫۲۳
Mn	۰٫۱۰	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۱۴	۰٫۱۳
Mg	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Ca	۲٫۸۲	۲٫۷۵	۲٫۸۰	۲٫۷۹	۲٫۸۳	۲٫۸۲	۲٫۸۳	۲٫۸۳	۲٫۸۵	۲٫۸۳	۲٫۸۵	۲٫۸۳	۲٫۶۸	۲٫۶۹
OH	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰
آلماندین	۶٫۴۳	۱۰٫۶۸	۱۰٫۷۳	۱۰٫۴۹	۹٫۹۴	۸٫۳۰	۸٫۳۵	۸٫۰۰	۹٫۲۳	۷٫۷۹	۵٫۶۴	۹٫۱۴	۵٫۶۷	۷٫۵۸
اسپسارتین	۳٫۲۰	۲٫۶۸	۲٫۰۶	۲٫۱۳	۲٫۱۸	۲٫۲۰	۲٫۰۳	۲٫۲۴	۱٫۹۸	۲٫۹۰	۲٫۳۲	۲٫۱۹	۴٫۶۸	۴٫۱۲
پیروپ	۰٫۱۶	۰٫۰۸	۰٫۰۰	۰٫۱۵	۰٫۱۹	۰٫۱۲	۰٫۰۰	۰٫۱۲	۰٫۰۴	۰٫۱۲	۰٫۱۶	۰٫۰۴	۰٫۲۰	۰٫۳۲
گروسولار	۴٫۳۵	۴٫۵۹	۴٫۷۴	۰٫۸۵	۰٫۶۷	۰٫۷۸	۰٫۶۸	۰٫۷۸	۰٫۸۸	۰٫۰۵	۶٫۸۲	۶٫۴۸	۲۷٫۲۱	۲۵٫۴۶
آندرادیت	۸۵٫۸۷	۸۱٫۹۷	۸۲٫۴۷	۸۶٫۳۷	۸۷٫۰۲	۸۸٫۶۰	۸۸٫۹۴	۸۸٫۸۶	۸۷٫۸۷	۸۹٫۱۴	۸۵٫۰۵	۸۲٫۱۶	۶۲٫۲۳	۶۲٫۵۲
آواریت	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰



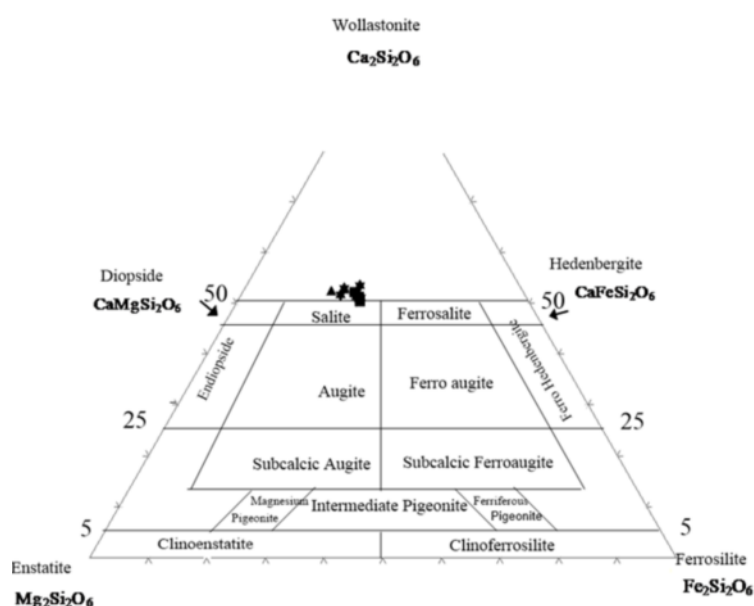
شکل ۴ جایگاه کانی‌های گارنت اسکارن آغبلاغ بر نمودارهای مثلثی آندرادیت-گروسولار-آلماندین + اسپسارتین [۱۴].

جدول ۳ نتایج تجزیه ریز کاوالکترونی کانی پیروکسن از پهنه پیروکسن-گارنت اسکارن کانسار آغبالغ.

نمونه	N11-A-1			N11-A-2			N11-A-3			
	مرکز		لبه	مرکز		لبه	مرکز			لبه
SiO ₂ (Wt%)	۵۱٫۹	۵۰٫۶۷	۵۱٫۳۴	۵۰٫۸۳	۵۱٫۴۴	۵۱٫۶۵	۵۱٫۰۹	۵۱٫۷۳	۵۱٫۷۳	۴۹٫۹۵
TiO ₂	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۴
Al ₂ O ₃	۰٫۵۳	۰٫۸	۰٫۳۷	۰٫۱۷	۰٫۴۱	۰٫۴۵	۰٫۴	۰٫۱۹	۰٫۱۳	۰٫۹۲
FeO	۱۲٫۳	۱۴٫۶۱	۱۲٫۷۶	۱۱٫۷۷	۱۲٫۷۶	۱۲٫۴۹	۱۳٫۰۲	۱۱٫۹	۱۰٫۶	۱۳٫۸۶
MnO	۲٫۰۷	۲٫۱۲	۲٫۱۶	۲٫۳	۲٫۱	۲٫۱۱	۲٫۰۲	۲٫۱۸	۲٫۱۲	۱٫۶۵
MgO	۹٫۵	۹٫۲۴	۹٫۳۲	۱۰٫۵۹	۹٫۹۷	۹٫۵	۹٫۲۷	۱۰٫۳۷	۹٫۹۹	۸٫۷۳
CaO	۲۳٫۱	۲۳٫۲	۲۳٫۳۹	۲۳٫۴۸	۲۳٫۸۸	۲۳٫۴۱	۲۳٫۱۹	۲۳٫۷۷	۲۴٫۴	۲۳٫۹
K ₂ O	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱
مجموع	۹۹٫۶۵	۱۰۰٫۹۵	۹۹٫۵۳	۹۹٫۳۱	۱۰۰٫۷۸	۹۹٫۸۵	۹۹٫۱۵	۱۰۰٫۳۱	۹۹٫۱۲	۹۹٫۲۴
تعداد یونهای محاسبه شده بر پایه ۶ اتم اکسیژن و عضو یانی کلینوپروکسن										
Si	۱٫۹۹۷	۱٫۹۳۳	۱٫۹۸۳	۱٫۹۵۳	۱٫۹۵۵	۱٫۹۸۴	۱٫۹۸۱	۱٫۹۷۰	۱٫۹۹۳	۱٫۹۳۹
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰۱
Al	۰٫۰۲۴	۰٫۰۳۶	۰٫۰۱۷	۰٫۰۰۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۲۰	۰٫۰۱۸	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۶	۰٫۰۴۲
Fe ³⁺	۰٫۰۰۱	۰٫۱۲۱	۰٫۰۲۹	۰٫۰۹۷	۰٫۰۸۷	۰٫۰۲۹	۰٫۰۳۱	۰٫۰۶۳	۰٫۰۱۸	۰٫۰۹۱
Fe ²⁺	۰٫۳۹۵	۰٫۳۴۵	۰٫۳۸۳	۰٫۳۸۱	۰٫۳۱۸	۰٫۳۷۲	۰٫۳۹۱	۰٫۳۱۶	۰٫۳۳۲	۰٫۳۵۹
Mn	۰٫۰۶۷	۰٫۰۶۸	۰٫۰۷۱	۰٫۰۷۵	۰٫۰۶۸	۰٫۰۶۹	۰٫۰۶۶	۰٫۰۷۰	۰٫۰۶۹	۰٫۰۵۴
Mg	۰٫۵۴۵	۰٫۵۲۵	۰٫۵۳۷	۰٫۶۰۷	۰٫۵۶۵	۰٫۵۴۴	۰٫۵۳۶	۰٫۵۸۹	۰٫۵۷۴	۰٫۵۰۵
Ca	۰٫۰۹۵	۰٫۹۴۸	۰٫۹۶۸	۰٫۹۶۷	۰٫۹۷۲	۰٫۹۶۴	۰٫۹۶۴	۰٫۹۷۰	۱٫۰۰۷	۰٫۹۹۴
Na	۰٫۰۱۹	۰٫۰۲۳	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۵	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۳	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱۴
K	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰
مجموع	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰
یشم سبز	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰۳
دیوسید	۰٫۵۸۵	۰٫۵۷۴	۰٫۵۷۵	۰٫۶۴۶	۰٫۶۲۳	۰٫۵۹۶	۰٫۵۶۷	۰٫۶۳۴	۰٫۶۵۱	۰٫۵۷۷
هیدنرژیت	۰٫۴۲۳	۰٫۳۷۶	۰٫۴۱۰	۰٫۲۹۹	۰٫۳۵۰	۰٫۴۰۷	۰٫۴۱۳	۰٫۳۴۰	۰٫۳۶۷	۰٫۴۰۹
ویزتونیت	۰٫۵۰۳	۰٫۵۲۱	۰٫۵۱۳	۰٫۵۲۱	۰٫۵۲۴	۰٫۵۱۳	۰٫۵۱۰	۰٫۵۱۷	۰٫۵۲۹	۰٫۵۳۵
انستاتیت	۰٫۲۸۸	۰٫۲۸۹	۰٫۲۸۴	۰٫۳۲۷	۰٫۳۰۴	۰٫۲۸۹	۰٫۲۸۳	۰٫۳۱۴	۰٫۳۰۱	۰٫۲۷۲
فروسلیت	۰٫۲۰۹	۰٫۱۹۰	۰٫۲۰۳	۰٫۱۵۲	۰٫۱۷۱	۰٫۱۹۸	۰٫۲۰۷	۰٫۱۶۹	۰٫۱۷۰	۰٫۱۹۳



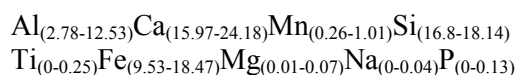
شکل ۵ تصاویر BSE تهیه شده توسط ریزکاوالکترونی از نمونه‌های اسکارنی در پهنه‌های گارنت اسکارن و پیروکسن-گارنت اسکارن در منطقه آغبالغ. (الف) گارنت بدون منطقه‌بندی همراه با کلسیت، کوارتز و مگنتیت در پهنه گارنت اسکارن، (ب) گارنت بدون منطقه‌بندی همراه با کلریت و کلسیت در پهنه پیروکسن-گارنت اسکارن، (پ) گارنت بدون منطقه‌بندی همراه با اپیدوت و کلسیت در پهنه گارنت اسکارن، (ت) گارنت همراه با اپیدوت و کوارتز در پهنه گارنت اسکارن، (ث) کلینوپروکسن همراه با آکتینولیت و مگنتیت در پهنه پیروکسن-گارنت اسکارن و (ج) کلینوپروکسن همراه با گارنت، مگنتیت و آکتینولیت که جانشینی مگنتیت به جای پیروکسن دیده می‌شود. اعداد روی تصاویر نقاط اندازه‌گیری شده توسط ریز کاوالکترونی است. علائم اختصاری کانی‌ها Chl: کلریت، Grt: گارنت، Mag: مگنتیت، Ep: اپیدوت، Qz: کوارتز، Cal: کلسیت، Cpx: کلینوپروکسن (برگرفته از مرجع [۱۳] هستند).



شکل ۶ جایگاه کانی‌های پیروکسن اسکارن آغبلاغ بر نمودار مثلثی ولاستونیت- فروسیلایت- انستاتیت [۱۵].

تصاویر BSE اپیدوت (شکل‌های ۵ پ و ت) نشان می‌دهند که اپیدوت‌ها بدون منطقه‌بندی هستند. برای تعیین سری محلول جامد اپیدوت $[Ca_2Al_2Fe^{3+}Si_3O_{12}(OH)]$ از رابطه $Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Al + Cr^{3+} - 2)$ و برای عضو پایانی غنی از Al کلینوزوئیزیت $[Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)]$ از رابطه $(Al-2)/(Fe^{3+} + Al + Cr^{3+} - 2)$ استفاده شد [۱۹]. اپیدوت‌های ذخیره اسکارن آغبلاغ به طور غالب از نوع اپیدوت $[Ca_2Al_2Fe^{3+}Si_3O_{12}(OH)]$ هستند.

اپیدوت: اپیدوت از جمله کانی‌های کالک‌سیلیکاتی آبدار است که اغلب به همراه کلریت و آمفیبول جانشین کانی‌های سیلیکاتی بدون آب (گارنت و پیروکسن) می‌شود [۱۸]. نتایج تجزیه ریز کالوالکترونی اپیدوت نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این نتایج، اپیدوت مقادیر بالایی از Al و Ca دارد. نتایج عنصرسنجی اپیدوت به صورت زیر است:



جدول ۴ نتایج تجزیه ریزکالوالکترونی کانی اپیدوت ذخیره آغبلاغ.

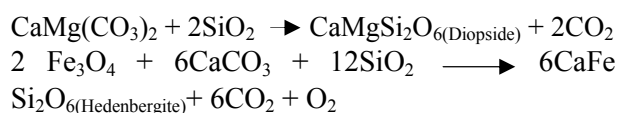
نمونه	N1-B					N10-C				
	مرکز				لبه	مرکز				لبه
SiO ₂ (Wt%)	۳۸.۸۱	۳۸.۷۷	۳۸.۶۵	۳۸.۵۶	۳۸.۶۳	۳۷.۸۸	۳۸.۱۸	۳۸.۰۰	۳۷.۶۱	۳۷.۶۶
TiO ₂	۰.۰۴	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۷	۰.۴۲	۰.۴۲	۰.۱۸	۰.۳۹
Al ₂ O ₃	۲۲.۶۷	۲۲.۳۱	۲۲.۲۲	۲۱.۸۹	۲۳.۶۸	۲۲.۳۸	۲۱.۹۱	۲۲.۶۱	۲۲.۰۰	۲۲.۵۷
FeO	۱۳.۷۱	۱۳.۲۶	۱۳.۵۹	۱۳.۷۱	۱۳.۲۸	۱۴.۳۵	۱۴.۵۵	۱۳.۶۹	۱۴.۳۸	۱۴.۲۶
MnO	۰.۳۶	۰.۹۴	۰.۹۸	۰.۳۴	۰.۵۶	۰.۵۴	۰.۳۴	۰.۴۵	۱.۱۸	۰.۵۳
MgO	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۶	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۴	۰.۰۶	۰.۰۷	۰.۱۲
CaO	۲۳.۶۴	۲۳.۰۸	۲۲.۸۴	۲۳.۷۷	۲۳.۳۴	۲۳.۵۴	۲۳.۲۲	۲۳.۳۹	۲۲.۹۶	۲۲.۸۵
Na ₂ O	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۰۶	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۰۵
K ₂ O	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱
مجموع	۹۹.۲۴	۹۸.۴۱	۹۸.۴۷	۹۸.۳۳	۹۸.۵۸	۹۸.۷۹	۹۸.۶۶	۹۸.۶۲	۹۸.۴۱	۹۸.۴۳
تعداد یونها بر پایه ۱۲.۵ اتم اکسیژن										
Si	۳.۰۲۱	۳.۰۳۴	۳.۰۲۴	۳.۰۳۴	۳.۰۱۳	۲.۹۷۵	۲.۹۹۸	۲.۹۸۲	۲.۹۷۳	۲.۹۶۳
Ti	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰۴	۰.۰۲۵	۰.۰۲۵	۰.۰۱۱	۰.۰۲۳
Al	۲.۰۷۹	۲.۱۵۰	۲.۱۵۱	۲.۰۳۰	۲.۱۷۶	۲.۰۷۲	۲.۰۲۷	۲.۰۹۱	۲.۰۴۹	۲.۰۹۳
Fe ³⁺	۰.۸۹۲	۰.۸۰۲	۰.۸۲۴	۰.۹۰۲	۰.۸۶۶	۰.۹۴۳	۰.۹۵۵	۰.۸۹۸	۰.۹۵۰	۰.۹۳۸
Mn	۰.۰۲۴	۰.۰۶۲	۰.۰۶۵	۰.۰۲۳	۰.۰۳۷	۰.۰۳۶	۰.۰۲۳	۰.۰۳۰	۰.۰۷۹	۰.۰۳۵
Mg	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۷	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۴	۰.۰۰۵	۰.۰۰۷	۰.۰۰۸	۰.۰۱۴
Ca	۱.۹۷۱	۱.۹۳۵	۱.۹۱۵	۲.۰۰۴	۱.۸۶۷	۱.۹۸۱	۱.۹۵۳	۱.۹۶۶	۱.۹۴۴	۱.۹۲۷
Na	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۵	۰.۰۰۹	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰۵	۰.۰۰۸
K	۰.۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱
اپیدوت	۱.۰۷۹	۱.۱۵	۱.۱۵۱	۱.۰۳	۱.۱۷۶	۱.۰۷۲	۱.۰۲۷	۱.۰۹۱	۱.۰۴۹	۱.۰۹۳
کلینوزوئیزیت	-۰.۰۸۴	-۰.۱۹۳	-۰.۱۲۵	-۰.۱۵۷	۰.۰۴۲۵	۰.۰۲۳	-۰.۰۴۰	-۰.۰۴۵	-۰.۰۰۷	۰.۰۵۳۸

بحث

فرآیند اسکارن زایی

شواهد صحرایی و نتایج سنگ‌نگاری نشان می‌دهند که پهنه‌های اسکارنی منطقه مورد بررسی از نوع اسکارن کلسیمی هستند [۱۷]. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی و بافتی، فرآیند اسکارن‌زایی در منطقه آغل‌بلاغ را می‌توان به دو مرحله اصلی تقسیم کرد:

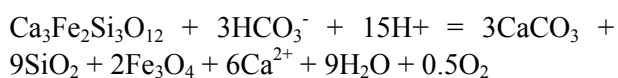
مرحله پیش‌رونده: این مرحله همزمان با جایگیری توده نفوذی گرانیتی در واحدهای شیل و ماسه سنگ سازند زاگون ولالون و نیز سنگ‌های کربناتی سازند باروت موجود در منطقه مورد بررسی آغاز می‌شود. در این مرحله، در اثر شار گرمایی برآمده از توده نفوذی به درون سنگ‌های میزبان، دگرگونی ایزوشیمیایی در سنگ‌های در برگیرنده رخ داده و سبب گسترش واحدهای مرمر و سیلیکات کلسیم - هورنفلس شده است؛ البته تعیین مرز دقیق هورنفلس و اسکارن از هم در محل مشکل است. در این مرحله، جز خروج مواد انتقال مواد فرآر از سنگ‌های میزبان، (عناصر) صورت نگرفته که باعث دگرگونی، تقریباً ایزوشیمیایی در این سنگ‌ها شده است. در واکنش‌های دگرگونی فقط اجزای فرار سنگ چون O_2 ، CO_2 و H_2O قدری تغییر کرده‌اند. هیچ نوع کانی‌سازی اکسیدی و سولفیدی در این مرحله انجام نشده است. فرآیند دگرنهادی و تشکیل اسکارن با شروع تبلور ماگمای نفوذی و آزاد شدن سیال‌های آبگون ماگمایی صورت گرفته و سبب گسترش پهنه‌های اگزواسکارن در سنگ‌های رسوبی (کالک، شیل و ماسه سنگ) شده است. تشکیل این مرحله در ذخیره آغل‌بلاغ با کانی‌های به نسبت درشت گارنت و پیروکسن کلسیم و آهن‌دار مشخص می‌شود. پیروکسن‌ها (دیوپسید و هدنبرژیت) طی این مرحله از طریق واکنش کربن‌زدایی بین سنگ کالک و یا دولومیت و سیال‌های گرمایی بر پایه واکنش‌های زیر تشکیل شده‌اند [۱۸].



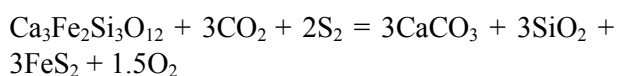
مرحله پس‌رونده: طی این مرحله، کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بدون آب (پیروکسن و گارنت) توسط سیال‌های گرمایی به نسبت دما پایین به کانی‌های کالک‌سیلیکاتی آبدار (اپیدوت و ترمولیت-اکتینولیت) و سیلیکاتی (کوارتز و کلریت) و غیر

سیلیکاتی تیره (سولفیدها و اکسیدها) دگرسان شده‌اند. نهشت کانی‌های تیره (مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت) بیشتر با شکستگی‌ها کنترل شده است. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی و بافتی، این مرحله را می‌توان به دو زیر مرحله نیز تقسیم کرد:

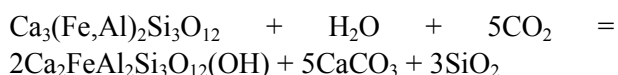
الف) زیر مرحله پس‌رونده آغازین: طی این مرحله، در اثر دگرسانی کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بدون آب تشکیل شده در مرحله پیش‌رونده، کانی‌های کالک‌سیلیکاتی آبدار، سولفیدها (پیریت و کالکوپیریت)، اکسیدها (مگنتیت و هماتیت)، کوارتز و کربنات (کلسیت) در راستای شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند. تشکیل کانی مگنتیت طی این مرحله می‌تواند در اثر واکنش شیمیایی زیر صورت گرفته باشد [۲۰]:



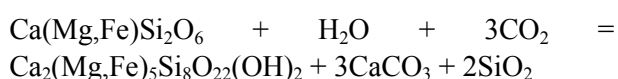
حضور کانی‌های پیریت-کلسیت-کوارتز همراه با گارنت می‌تواند از طریق سولفیدشدگی و کربن‌گیری گارنت در اثر واکنش شیمیایی زیر صورت گرفته باشد [۲۰]:



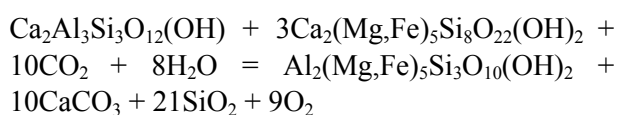
کانی اپیدوت نیز توسط سیال‌های گرمایی به نسبت دما پایین غنی از CO_2 از دگرسانی گارنت‌ها طی واکنش زیر تشکیل می‌شود [۲۱]:



آکتینولیت نیز از دگرسانی کلینوپیروکسن‌ها بر اثر واکنش زیر شکل گرفته است [۲۲]:



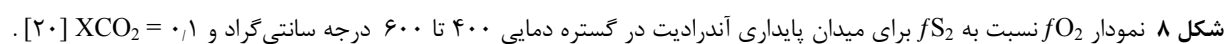
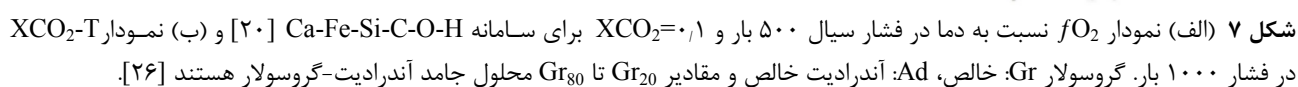
ب) زیر مرحله پس‌رونده تأخیری: در این مرحله کالک سیلیکات‌های آبدار و بدون آب تشکیل شده در مراحل پیشین اسکارن‌زایی توسط سیال‌های دما پایین دگرسان شده و مجموعه کانی‌های ریزدانه مثل کلریت، کلسیت و کوارتز حاصل شده‌اند. تشکیل این مجموعه کانیایی از دگرسانی اپیدوت و ترمولیت-آکتینولیت برپایه واکنش زیر صورت گرفته است [۲۳]:



شرایط فیزیکوشیمیایی فرایندهای اسکارن‌زائی در ذخیره آغبالغ

بر پایه بررسی‌های میکروسکوپی و تجزیه ریزکوالکترونی، اسکارن آغبالغ دارای مجموعه کانی‌های سیلیکاتی مثل کلینوپیروکسن، گارنت، ترمولیت، آکتینولیت، کلریت و اپیدوت است. پایداری این کانی‌ها به شرایط شیمیایی (ترکیب توده نفوذی و سیال کانه‌دار) و فیزیکی (دما و فشار) محیط نهشت بستگی دارد. گارنت با ترکیب غالب آندرادیت بویژه در اسکارن کلسیمی نشان دهنده وجود شرایط اکسایشی و سیال‌های غنی از CaO و FeO است [۲۴]. مقدار بالای آندرادیت (Fe^{3+}) و مقدار پایین‌تر (Mn^{2+}) اسپسارتین در گارنت منطقه مورد بررسی نشان دهنده اسکارن اکسایشی است [۲۵]. افزایش گریزندگی اکسیژن، $f\text{O}_2$ و محلول‌های با شوری بالا شرایط را برای افزایش عضو پایانی آندرادیت در سری محلول جامد (آندرادیت-گروسولار) مهیا می‌کند [۲۳]. $f\text{S}_2$ ، $f\text{O}_2$ و XCO_2 مهم‌ترین متغیرها در تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کانی‌های روشن و تیره هستند. از آن جا که همه کانی‌های موجود در هاله‌های اسکارنی منطقه مورد بررسی در سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H قرار دارند، در این پژوهش از نمودار دو متغیره $f\text{O}_2$ نسبت به دما (شکل ۷ الف) برای تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی سیال‌های اسکارن‌ساز در آغبالغ استفاده شد. این نمودار برای شرایط فشار ۰/۵ کیلو بار و $\text{XCO}_2 = 0/1$ تهیه شده است [۲۰]. نبود ولاستونیت در اسکارن‌های منطقه آغبالغ نشان می‌دهد که مجموعه گارنت (آندرادیت-گروسولار) و کلینوپیروکسن (دیوپسید-هیدنبرژیت) در دمای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است [۲۰] (شکل ۷ الف). آندرادیت گستره پایداری وسیعی در گستره دمایی ۴۰۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۵- تا $\log f\text{O}_2 = -25$ دارد (شکل ۷ الف). این کانی در حالت اکسایشی متوسط تا پایین پایدار است (زیر بافر هماتیت-مگنتیت) که با افزایش $f\text{O}_2$ ، به مگنتیت، کوارتز و کلسیت تبدیل می‌شود. با کاهش دما، گستره پایداری آندرادیت به مقادیر $f\text{O}_2$ و $f\text{S}_2$ پایین‌تر منتقل می‌شود. جانشینی آندرادیت توسط مجموعه مگنتیت + کلسیت + کوارتز در منطقه مورد بررسی بیانگر دمای حدود ۴۳۰ درجه سانتی-گراد برای واکنش یاد شده است (شکل ۷ الف). در دمای کمتر

از ۴۶۰ درجه سانتی‌گراد، سیال گرمایی دیگر با مجموعه کالک‌سیلیکاتی بی‌آب در تعادل نبوده و به احتمال بسیار در دماهای کمتر از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد شروع به دگرسانی نموده‌اند (شکل ۷ الف). بر اساس نتایج تجزیه ریزکوالکترونی، گارنت‌های آغبالغ در سری محلول جامد آندرادیت-گروسولار هستند و گستره ترکیبی $\text{Alm}_{5.6-10.7} \text{Gr}_{0.05-6.8} \text{Adr}_{81.97-89.1}$ و $\text{Alm}_{5.1-7.5} \text{Gr}_{25.4-27.2} \text{Adr}_{61.7-27.2}$ را نشان می‌دهند. بر اساس نمودار $\text{XCO}_2\text{-T}$ [۲۶] (شکل ۷ ب)، با در نظر گرفتن XCO_2 که در محیط‌های اسکارنی ۰/۲ یا کمتر است، گارنت‌های آغبالغ در گستره دمایی ۴۵۰-۵۰۰ درجه سانتی-گراد تشکیل شده‌اند. نبود ولاستونیت، هم رشدی بلورهای گارنت و کلینوپیروکسن، نبود هاله واکنشی بین این دو کانی و نبود بافت‌های جانشینی نشان می‌دهد که این دو کانی به طور همزمان در گستره دمایی ۴۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند. کانی دیوپسید در دمای کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به مجموعه ترمولیت - آکتینولیت + کلسیت + کوارتز تبدیل می‌شود. بر اساس نمودار $f\text{O}_2$ نسبت به $f\text{S}_2$ [۲۰] (شکل ۸)، در دماهای بیش از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد، حتی در گریزندگی بالای گوگرد، آندرادیت پایدار است (شکل‌های ۸ الف، ب). در دماهای کمتر از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد، سیال در تعادل با توده نفوذی و با گریزندگی به نسبت بالای گوگرد ($f\text{S}_2 > 10^{-6}$) دیگر در تعادل با آندرادیت نیست و آن را به مجموعه کوارتز + کلسیت + پیریت دگرسان می‌کند [۲۰] (شکل ۸ پ). با کاهش گریزندگی گوگرد ($f\text{S}_2 < 10^{-6}$)، چنین سیالی می‌تواند مجموعه کوارتز+کلسیت+مگنتیت را تولید کند [۲۰] (شکل ۸ ت). با توجه به جانشینی پیریت و مگنتیت توسط کالکوپیریت، می‌توان نتیجه گرفت که عنصر مس کمی دیرتر از آهن وارد سامانه اسکارنی شده است. تشکیل مجموعه کانیاپی دما پایین مانند کلریت، می‌تواند بیانگر این حقیقت باشد که سیال‌های دگرنهاده تأخیری به احتمال بسیار طبیعت اکسیدکنندگی و هیدرولیزکنندگی بیشتری داشته‌اند. در دماهای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد (مرحله پسروده پسین)، آمیخته شدن سیال ماگمایی دارای گوگرد با سیال جوی و اکسیدی شدن گونه سولفیدی سیال به سولفات و در پی آن کاهش pH سیال، سبب تشکیل کانی‌های رسی (کلریت) شده است.



زاگون-لالون، دگرگونی مجاورتی و دگرنهادی سبب ایجاد اسکارن آهن- مس در منطقه آغبالغ شده است. اسکارن زایی شامل دو مرحله پیشرونده و پسرونده است. در مرحله

Alborz, NW Iran: Evidence for metasomatism and copper mineralization", *Geologica Carpathica* 65 (2014) 207-225.

[3] Baghban S., Hosseinzadeh M. R., Moayyed M., Mokhtari M. A., Gregory D., "Geology, mineral chemistry and formation conditions of calc-silicate minerals of Astamal Fe-LREE distal skarn deposit, Eastern Azarbaijan Province, NW Iran", *Ore Geology Reviews* 68 (2015) 79-96.

[4] Calagari A., Hosseinzadeh G., "The mineralogy of copper-bearing skarn to the east of the Sungun-Chay river, East-Azarbaijan, Iran", *Journal of Asian Earth Sciences* 28 (2006) 423-438.

[5] Mokhtari M. A. A., "The mineralogy and petrology of Pahnava Fe skarn in the Eastern Azarbaijan, NW Iran", *Central European journal of geology* 4 (2012) 578-591.

[6] Siahcheshm K., "Mineralogy and metasomatic evolution of the Mianeh Iron skarn deposit, Norduz-Agarak border, NW Iran", *Arabian Journal of Geosciences* 10 (2017) 1-16.

[7] Ghalamghash J., Hoshmand Maanavi S., Vosuq Abedini M., "Geology, geochemistry and petrogenesis of Oshnavieh intrusive complex (northwest of Iran) (in Persian)", *Journal of Earth Sciences* 88 (2013) 219-232.

[8] Shafaii Moghadam H., Corfu F., Stern R. J., Lotfibakhsh A., "The Eastern Khoy Metamorphic Complex of NW Iran: A Jurassic ophiolite or continuation of the Sanandaj-Sirjan Zone", *Journal of the Geological Society* 176 (2018) 517-529.

[9] Habibikia D., "Investigation on the economic geology and exploration of Tungsten mineralization in north of Oshnavieh, West-Azerbaijan Province (in Persian)", MSc Thesis, Tarbiat Moalem University, (1999) 1-210.

[10] Jalili B., Calagari A., Simmonds V., Abedini A., "Investigation on the geology and mineralogy of iron skarn at Gardehghol, north of Oshnavieh, West Azarbaijan Province", 5th Conference of Iranian Economic Geological Society (2013).

[11] Pichab Kavosh Company, "Exploration report of the polymetallic Aghbolagh area", (2011).

[12] Naghizadeh R., "Geological map of Agbolagh area 1:20000", Geological Survey of Iran (2011).

[13] Whitney D. L., Evans B. W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American Mineralogist* 95 (2010) 185-187.

[14] Meinert L. D., "Skarns and skarn deposits", *Geoscience Canada* 19 (1992) 145-162.

[15] Droop G. T. R., "General equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses,

پیشرونده، کانی‌های گارنت همسانگرد که تغییرات بسیار جزئی در ترکیب خود از مرکز به لبه نشان می‌دهند، در سری محلول جامد گروسولار - آندرایت با آندرایت غالب و با نسبت بالای $Fe/(Fe+Al)$ تشکیل شده‌اند. تشکیل گارنت نوع آندرایتی بیانگر شرایط اکسایشی در محیط تشکیل است که فراوانی کم کلینوپیروکسن نسبت به گارنت نیز این امر را تایید می‌کند. کلینوپیروکسن از نوع سالت در سری محلول جامد دیوپسید-هیدنبرژیت قرار دارد که نسبت بالای $Fe/(Fe+Mg)$ را نشان می‌دهد. نبود ولاستونیت نشان دهنده دمای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد در این مرحله است. گارنت (آندرایت-گروسولار) در گستره دمایی ۴۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است.

آندرایت در مرحله پسرونده، در دماهای کمتر از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد و $fS_2 > 10^{-6}$ ، به مجموعه کوارتز + کلسیت + پیریت و در $fS_2 < 10^{-6}$ به مجموعه کوارتز + کلسیت + مگنتیت دگرسان شده است. دیوپسید در دمای کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترمولیت + کوارتز + کلسیت دگرسان گردیده است. در دماهای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد (مرحله پسرونده پسین)، آمیخته شدن سیال ماگمایی دارای گوگرد با سیال جوی و اکسیدی شدن گونه سولفیدی سیال به سولفات و در پی آن کاهش pH سیال سبب تشکیل کانی‌های رسی (کلریت) شده است. نهشت مگنتیت در آغاز مرحله پسرونده صورت گرفته و با احیایی شدن سیال و افزایش کانی-های سولفیدی از مقدار آن کاسته شده است.

قدردانی

نگارندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز برخوردار بوده‌اند، که شایسته است نهایت سپاس و قدردانی خود را ابراز دارند. نگارندگان همچنین از نظرات و پیشنهادهای ارزنده و سازنده داوران محترم مجله نیز سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- [1] Karimzadeh Somarin A., "Geochemical effects of endoskarn formation in the Mazraeh Cu-Fe skarn deposit in northwestern Iran", *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 4 (2005) 307-315.
- [2] Mollai H., Pe-Piper G., Dabiri R., "Genetic relationships between skarn ore deposits and magmatic activity in the Ahar region, western

- [21] Berman R. G., "Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ ", *Journal of Petrology* 29 (1988) 455-522.
- [22] Lentz D. R., Walker J. A., Stirling J. A. R., "Millstream Cu-Fe skarn deposit: An example of a Cu-bearing magnetite-rich skarn system in northern New Brunswick", *Exploration and Mining Geology* 4 (1995) 15-31.
- [23] Deer W. A., Howie R. A., Zussman, J., "An introduction to the rock forming minerals", Second edition. Longman Scientific and Technical (1992) 1-696.
- [24] Jamtveit B., Wogelius R.A., Fraser D. G., "Zonation patterns of skarn garnets, records of hydrothermal system evolution", *Geology* 21 (1993) 113-116.
- [25] Einaudi M. T., Meinert L. D., Newberry R. J., "Skarn deposits", *Economic Geology* 75th Anniversary (1981) 317-391.
- [26] Sweeney M., "Geochemistry of garnet from the north ore Shoot, Bingham district, Utah", Unpublished MSc thesis, University of Utah (1980) 1-154.
- using stoichiometric criteria", *Mineralogical Magazine* 6 (1978) 99-112.
- [16] Deer W. A., Howie, R. A., Zussman, J., "Rock-forming minerals", 2nd edition. Longman (1978) 1-668.
- [17] Einaudi M. T., Burt D. M., "Introduction-terminology, classification and composition of skarn deposits", *Economic Geology and Bulletin of the Society of Economic Geologists* 7 (1982) 745-754.
- [18] Meinert L. D., Dipple G. M., Nicolescu S., "World skarn deposits", *Economic Geology* 100th Anniversary Volume (2005) 299-336.
- [19] Franz G, Liebscher A., "Physical and chemical properties of the epidote minerals-an introduction. In: Franz G, Liebscher A (eds) *Epidotes*", *Review Mineral Geochemistry* 56 (2004) 1-82.
- [20] Einaudi M. T., "Descriptions of skarns associated with porphyry copper plutons. In: Titley, S.R., (Eds.), *Advances in geology of porphyry copper deposits, Southwestern North America*", University of Arizona Press, Tucson (1982a) 1592-1606.