



بررسی شیمی و چگونگی تشکیل کانی‌های کالک‌سیلیکاتی در پهنه اسکارنی آغلاغ، شمال اشتویه، استان آذربایجان غربی، شمال غرب ایران

نسرین خواجه محمدلو^{*}، علی اصغر کلاگری^۱، کمال سیاه چشم^۲، علی عابدینی^۳

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

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

چکیده: منطقه آغلاغ در ۲۱ کیلومتری شمال شهرستان اشتویه، 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 دپوپسید-هدنبرژیت هستند. فرآیندهای 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°C - 500°C با گریزندگی اکسیژن $fO_2 = 10^{-23}$ - 10^{-26} در مرحله پیشرونده تشکیل شده‌اند. در مرحله پسرونده، در دماهای کمتر از 430°C ، کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بدون آب به کانی‌های کالک‌سیلیکاتی آبدار، سولفیدها (پیریت و کالک‌پیریت)، اکسیدها، کلریت، کوارتز و کربنات‌ها دگرسان شده‌اند. در این مرحله، در دماهای کمتر از 430°C آندرادیت در گریزندگی گوگرد، $fS_2 > 10^{-6}$ به مجموعه‌های کوارتز+کلسیت+پیریت و در $fS_2 < 10^{-6}$ به کوارتز + کلسیت + مگنتیت دگرسان شده است.

واژه‌های کلیدی: آغلاغ؛ اشتویه؛ شیمی کانی؛ کالک‌سیلیکاتی؛ آذربایجان غربی.

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 آغلاغ صورت گرفته است. تشکیل و گسترش اسکارن آهن-مس آغلاغ در ارتباط با مجموعه نفوذی اشتویه به سن کرتاسه پسین است. مجموعه نفوذی یاد شده ۹ توده با ابعادی در حد استوک را شامل می‌شود که در سه خانواده گرانیتی، دیوریت و گرانیت قلیایی سینیت قلیایی قابل رده‌بندی است [۷]. بر پایه پژوهش قلمقاش و همکاران [۷]، جایگیری توده‌های نفوذی اشتویه در دو مرحله زمانی رخداده است، نخست، توده‌های دیوریتی و گرانیتی به طور همزمان (یا با اختلاف زمانی کوتاه)

مقدمه

اسکارن آهن-مس آغلاغ در استان آذربایجان غربی (شمال غرب ایران) و در ۲۱ کیلومتری شمال شهرستان اشتویه، بین طول‌های جغرافیایی $45^{\circ} 45' ۴۵''$ تا $45^{\circ} ۴۴' ۳۴''$ و عرض‌های جغرافیایی $۳۷^{\circ} ۳۷' ۴۱''$ تا $۳۷^{\circ} ۳۷' ۱۲''$ واقع است. بر پایه مشاهدات صحرایی در این منطقه، نفوذ توده گرانیتی کرتاسه پسین به درون سنگ‌های کربناتی، ماسه‌سنگی و شیلی کامبرین با رخداد پدیده اسکارن‌زایی همراه شده است. در بخش شمالی کمربند ارومیه-گلپایگان در شمال پهنه سندج-سیرجان به ذخایر اسکارنی مهمی چون اسکارن مس مزرعه [۱]، مس انجرد [۲]، آهن آستامال [۳]، مس سونگون [۴]،

صحرايی، 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، پیروکسین و اپیدوت) توسط دستگاه Cameca مدل SX100 ساخت شرکت فرانسه با ولتاژ ۲۰ کیلو الکترون ولت، جريان ۲۰ نانو آمپر و قطر باریکه ۵ میکرون درآزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران تجزیه نقطه‌ای شدند.

بحث و بررسی

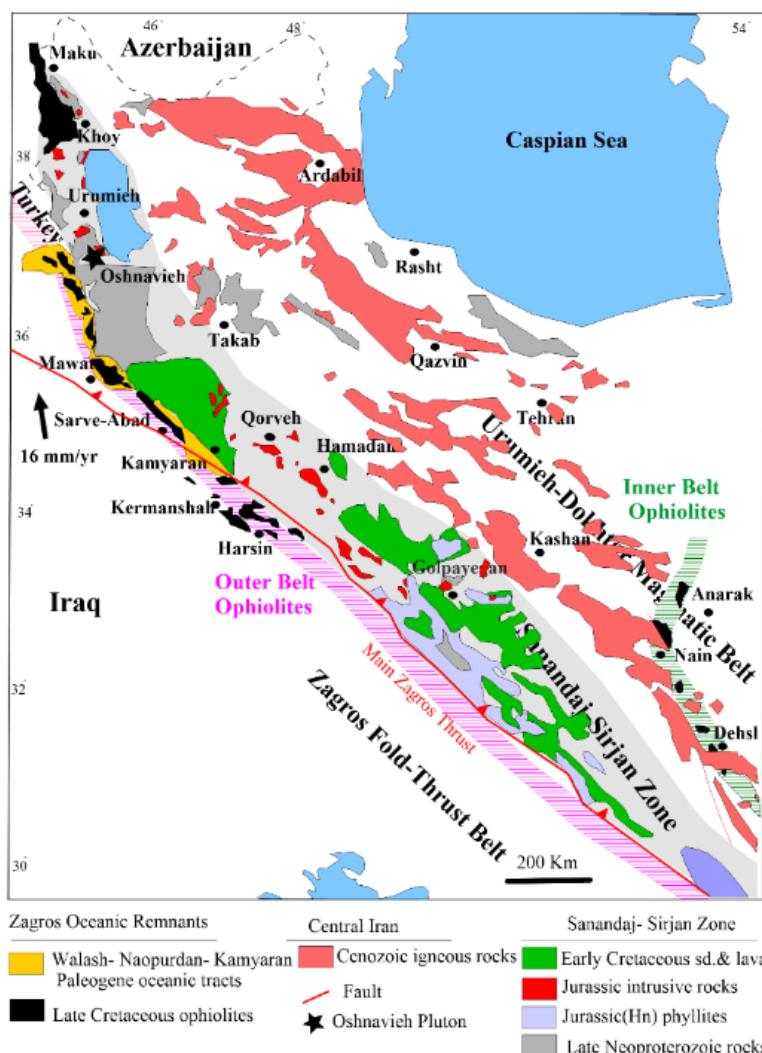
جایگاه زمین‌شناسی

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

پدید آمدۀ‌اند و سپس توده‌های سینیت قلیایی گرانیتی قلیایی با قطع کردن آنها جایگزین شده‌اند. مرحله نخست فعالیت ماقمایی حدود ۱۰۰ میلیون سال پیش و مرحله دوم حدود ۸۰ میلیون سال پیش رخ داده است [۷]. در این پژوهش، کانی‌شناسی، دگرنهادی و کانی سازی در مراحل پیشونده و پسروندۀ فرآیند اسکارنی و شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل اسکارن بررسی شده است.

روش پژوهش

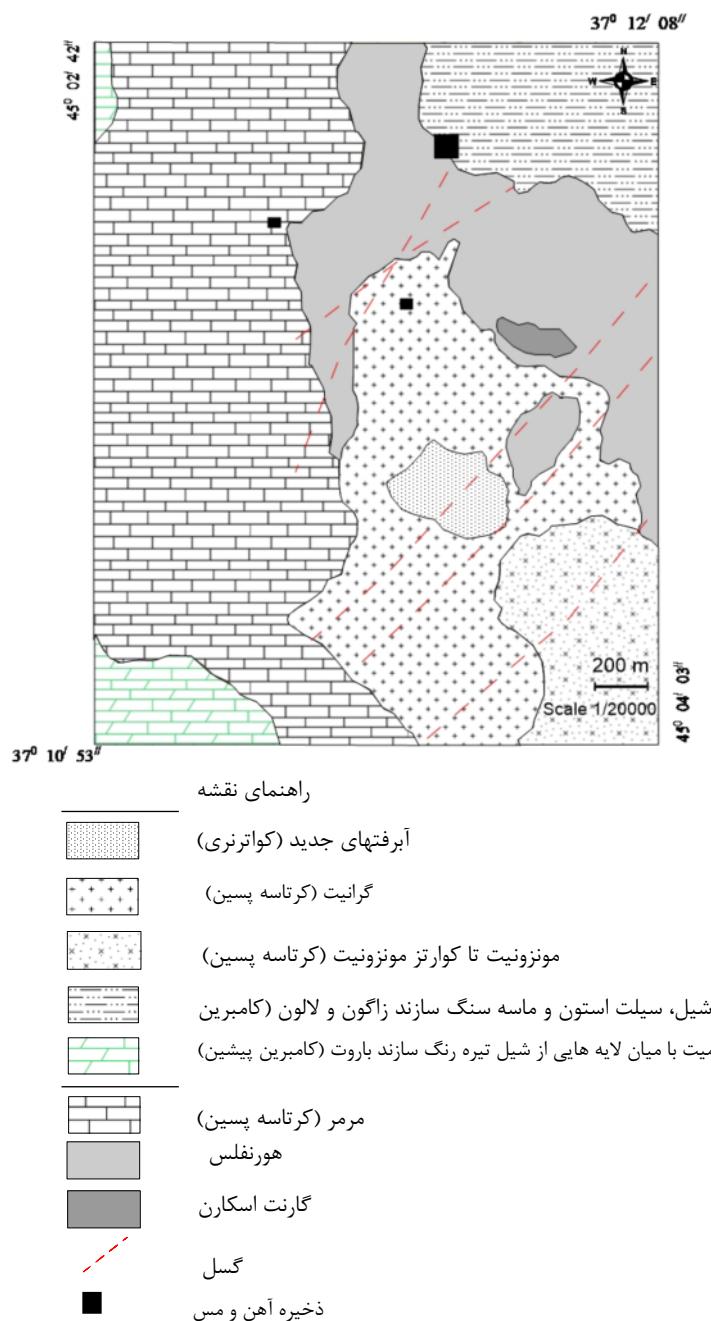
بررسی‌های انجام شده بر اسکارن آغلاغ شامل دو بخش صحرايی و آزمایشگاهی (میکروسکوپی و تجزیه نقطه‌ای) است. بررسی‌های صحرايی شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی منطقه، شناسایی مرز واحدها و نمونه برداری از پهنه‌های اسکارنی برای بررسی‌های آزمایشگاهی است. پس از بررسی‌های دقیق



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

(کرتاسه پسین) است (شکل ۲). سنگ کالک، دولومیت با میان لایه‌های شیل سازند باروت با بیشترین گسترش عمدت‌ترین 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 آغازگر شده است.

توده نفوذی یاد شده سبب تشکیل اسکارن‌هایی از جمله ذخایر تنگستان (دوربه) [۹]، اسکارن آهن (گرده گل) [۱۰] و اسکارن آهن-مس آغازگر [۱۱] در منطقه اشتباهه شده است. واحدهای سنگی منطقه بر پایه بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی و با استناد به نقشه زمین‌شناسی تهییه 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 مونزوندیوریت

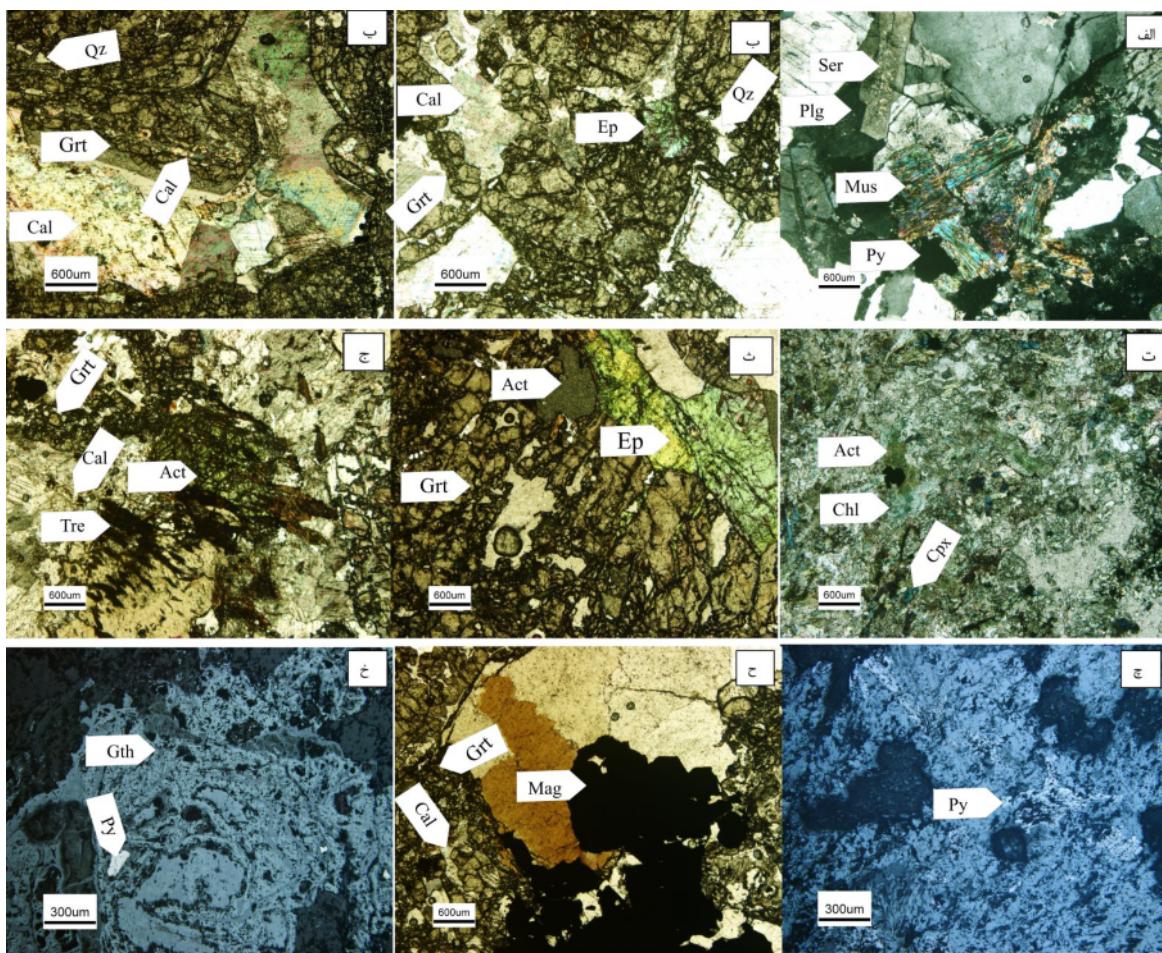


شکل ۲ نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه آغازگر اشتباهه (برگرفته از مرجع [۱۲] با تغییرات).

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

سنگنگاری و کانه‌زایی

واحد گرانیت: 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 قلایایی، کوارتز، پلازیوکلاز، 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 شکل دار با بافت مشبك و پرتیتی در نمونه‌ها دیده می‌شود. کوارتز (۲۰ تا ۴۰٪) در



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های سنگی توده نفوذی و پنهن برون‌اسکارن در منطقه آغالاغ: (الف) تشکیل سریسیت و کانی‌های رسی در اثر دگرسانی پلازیوکلاز همراه با مسکوویت و پیریت در توده نفوذی تهیه شده در نور قطبیده متقطع (xpl)، (ب) گارنت نیمه شکل دار ریز بلور همراه با گارنت درشت‌بلور که در اثر دگرسانی پسروندی به اپیدوت و کلسیت درشت‌بلور با شکستگی‌های فراوان که محل آنها توسط کلسیت و کوارتز پر شده است، در نور xpl، (ت) گارنت دگرسان 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: Gth: گارنت، Grt: گلینوپیروکسن، Py: پیریت، Qz: گوتیت، Cal: کوارتز، Ser: ترمولیت، Act: آکتینولیت، Chl: چلریت، Mus: مگنتیت، Plg: پلازیوکلاز، Mus: مگنتیت، Cal: کلسیت، Tre: ترمولیت، Srl: سریسیت، (برگرفته از مرجع [۱۲]).

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 جاروبی 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 لوزوجه 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 پسروندی 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 اغبلاغ 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 همبrijی این کانی‌ها بر اساس مشاهدات صحرابی و میکروسکوپی و با در نظر گرفتن روابط بافتی بین کانی‌های سازنده اسکارن آغبلاغ، در جدول ۱ ارائه شده است.

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

گارنت: بر پایه مشاهدات سنگنگاری، گارنت کانی غالب پهنه برون اسکارن 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).

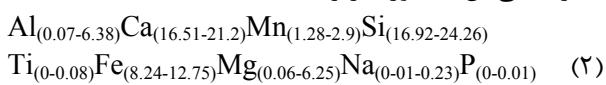
پیروکسن: کانی پیروکسن به عنوان کانی سیلیکاتی بدون آب در مراحل اولیه فرآیند تکاملی اسکارن (مرحله پیشرونده) تشکیل شده و اغلب توسط گارنت همراهی می‌شود. بر پایه ویژگی‌های نوری، پیروکسن‌ها از نوع کلینوپیروکسن هستند و در اندازه‌های ریز بلور نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل دیده می‌شوند. اغلب پیروکسن‌ها به شدت دگرسان 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

جدول ۱ روابط همیزایی کانی‌های روشن و تیره در اسکارن آغلاغ.

		کاهش سن				
		آلتراسیون متاسوماتیک و کانی سازی				
		پیشوونده	پسروونده	مرحله ۱	مرحله ۲	سوپرژن
سیلیکاتها	گارنت					
	پیروکسن					
	آمفیبول					
	اپیدوت					
	کلریت					
	کوارتز					
سولفیدها	س بت					
	کالکوپیریت					
اکسیدها	مگنتیت					
	هماتیت					
	گوتیت					
کربنات	کلسیت					

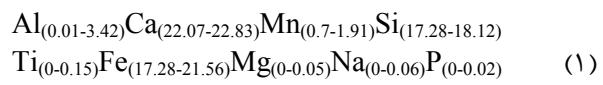
پیروکسن: نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی نشان می‌دهد که پیروکسن در گستره ترکیبی $0.29-0.42$, $a\text{Hd} = 0.56-0.65$ قرار دارد (جدول ۳). کانی‌های پیروکسن نیز مانند گارنت منطقه‌بندی ندارند و تغییرات نوسانی نشان نمی‌دهند [۱۵] (شکل‌های ۵ و ۶). پیروکسن‌های اسکارن آغلاغ از نوع سالیت بوده و از نظر ترکیب شیمیایی در سری محلول جامد دیپسید-هدنبرژیت قرار دارند (شکل ۶). نتایج عنصر سنگی، آن به صورت زیر است:



کلینوپیروکسن‌های ذخیره آغلاغ دارای مقدار بالای از نسبت $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ و مقادیر کمی از TiO_2 , MnO و Cr_2O_3 هستند. جانشینی Mn به وسیله Mg معمول است، زیرا دیوپسید-هدنبرژیت-ژوهانسینیت تشكیل محلول جامد می‌دهند. مقدار Mn در پیروکسن با رابطه Fe/Mg نسبت مستقیم دارد و با افزایش Mn این نسبت نیز افزایش می‌یابد [۱۷].

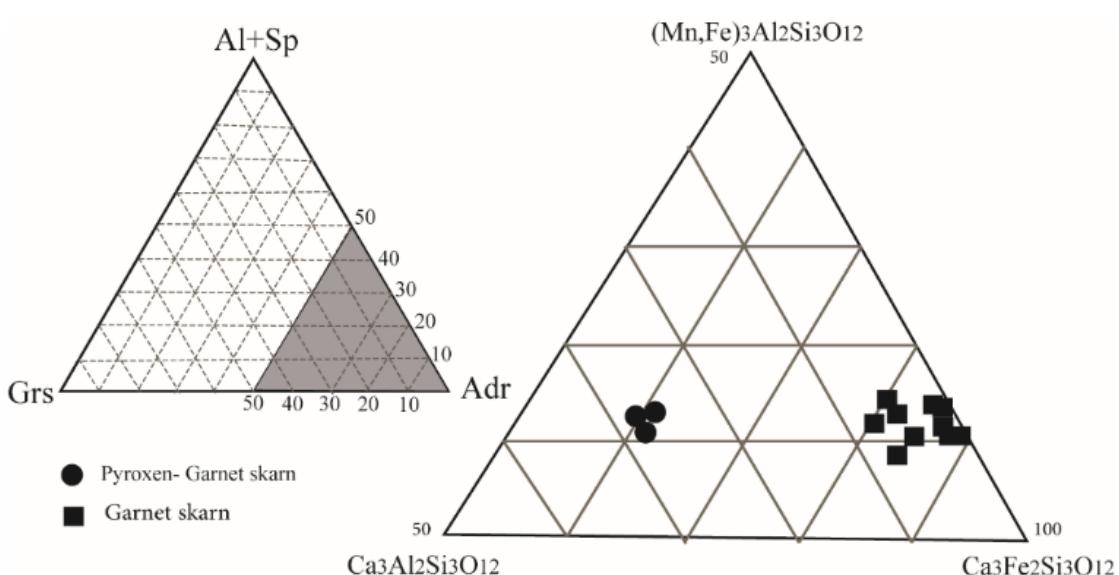
شیمی کانی‌ها: در این بخش شیمی کانی، سه کانی گارنت، پیروکسن و اپیدوت که از مهم ترین و فراوان‌ترین کانی‌های موجود در اسکاردن، آغلاغ هستند پررسه شده است.

گارنت: نتایج ریزکاو الکترونی (جدول ۲) گارنت‌های موجود در پهنه گارنت-اسکارن گستره ترکیبی $\text{Alm}_{5.6-10.7}$ و در پهنه پیروکسین-گارنت اسکارن، گستره $\text{Adr}_{81.97-89.1}$ ترکیبی $\text{Alm}_{5.1-7.5}$ $\text{Gr}_{25.4-27.2}$ را نشان می‌دهند. ترکیب شیمیایی گارنت‌ها از نوع محلول جامد (آندرادیت-گروسوپلار) و به طور غالب آندرادیت است (شکل ۴) [۱۴]. بخش عمدۀ 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). عنصر سنجی این گارنت‌ها به صورت زیر است:



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

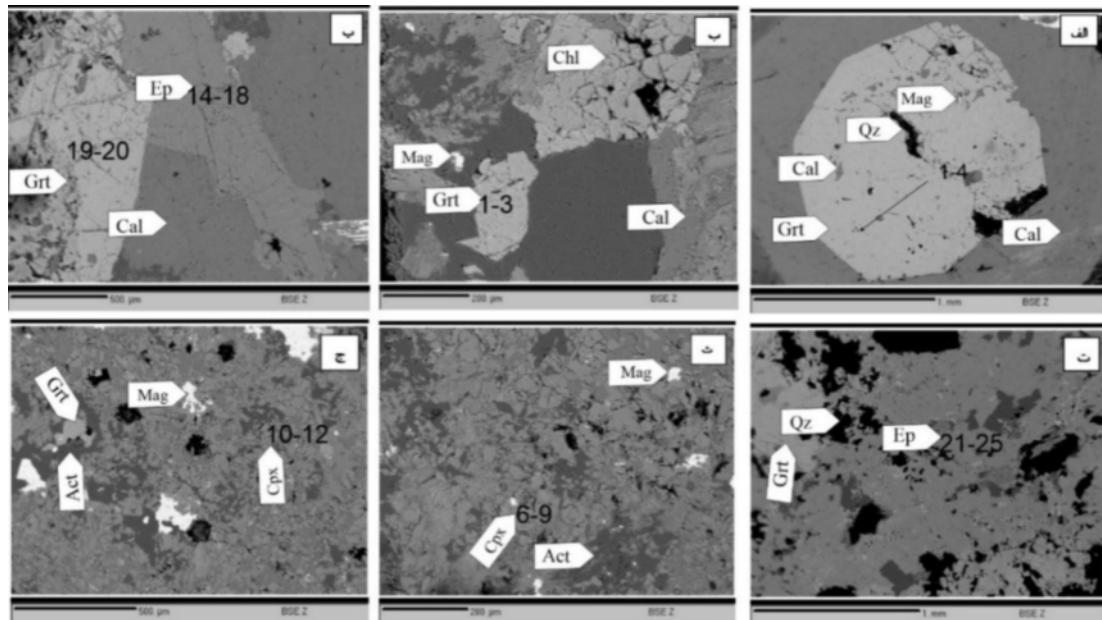
نمونه	پهنه گارنت اسکارن												پهنه پیروکسن-گارنت اسکارن		
	N1-B-1			N1-B-2			N1-B-3			N1-B-4			N1-B-5		
	مرکز	لبه	مرکز	مرکز	لبه	مرکز	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز	لبه	لبه
اکسیدهای اصلی (Wt%)															
SiO ₂	۳۷,۵۶	۳۸,۲۴	۳۸,۶۵	۳۸,۶۵	۳۸,۷۷	۳۷,۷۶	۳۷,۹۲	۳۷,۸۷	۳۸,۵۶	۳۷,۹۵	۳۷,۶۲	۳۸,۷۳	۳۶,۹۶	۳۷,۴۲	۳۶,۹۸
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	۰,۱۲
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	۶,۴۶
FeO	۲۶,۸۴	۲۷,۵۲	۲۶,۵۴	۲۷,۶۴	۲۶,۵۹	۲۷,۷۴	۲۷,۶۰	۲۷,۶۲	۲۶,۸۰	۲۷,۲۸	۲۶,۸۰	۲۵,۸۶	۲۳,۳۴	۲۳,۱۷	۲۲,۹۳
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	۲,۴۶
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	۰,۰۷
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	۳۰,۷۸
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	۹۹,۸۰
تعداد یونها محاسبه شده بر پایه ۱۲ اتم اکسیژن و عضو پایانی گارنت															
Si	۳,۱۲	۲,۱۷	۳,۲۱	۲,۲۰	۳,۲۳	۳,۱۵	۲,۱۶	۳,۱۶	۳,۲۱	۳,۱۷	۳,۱۰	۳,۲۰	۲,۹۸	۳,۰۴	۲,۹۹
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	۰,۰۱
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	۰,۶۲
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	۰,۰۰
Fe ³⁺	۱,۶۷	۱,۵۷	۱,۵۰	۱,۵۸	۱,۵۳	۱,۶۸	۱,۶۶	۱,۶۷	۱,۵۷	۱,۶۶	۱,۴۹	۱,۴۰	۱,۳۴	۱,۴۰	۱,۴۰
Fe ²⁺	۰,۲۰	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۲	۰,۲۶	۰,۲۶	۰,۲۵	۰,۲۵	۰,۳۰	۰,۲۵	۰,۱۸	۰,۲۹	۰,۱۷	۰,۲۲	۰,۱۵
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	۰,۱۷
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	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	۲,۶۶
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	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	۸,۰۰
الماندین	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	۵,۱۳
اسپیسارین	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	۵,۶۲
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	۰,۲۸
گروسو لار	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	۲۷,۲۲
اندرادیت	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	۶۱,۷۵
اووارویت	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	۰,۰۰



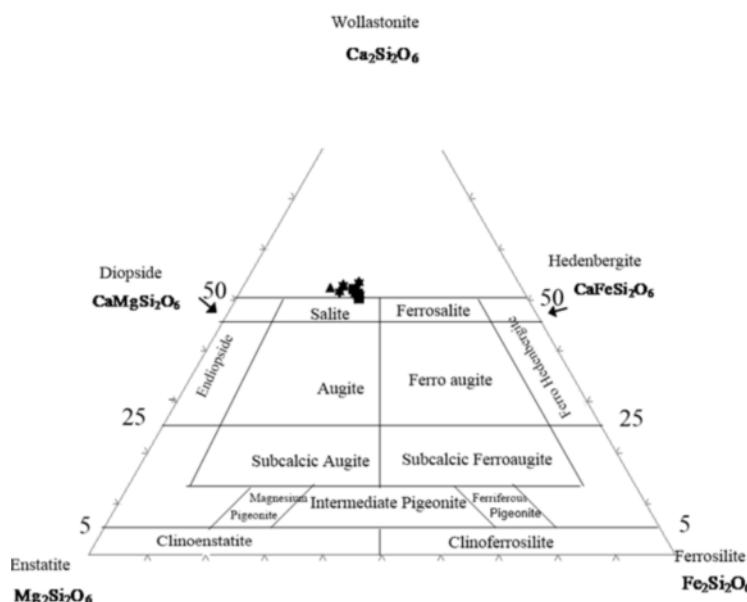
شکل ۴ جایگاه کانی‌های گارنت اسکارن آغلاغ بر نمودارهای مثلثی آندرادیت- گروسلار- آلماندین + اسپیسارین [۱۴].

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

نمونه	N11-A-1			N11-A-2			N11-A-3		
	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز	لبه	مرکز
SiO ₂ (Wt%)	۵۱,۹	۵۰,۶۷	۵۱,۲۴	۵۰,۸۳	۵۱,۴۴	۵۱,۶۵	۵۱,۰۹	۵۱,۷۳	۵۱,۷۳
TiO ₂	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۱	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
FeO	۱۲,۳	۱۴,۶۱	۱۷,۷۶	۱۱,۷۷	۱۲,۷۶	۱۲,۴۹	۱۳,۰۲	۱۱,۹	۱۰,۶
MnO	۲,۰۷	۲,۱۲	۲,۱۶	۲,۳	۲,۱	۲,۱۱	۲,۰۲	۲,۱۸	۲,۱۲
MgO	۹,۵	۹,۲۴	۹,۳۲	۱۰,۵۹	۹,۹۷	۹,۵	۹,۲۷	۱۰,۳۷	۹,۹۹
CaO	۲۳,۱	۲۲,۲	۲۲,۳۹	۲۲,۴۸	۲۲,۸۸	۲۲,۴۱	۲۲,۱۹	۲۲,۷۷	۲۲,۹
K ₂ O	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۱
مجموع	۹۹,۶۵	۱۰۰,۹۵	۹۹,۵۲	۹۹,۳۱	۱۰۰,۷۸	۹۹,۸۵	۹۹,۱۵	۱۰۰,۳۱	۹۹,۱۲
تعداد پوئیه‌های محاسبه شده بر پایه ۶ اتم اکسیژن و عضو پایانی کلینوپیروکسن									
Si	۱,۹۹۷	۱,۹۳۳	۱,۹۸۳	۱,۹۵۳	۱,۹۰۵	۱,۹۸۴	۱,۹۸۱	۱,۹۷۰	۱,۹۹۳
Ti	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	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
Fe ³⁺	۰,۰۰۱	۰,۱۲۱	۰,۰۲۹	۰,۰۹۷	۰,۰۸۷	۰,۰۲۹	۰,۰۳۱	۰,۰۶۳	۰,۰۱۸
Fe ²⁺	۰,۳۹۵	۰,۳۴۵	۰,۳۸۳	۰,۲۸۱	۰,۳۱۸	۰,۲۷۲	۰,۳۹۱	۰,۳۱۶	۰,۲۲۳
Mn	۰,۰۶۷	۰,۰۶۸	۰,۰۲۱	۰,۰۷۵	۰,۰۶۸	۰,۰۶۹	۰,۰۶۶	۰,۰۷۰	۰,۰۶۹
Mg	۰,۵۴۵	۰,۵۲۵	۰,۵۳۷	۰,۶۰۷	۰,۵۶۵	۰,۵۴۴	۰,۵۳۶	۰,۵۸۹	۰,۵۷۴
Ca	۰,۱۹۵	۰,۹۴۸	۰,۹۶۸	۰,۹۶۷	۰,۹۷۲	۰,۹۶۴	۰,۹۶۴	۰,۹۷۰	۰,۹۹۴
Na	۰,۰۱۹	۰,۰۲۳	۰,۰۱۳	۰,۰۱۲	۰,۰۱۵	۰,۰۱۸	۰,۰۱۲	۰,۰۱۳	۰,۰۰۹
K	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
پیش سیز	۰,۰۰۵	۰,۰۰۶	۰,۰۰۶	۰,۰۰۶	۰,۰۰۵	۰,۰۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰۰۴	۰,۰۰
دیوپسید	۰,۵۸۵	۰,۵۷۴	۰,۵۷۵	۰,۶۴۶	۰,۶۲۳	۰,۵۹۶	۰,۵۶۷	۰,۶۳۴	۰,۶۵۱
هدمندیت	۰,۴۲۳	۰,۳۷۶	۰,۴۱۰	۰,۲۹۹	۰,۳۵۰	۰,۴۰۷	۰,۴۱۳	۰,۳۴۰	۰,۳۶۷
ویرتوتوپت	۰,۵۰۳	۰,۵۲۱	۰,۵۱۳	۰,۵۲۱	۰,۵۲۴	۰,۵۱۳	۰,۵۱۰	۰,۵۱۷	۰,۵۲۹
انستاتیت	۰,۲۸۸	۰,۲۸۹	۰,۲۸۴	۰,۳۲۷	۰,۳۰۴	۰,۲۸۹	۰,۲۸۳	۰,۳۱۴	۰,۳۰۱
فروسیلیت	۰,۲۰۹	۰,۱۹۰	۰,۲۰۳	۰,۱۵۲	۰,۱۷۱	۰,۱۹۸	۰,۲۰۷	۰,۱۶۹	۰,۱۷۰



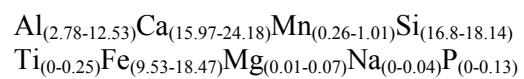
شکل ۵ تصاویر BSE تهیه شده توسط ریز کاوالکترونی از نمونه‌های اسکارن در پهنه‌های گارنت اسکارن و پیروکسن-گارنت اسکارن در منطقه آغلاغ. (الف) گارنت بدون منطقه‌بندی همراه با کلسیت، کوارتز و مگنتیت در پهنه گارنت اسکارن، (ب) گارنت بدون منطقه‌بندی همراه با کلریت و کلسیت در پهنه پیروکسن-گارنت اسکارن، (پ) گارنت بدون منطقه‌بندی همراه با اپیدوت و کلسیت در پهنه گارنت اسکارن، (ت) گارنت همراه با اپیدوت و کوارتز در پهنه گارنت اسکارن، (ث) کلینوپیروکسن همراه با آکتینیولیت و مگنتیت در پهنه پیروکسن دیده می‌شود. اعداد روی تصاویر نقاط اندازه گیری شده توسط ریز کاوالکترونی است. علائم اختصاری کانی‌ها: Chl: گارنت، Mag: مگنتیت، Ep: اپیدوت، Cal: کلسیت، Cpx: کلینوپیروکسن (برگرفته از مرجع [۱۳] هستند).



شکل ۶ جایگاه کانی‌های پیروکسن اسکارن آغلاغ 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 $Al^{3+}/(Fe^{3+} + Al + Cr^{3+}-2)$ و برای عضو پایانی غنی از Al کلینوزوئیزیت $[Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)]$ از رابطه $Al^{3+}/(Al-2)/(Fe^{3+} + Al + Cr^{3+}-2)$ اپیدوت‌های ذخیره اسکارن آغلاغ به طور غالب از نوع اپیدوت $[Ca_2Al_2Fe^{3+}Si_3O_{12}(OH)]$ هستند.

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 کاوالکترونی 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 ریز کاوالکترونی کانی اپیدوت ذخیره آغلاغ.

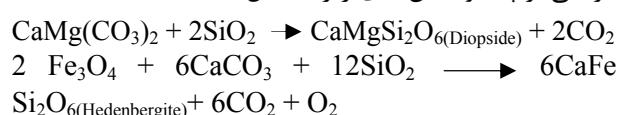
نمونه	NI-B					N10-C					له
	مرکز				لبه	مرکز				لبه	
SiO ₂ (Wt%)	۳۸,۸۱	۳۸,۷۷	۳۸,۶۵	۳۸,۵۶	۳۸,۶۳	۳۷,۸۸	۳۸,۱۸	۳۸,۰۰	۳۷,۶۱	۳۷,۶۶	
TiO ₂	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۷	۰,۴۲	۰,۴۲	۰,۱۸	۰,۲۹	
Al ₂ O ₃	۲۲,۶۷	۲۲,۲۱	۲۲,۳۲	۲۱,۸۹	۲۳,۶۸	۲۲,۳۸	۲۱,۹۱	۲۲,۶۱	۲۲,۰۰	۲۲,۵۷	
FeO	۱۳,۷۱	۱۲,۲۶	۱۲,۵۹	۱۳,۷۱	۱۳,۷۲	۱۴,۳۵	۱۴,۵۵	۱۳,۶۹	۱۴,۲۸	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	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۱۲	
CaO	۲۳,۶۴	۲۲,۰۸	۲۲,۸۴	۲۳,۷۷	۲۲,۳۴	۲۳,۵۴	۲۲,۲۲	۲۲,۳۹	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 برای اتم اکسیژن ۱۲۵ 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	۰,۰۲۷	۰,۰۳۶	۰,۰۲۳	۰,۰۳۰	۰,۰۷۹	۰,۰۳۵	
Mg	۰,۰۰۱	۰,۰۲	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	-۰,۴۲۵	-۰,۲۳	-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 آغلاغ را می‌توان به دو مرحله اصلی تقسیم کرد:

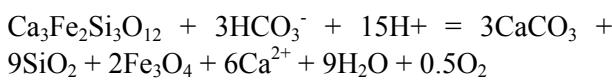
مرحله پیشرونده: این مرحله همزمان با جایگیری توده نفوذی گرانیتی در واحدهای شیل و ماسه سنگ سازند زاگون ولalon و نیز سنگ‌های کربناتی سازند باروت موجود در منطقه مورد بررسی آغاز می‌شود. در این مرحله، در اثر شار گرمایی برآمده از توده نفوذی به درون سنگ‌های میزان، دگرگونی ایزوشیمیایی در سنگ‌های در برگیرنده رخ 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 فرآراز سنگ‌های میزان، (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 ماقمای نفوذی و آزاد شدن سیال‌های آبگون ماقمایی صورت گرفته و سبب گسترش پهنه‌های اگزواسکارن در سنگ‌های رسوبی (کالک، شیل و ماسه سنگ) شده است. تشکیل این مرحله در ذخیره آغلاغ با کانی‌های به نسبت درشت گارنت و پیروکسن کلسیم و آهن‌دار مشخص می‌شود. پیروکسن‌ها (دیوپسید و هدنبریت) طی این مرحله از طریق واکنش کربن‌زایی بین سنگ کالک و یا دولومیت و سیال‌های گرمایی بر پایه واکنش‌های زیر تشکیل شده‌اند [۱۸].



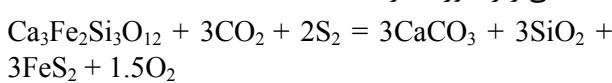
مرحله پسرونده: طی این مرحله، کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بدون آب (پیروکسن و گارنت) توسط سیال‌های گرمایی به نسبت دما پایین به کانی‌های کالک سیلیکاتی آبدار (اپیدوت و ترمولیت- اکتینولیت) و سیلیکاتی (کوارتز و کلریت) و غیر

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

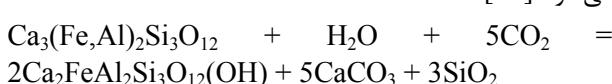
(الف) زیر مرحله پسرونده آغازین: طی این مرحله، در اثر دگرسانی کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بدون آب تشکیل شده در مرحله پیشرونده، کانی‌های کالک‌سیلیکاتی آبدار، سولفیدها (پیریت و کالک‌پیریت)، اکسیدها (مگنتیت و هماتیت)، کوراتز و کربنات (کلسیت) در راستای شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند. تشکیل کانی مگنتیت طی این مرحله می‌تواند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



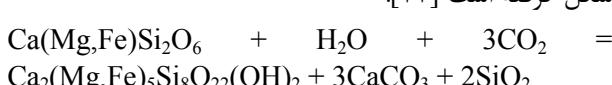
حضور کانی‌های پیریت-کلسیت-کوارتز همراه با گارنت می‌تواند از طریق سولفیدشدنگی و کربن‌گیری گارنت در اثر واکنش شیمیایی زیر صورت گرفته باشد [۲۰]:



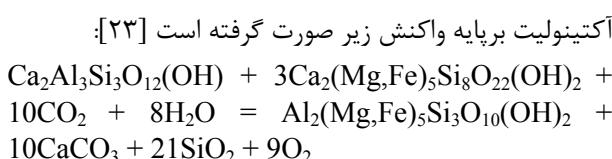
کانی اپیدوت نیز توسط سیال‌های گرمایی به نسبت دما پایین غنی از CO_2 از دگرسانی گارنت‌ها طی واکنش زیر تشکیل می‌شود [۲۱]:



اکتینولیت 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 کانی‌ای از دگرسانی اپیدوت و ترمولیت- اکتینولیت برپایه واکنش زیر صورت گرفته است [۲۳]:

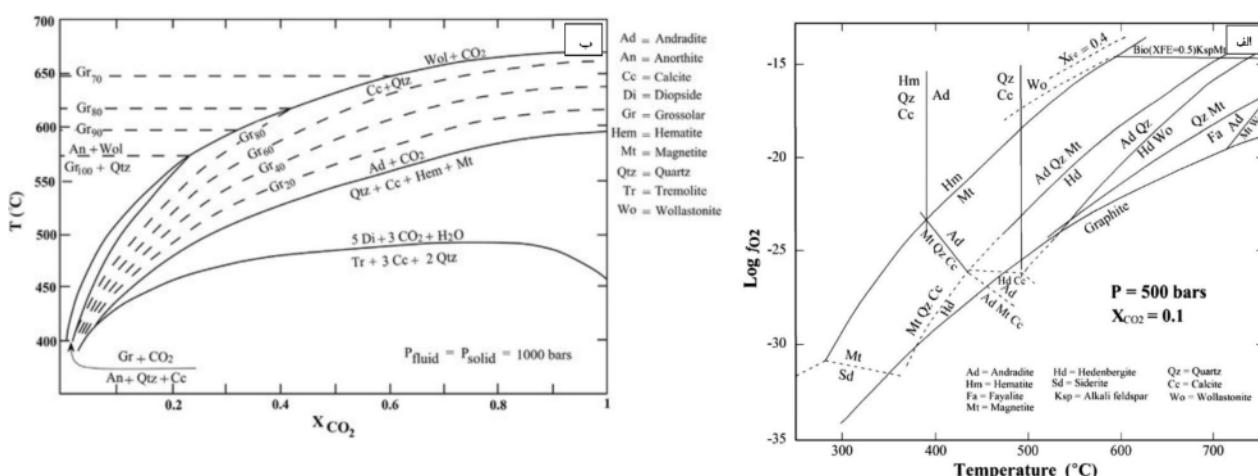


از ۴۶۰ درجه سانتی‌گراد، سیال گرمابی دیگر با مجموعه کالکسیلیکاتی بی‌آب در تعادل نبوده و به احتمال بسیار در دماهای کمتر از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد شروع به دگرسانی نموده‌اند (شکل ۷ الف). بر اساس نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی، گارنت‌های آغلاغ در سری محلول جامد آندرادیت-گروسولار هستند و گستره ترکیبی $\text{Alm}_{81.97-89.1} \text{Gr}_{0.05-6.8}$ و آغلاغ $\text{Alm}_{5.1-7.5} \text{Gr}_{25.4-27.2}$ را نشان می‌دهند.

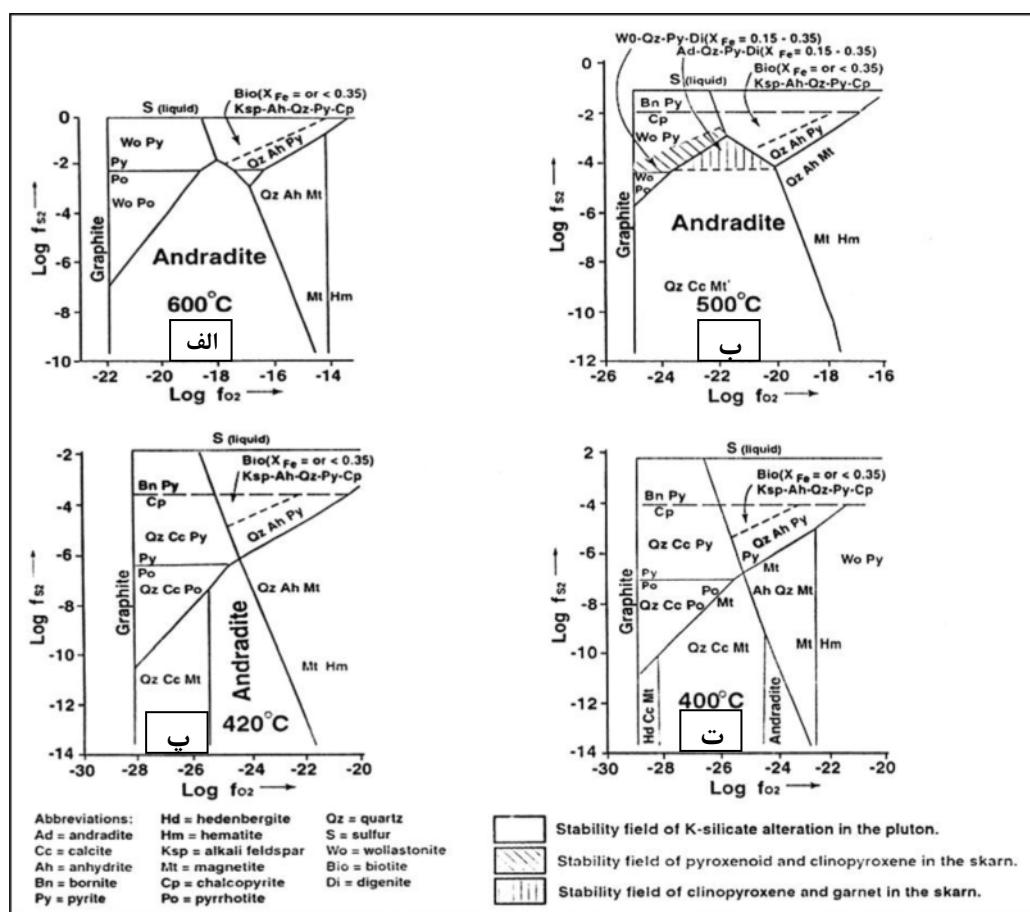
بر اساس نمودار $\text{XCO}_2\text{-T}$ [شکل ۷ ب]، با در نظر گرفتن XCO_2 که در محیط‌های اسکارنی $0/2$ یا کمتر است، گارنت‌های آغلاغ در گستره دمایی $450-500$ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند. نبود لاستونیت، هم رشدی بلورهای گارنت و کلینوپیروکسن، نبود هاله واکنشی بین این دو کانی و نبود بافت‌های جانشینی نشان می‌دهد که این دو کانی به طور همزمان در گستره دمایی $450-500$ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند. کانی دیوبسید در دمای کمتر از 450 درجه سانتی‌گراد می‌شود. بر اساس نمودار $f\text{O}_2$ - $f\text{S}_2$ [شکل ۸] (شکل ۲۰)، در دماهای بیش از 430 درجه سانتی‌گراد، حتی در گریزندگی بالای گوگرد، آندرادیت پایدار است (شکل‌های ۸ الف، ب). در دماهای کمتر از 430 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 ($10^{-6} < f\text{S}_2$)، 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 کانی‌ای دما پایین مانند کلریت، می‌تواند بیانگر این حقیقت باشد که سیال‌های دگرنها به تأخیری به احتمال بسیار طبیعت اکسیدکنندگی و هیدرولیزکنندگی بیشتری داشته‌اند. در دماهای کمتر از 300 درجه سانتی‌گراد (مرحله پسروند پسین)، آمیخته شدن سیال ماقمایی 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.

شرایط فیزیکوشیمیایی فرآیندهای اسکارن‌زائی در ذخیره آغلاغ

بر پایه بررسی‌های میکروسکوپی و تجزیه ریزکاوالکترونی، اسکارن آغلاغ 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 FeO و CaO 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 $f\text{O}_2$ و محلول‌های با شوری بالا شرایط را برای افزایش عضو پایانی آندرادیت در سری محلول جامد $\text{XCO}_2-f\text{S}_2-f\text{O}_2$ (آندرادیت-گروسولار) مهیا می‌کند [۲۳]. 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 $\text{Ca}-\text{Fe}-\text{Si}-\text{C}-\text{O}-\text{H}$ 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 آغلاغ استفاده شد. این نمودار برای شرایط فشار 0.5 کیلوبار و $0.1 = \text{XCO}_2$ تهیه شده است [۲۰]. نبود لاستونیت در اسکارن‌های منطقه آغلاغ نشان می‌دهد که مجموعه گارنت (آندرادیت-گروسولار) و کلینوپیروکسن (دیوبسید-هدنبزیت) در دمای کمتر از 550 درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است [۲۰] (شکل ۷ الف). آندرادیت گستره پایداری وسیعی در گستره دمایی $400-700$ درجه سانتی‌گراد 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 430 درجه سانتی‌گراد برای واکنش یاد شده است (شکل ۷ الف). در دمای کمتر



شکل ۷ (الف) نمودار fO_2 نسبت به دما در فشار سیال ۵۰۰ بار و $XCO_2 = 0.1$ [۲۰] و (ب) نمودار XCO_2 -T برای سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H. آندرادیت خالص و مقادیر Gr₈₀ تا Gr₂₀ محلول جامد آندرادیت-گروسولار هستند [۲۶]. در فشار ۱۰۰۰ بار. Gr: گروسولار، Ad: آندرادیت، Cc: خالص، Mt: مگنتیت، Wo: ولستونیت.



شکل ۸ نمودار fO_2 نسبت به fS_2 برای میدان پایداری آندرادیت در گستره دمایی ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد و $XCO_2 = 0.1$.

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

برداشت با جایگیری و سرد شدن توده گرانیتی به سن کرتاسه پسین در سنگ‌های کربناتی سازند باروت و شیل و ماسه‌سنگ سازند

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 Pahnavar 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 Gardehgol, 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 - آندرادیت با آندرادیت غالب و با نسبت بالای $Fe/(Fe+Al)$ تشکیل شده‌اند. تشکیل گارنت نوع آندرادیتی بیانگر شرایط اکسایشی در محیط تشکیل است که فراوانی کم کلینوپیروکسن نسبت به گارنت نیز این امر را تایید می‌کند. کلینوپیروکسن از نوع سالیت در سری محلول جامد دیوپسید-هندبرژیت قرار دارد که نسبت بالای $Fe/(Fe+Mg)$ را نشان می‌دهد. نبود ولستونیت نشان دهنده دمای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد در این مرحله است. گارنت (آندرادیت-گروسولار) در گستره دمایی ۴۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است.

آندرادیت 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 کانی‌های سولفیدی از مقدار آن کاسته شده است.

قدرتانی

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 $Na_2O-K_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2-H_2O-CO_2$ ", 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., Niculescu 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.