

کانی‌شناسی گارنت در اسکارن خونی، شمال خاور انارک، استان اصفهان: شواهدی از تکوین یک سامانه گرمابی

سعیده رنجبر^{۱*}، سید محسن طباطبایی‌منش^۲ و محمدعلی مکی‌زاده^۲

^۱ دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰

چکیده

اسکارن خونی در فاصله ۲۲۰ کیلومتری شمال خاور اصفهان، در پهنه ساختاری ایران مرکزی قرار دارد که در همبری زبانه‌های کوچکی از توده نفوذی گرانیتوئیدی نوع I کالکافی (به سن ائوسن بالایی - الیگوسن) با واحد مرمر- دولومیتی لاج به سن پرکامبرین گسترش یافته است. اسکارن‌سازی متشکل از دو زیرپهنه درون‌اسکارن و برون‌اسکارن است. در این اسکارن‌ها کانه‌زایی گسترده‌ای رخ نداده است. زیرپهنه درون‌اسکارن گسترش محدود (از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر) داشته و برون‌اسکارن بیشترین گسترش را دارد. درون‌اسکارن با گسترش گارنت‌های خودشکل در زمینه توده نفوذی در مجاورت بخش کربناتی نمود دارد. در مجاورت بلافصل آن، زیرپهنه درون‌اسکارن با تشکیل کانی‌های گارنت و پیروکسن در بخش کربناتی آغاز می‌شود و با گسترش وزوویانیت و فلوگوپیت در فواصل دورتر از محل همبری ادامه می‌یابد. گارنت کانی فراوان موجود در این سامانه اسکارنی است و به شکل‌ها و اندازه‌های گوناگون در این سنگ‌ها دیده می‌شود. در این پژوهش به بررسی الگوی ناحیه‌بندی بلورهای گارنت در زیرپهنه آگرواسکارن، در همبری بلافصل توده نفوذی پرداخته شده است. این گارنت‌ها عمدتاً خودشکل و همسان‌گرد بوده و در مواردی بی‌شکل هستند و یا ناهمسان‌گردی نشان می‌دهند و عمدتاً دارای هسته غنی از گروسولار هستند که به سمت حاشیه، با یک مرز واضح محتوای آندرادیت در آنها افزایش چشمگیری نشان می‌دهد. بررسی‌های صورت گرفته توسط پژوهشگران، جوشش را به عنوان عامل اصلی این پدیده مطرح می‌سازد، به این صورت که این پدیده سبب افزایش محتوای آهن و فشار بخشی اکسیژن در مراحل پایانی تکوین این سامانه شده و سرانجام محتوای آندرادیت در محلول جامد گارنت را افزایش داده است.

کلیدواژه‌ها: کانی‌شناسی، گارنت، دگرگونی مجاورتی، سامانه گرمابی، اسکارن خونی.

*نویسنده مسئول: سعیده رنجبر

E-mail: Saeideh.Ranjbar@gmail.com

۱- پیش‌نوشتار

گارنت به عنوان یکی از کانی‌های شاخص و فراوان در سامانه‌های اسکارنی بوده و از گذشته تا به امروز توجه پژوهشگران سامانه‌های اسکارنی را به خود جلب کرده است. مقالات بسیاری در رابطه با گارنت در سامانه‌های اسکارنی توسط پژوهشگران گوناگون (Lottermoser, 1992; Fleet et al., 1997; Ling & Liu, 2003; Lipin & McKay, 1989; Giuliani et al., 1987; Auwera & Andre, 1991; Kato, 1999; Smith et al., 2004; Gaspar et al., 2008) نشان داده است که از این کانی می‌توان به عنوان کلیدی در رسم پیشینه سامانه اسکارنی وابسته به آن استفاده کرد. گارنت در محدوده‌های گسترده دما، فشار و ترکیب سنگ کل پایدار است. سرعت تراوش محدود کاتیون‌ها در گارنت این کانی را توانا می‌سازد تا ناحیه‌بندی ترکیبی که نشان‌دهنده تاریخچه رشد و واکنش‌های رخ داده برای تشکیل آن است را در خود حفظ کند. بنابراین ناحیه‌بندی ترکیبی در گارنت‌ها ابزار بالقوه بسیار مناسبی برای به دست آوردن اطلاعات کمی در زمینه تاریخچه دینامیکی و گرمایی بسیاری از سنگ‌هاست (Chakraborty & Ganguly, 1991).

به‌طور کلی ناحیه‌بندی نوسانی در کانی‌ها پدیده‌ای متداول به شمار آمده (Shore & Fowler, 1996) و از محیط‌های زمین‌شناسی گوناگونی گزارش شده است. ساختار کانی‌های زونه اطلاعات با ارزشی را در زمینه فرایندهای رشد بلور و محیطی که بلور در آن رشد کرده در اختیار ما قرار می‌دهد. تلاش‌های صورت گرفته برای تعیین علت رخداد الگوهای ناحیه‌بندی پیچیده کانی‌ها، منجر به تعیین دو فرایند کاملاً متفاوت شده است؛ (۱) ناحیه‌بندی، ناشی از فرایندهای داخلی تأثیرگذار در رشد بلور است (Hasse et al., 1980; Allegre et al., 1981; Simakin, 1983; Wang & Merino, 1992; Ortoleva, 1990; L'Heureux & Fowler, 1994)؛ (۲) ناحیه‌بندی اساساً بازتاب‌کننده تغییرات در شرایط خارجی (محیطی) در زمان رشد بلور است (Yardley et al., 1991; Jamtveit et al., 1993 & 1995). مدل اول بیانگر

این است که ناحیه‌بندی نوسانی بدون دخالت هرگونه عامل خارجی یعنی به‌صورت "خودکنترلی" رخ می‌دهد. رخداد این فرایند مستلزم این است که فرایندهای زمین‌شناسی به دور از تعادل باشند که چنین شرایطی توسط جریان گسترده دما یا جرم به درون یک سامانه باز ایجاد می‌شود.

مدل دوم برای ناحیه‌بندی‌های نوسانی رخ داده در سامانه‌ای است که در آن کانی‌ها نزدیک به شرایط تعادل محلی با محیط خود بوده و الگوی ناحیه‌بندی به‌طور مستقیم نشان‌دهنده تغییرات شرایط محیط است. چنین تغییراتی بیشتر به جریان متغیر جرم به درون یک سامانه باز نسبت داده می‌شود ولی این تغییرات را می‌توان به تغییر در عواملی همچون دما و فشار نیز نسبت داد.

در هر صورت، هر دو مدل ناحیه‌بندی نوسانی نشان‌دهنده واکنش یک سامانه محلی به برخی از نیروهای خارجی است که در سامانه‌های دگرگونی این نیروها ممکن است در رابطه با جریان سیال همراه با جابه‌جایی پهن رفتی جرم و دما و یا نوسان در فشار منفذی باشد (Holten et al., 1997).

در این پژوهش سعی بر این است تا با کمک بررسی‌های میکروسکوپی در نور عبوری، تجزیه مایکروپروب و نقشه‌های پرتو X از کانی گارنت، شرایط شکل‌گیری این کانی در اسکارن خونی مورد بررسی قرار گیرد.

۲- روش کار

در منطقه خونی رخنمون اسکارن دارای گستردگی کمی بوده ولی با این وجود گوناگونی مجموعه کانی‌های اسکارن در این سنگ‌ها قابل توجه است. در بررسی‌های صحرائی صورت گرفته از این منطقه، گوناگونی کانی‌شناسی اسکارن‌ها مورد توجه قرار گرفت و پس از تهیه مقاطع نازک، توسط میکروسکوپ قطبشی OLYMPUS مدل BH2 در دانشگاه اصفهان مطالعه شد و انواع گارنت در این سامانه اسکارنی

اوسن هم‌ماگما هستند. سن‌سنجی به روش K-Ar، سن ۵۴ میلیون سال را برای این سنگ‌ها پیشنهاد کرده است (Ykovenko et al., 1981). در این محدوده، سنگ‌های نیمه‌ژرف با ترکیب الیون بازالت و با سن اوسن - الیگوسن نیز رخمون دارند (Ykovenko et al., 1981). با توجه به شکل ۱، توده نفوذی کالکافی دارای چندین بخش با سنگ‌شناسی متفاوت است که در اثر همبری بخش مونزونیتی - کوارتز مونزونیتی آن (در شمال) با واحد سیستی - مرمری دگرگونی‌های انارک، اسکارن‌سازی با گسترش کم و تشکیل هورنفلس با گسترش بیشتر در این منطقه رخ داده است (باباخانی و همکاران، ۱۳۷۶؛ رنجبر، ۱۳۸۸). همچنین نفوذ دایک‌ها و زبانه‌های بسیار با ابعاد گوناگون به درون واحد مرمر - دولومیتی لاخ در کوه خونی، سبب ایجاد نوع متفاوتی از اسکارن‌سازی در این منطقه نسبت به اسکارن شمال کالکافی شده است (شرکت مهندسی مشاور کان‌آذین، ۱۳۸۴).

۴- زمین‌شناسی محلی

اسکارن‌های مورد مطالعه در ۵۳ کیلومتری شمال خاور انارک و در محدوده طول خاوری $55^{\circ} 11'$ و عرض شمالی $50^{\circ} 26' 33''$ قرار دارند. محدوده مورد بررسی میان دو منطقه فروزمین دشت نخلک و چوپانان جای دارد. در این منطقه در اثر تزریق چند زبانه نفوذی به درون واحد مرمر - دولومیتی لاخ، اسکارن‌زایی در بخش جنوبی کوه خونی رخ داده است. دایک‌ها و زبانه‌های نفوذی نیمه‌ژرف (شکل ۲) با جنس دیوریتی، مونزونیتی، کوارتز مونزونیتی و گرانیتی (درویش، ۱۳۹۰) به سن اوسن - الیگوسن (Ykovenko et al., 1981) واحدهای کهن تر منطقه را قطع می‌کند. این دایک‌ها از توده نفوذی با ماهیت کالک‌آکالن پتاسیم بالای کالکافی (احمدیان و همکاران، ۱۳۸۳؛ رسا و همکاران، ۱۳۸۴) منشأ گرفته‌اند.

۵- کانی‌شناسی اسکارن خونی

اسکارن مورد بررسی در مطالعات صحرایی و میکروسکوپی به دو دسته برون‌اسکارن و درون‌اسکارن قابل تقسیم است. از دیدگاه Burt (1977) می‌توان دگرسانی اسکارنی رخ داده را به دو گروه اسکارن واکنشی و اسکارن جانیشینی تقسیم‌بندی کرد. اسکارن واکنشی بیشتر کوچک‌مقیاس است و می‌تواند در مقیاس میلی‌متری تا چند متر یافت شود؛ در حالی که مقیاس اسکارن جانیشینی از چندین متر تا صدها متر یا بیشتر متغیر است. در اسکارن مورد مطالعه گسترش هاله‌های دگرگونی مجاورتی در ابعاد مختلف از چند میلی‌متر تا چند متر در نوسان است (شکل ۳). بخش درون‌اسکارن یا اسکارن واکنشی با گسترش میلی‌متری در بررسی‌های میکروسکوپی به خوبی قابل تشخیص است. در این بخش در اثر نفوذ یون‌های Ca و Mg به درون بخش سیلیکاتی، کانی‌های همسان‌گرد و خودشکل گارنت در زمینه میکروگرانیت تشکیل شده است. در مجاورت بلافضل این مجموعه کانیایی، بخش برون‌اسکارن یا اسکارن جانیشینی آغاز می‌شود که به صورت گسترش کانی‌های سیلیکات متعلق به مجموعه دگرسانی اسکارنی در زمینه کربناتی است. مجموعه کانی‌های دیده شده در این بخش بیشتر شامل گارنت (همسان‌گرد و بی‌رنگ)، کلینوپیروکسن و کلسیت است. با دور شدن از بخش آذرین گوناگونی کانی‌شناسی در برون‌اسکارن افزایش می‌یابد؛ به این صورت که فلوگوپیت و وزوویانیت با فراوانی بالا دیده می‌شوند. در برخی از نمونه‌های برون‌اسکارن، سربانتین و تالک نیز به‌عنوان کانی ثانویه و به شکل پرکننده قالب کانی اولیه (احتمالاً الیون یا کلینوپیروکسن) تشکیل شده‌اند.

در جدول ۱ به مراحل تشکیل اسکارن بر پایه روابط پاراژنزی کانی‌ها اشاره شده است. به‌طور کلی می‌توان مراحل تشکیل این سنگ‌ها را به دو مرحله اصلی بی‌متاسوماتیسم و برگشتی تقسیم کرد. در مرحله بی‌متاسوماتیسم کانی‌های اولیه و دمابالای اسکارنی تشکیل می‌شوند. از جمله این کانی‌ها می‌توان به کلینوپیروکسن، گارنت و الیون اشاره کرد. با گذشت زمان و کاهش دمای محیط مراحل برگشتی

مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به امکانات موجود، شماری از این گارنت‌ها که دارای ویژگی‌های شاخص تری بودند انتخاب و برای تجزیه مایکروپروب به دانشگاه اشتوتگارت آلمان فرستاده شد. کانی‌ها توسط دستگاه Cameca SX100 EMPA با شتاب ولتاژ ۱۵ kv، جریان الکترونی ۳۰ nA و قطر پرتو ۵ میکرومتر مورد تجزیه قرار گرفته‌اند. روش تجزیه و خطاهای دستگاهی در مقاله (Massonne 2012) آمده است. نقشه تمرکز عناصر، برای عناصر اصلی (Mn و Ca, Fe, Mg) توسط جابه‌جا کردن مرحله به مرحله مقطع نازک، زیر پرتو الکترونی مایکروپروب به دست آمده و توسط برنامه کامپیوتری XMAP رسم شده است (برای اطلاع از چگونگی رسم این نقشه‌ها، به مقاله Berndardt et al., 1995 مراجعه شود). زمان شمارش در هر مرحله ۱۰۰ میلی‌ثانیه بوده و جریان الکترونی ۴۰ nA برای اسکن گارنت استفاده شده است. برای محاسبه فرمول ساختاری گارنت و تعیین اعضای پایانی آن از صفحات گسترده نرم‌افزار Excel و برای کلینوپیروکسن از نرم‌افزار Minpet استفاده شده است. پژوهش حاضر به بررسی نتایج به دست آمده از تجزیه گارنت‌ها می‌پردازد.

۳- زمین‌شناسی منطقه

محدوده مورد بررسی از دید ساختمانی جزو پهنه ساختاری ایران مرکزی بوده و در زیر زون دگرگونی انارک - خور قرار گرفته است (آقناباتی، ۱۳۸۵). کهن‌ترین واحدهای سنگ‌چینه‌ای موجود در منطقه، مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی شامل شیست، کوارتزیت، مرمر و آمفیبولیت همراه با بلوک‌های سربانتینی است که مربوط به مجموعه دگرگونی انارک است و طیف زمانی از پراکامبرین تا کامبرین زیرین را در بر می‌گیرد. پالئوزویک، در زیرپهنه انارک - خور بسیار محدود بوده و بیشترین رخمون آن در کوه معراجی است. در این منطقه سنگ‌های آهکی کرتاسه زیرین به‌طور دگرشیب سنگ‌های پالئوزویک را می‌پوشانند. سنگ‌های مزوزویک، متشکل از سازند شمشک و سنگ‌های آهکی کرتاسه است. سنگ‌های رسوبی ژوراسیک شامل رخمون‌های کوچکی از تناوب دولومیت و شیل تریاس و به نسبت گسترده‌تر تناوب شیل و ماسه‌سنگ سازند شمشک و چاه‌پلنگی است که سازند چاه‌پلنگی از ژوراسیک بالا تا نوکومین را شامل می‌شود. رخمون‌های کرتاسه، گسترش وسیعی در کل منطقه انارک - خور دارد. این سنگ‌ها شامل آهک با میان‌لایه‌های مارن سبز و خاکستری است و از دید سنی متعلق به کرتاسه زیرین تا کرتاسه بالایی هستند که بیشتر در جنوب خاور توده کالکافی گسترش داشته و خود به‌طور ناهمیشب توسط ترادف ستر آتشفشانی و آتشفشانی - رسوبی اوسن پوشیده شده است (شکل ۱).

برونزدهای تشریری به‌طور چیره شامل گدازه‌های اوسن همراه با توف‌های مربوط هستند که در منطقه انارک - خور گسترش بالایی دارند. ترکیب سنگ‌شناختی گدازه‌ها شامل بازالت، آندزیت، تراکی‌آندزیت و داسیت است. این سنگ‌های آتشفشانی، سن اوسن زیرین تا بالایی دارند. سن‌سنجی به روش K-Ar سن آندزیت‌ها را ۵۳ میلیون سال نشان داده است (Ykovenko et al., 1981). سنگ‌های بخش‌های بالایی تشریر (نوژن) در مناطق کم‌ارتفاع، میان کوه‌ها تشکیل شده‌اند و شامل تناوب ماسه‌سنگ و مارن گچ‌دار هستند. در این منطقه توده‌های نفوذی با ترکیب گرانیت - گرانودیوریت، مونزونیت تا دیوریت، واحدهای سنگی منطقه (از پراکامبرین - تا اوسن) را تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۱)؛ که به‌طور چیره، زمانی پس از اوسن (اوسن بالا - الیگوسن) دارند. مجموعه نفوذی گرانیتی - مونزوسیستی مس - مولیبدن‌دار کالکافی نیز از آشکارترین چهره‌های این توده‌های نفوذی با زمان اوسن بالایی است. در منطقه کالکافی، دایک‌های بسیاری (با ترکیب گرانیت پورفیری، گرانودیوریت پورفیری و مونزونیت پورفیری) معمول و متداول هستند (شکل ۱). توده‌های نفوذی نیمه‌ژرف کوچک و دایک‌های آندزیتی، داسیتی، آندزیت - داسیتی و دیوریت پورفیری با سنگ‌های آتشفشانی

بررسی‌های دقیق‌تر رفتار اکسیدهای اصلی در این کانی آشکارکننده شباهت رفتاری FeO با Fe_2O_3 و TiO_2 یا Al_2O_3 است (شکل ۶).

با توجه به الگوی ناحیه‌بندی گارنت ۷- c، از آن نقشه پرتو X تهیه شد. بر خلاف شکل BSE، در نقشه پرتو X به‌دست آمده از این گارنت پیچیدگی ترکیبی چندانی دیده نمی‌شود. همان‌گونه که در شکل‌های ۸-a و d دیده می‌شود، نقشه Ca و Mn این گارنت بدون هرگونه تغییر بوده و به‌صورت کاملاً یکنواخت است. در شکل ۸-c، محتوای Mg در این کانی تغییرات جزئی نشان می‌دهد و بیشتر تغییرات متعلق به عنصر آهن است که در مرکز کانی دارای تهی‌شدگی بوده و به‌صورت نوار ورشده‌ی در حاشیه و با مرز ناگهانی، غنی‌شدگی نشان می‌دهد (شکل ۸-b).

۷- سازوکار تشکیل گارنت در سامانه اسکارنی

به‌طور کلی تغییر سیال در هنگام رشد، نشر و تراوش سیال در بلور از عوامل به‌وجود آورنده ناحیه‌بندی در گارنت‌ها هستند. ساختمان منطقه‌بندی که در زمان رشد به‌وجود می‌آید ناشی از تغییرات پیوسته و ناپیوسته در ترکیب سیال‌هایی است که در حین رشد با سطوح بلوری کانی در تماس هستند. به‌عبارت دیگر می‌توان آن را به پدیده تفریق در طول رشد کانی نسبت داد. بیشتر این نوع ناحیه‌بندی در درجات پایین تا متوسط دگرگونی دیده می‌شود.

ساختمان منطقه‌ای گارنت در اثر تراوش، در شرایط حضور سیال‌های دارای عناصر قابل جایگزین با عناصر موجود در گارنت ایجاد می‌شود. این نوع ساختمان منطقه‌ای وابسته به توزیع درزه‌ها و شکستگی‌ها در بلور و سنگ است (Hwang et al., 2003). جوشش معمولاً سبب اکسید شدن سیال باقیمانده و افزایش نسبت $\text{aFe}^{3+}/\text{aAl}^{3+}$ و در پایان تمرکز بالای عضو انتهایی آندرادیت در محلول جامد می‌شود. گارنت‌هایی که در فاصله زمانی میان دوره جوشش رشد می‌کنند، میزان گروسولار بالاتری در سری محلول جامد دارند. در این زمان، فوگاسیته اکسیژن به وسیله مجموعه کانی‌های محلی پایین نگه داشته می‌شود و میزان Fe^{3+} در ترکیب سیال به دلیل کاهش فوگاسیته اکسیژن پایین می‌آید. کانی‌های زونه، به‌طور پیوسته می‌توانند تکامل فیزیکو‌شیمیایی سامانه‌های گرمایی را در الگوی ناحیه‌بندی خود ثبت کنند. (Jamtveit (1991 بیان می‌دارد که سامانه دوتایی گروسولار- آندرادیت، به‌تغییرات کم در ترکیب سیال‌های گرمایی حساس هستند. بر پایه یافته‌های (Jamtveit et al. (1993 و Gaspar et al. (2008 و با توجه به شکل ۹، سازوکار تشکیل گارنت‌های زونه را به این صورت می‌توان خلاصه کرد که جوشش مهم‌ترین عامل به حرکت درآورنده سیال‌های گرمایی و منشأ تغییرات ترکیبی رخ داده در کانی‌های اسکارن است. در این اسکارن‌ها رشد گارنت همزمان با دوره‌های جوشش بوده است. جوشش سبب اکسایش مایع باقیمانده شده است و افزایش سریع اکتیویته Fe^{3+} را نسبت به Al^{3+} به‌دنبال دارد که پیامد آن ته‌نشست سریع آندرادیت است. به‌علت تحریک‌پذیری پایین عناصر شدت میدان بالا (HFSE) همچون Al، گارنت‌های با ترکیب گروسولار در دوره‌های میان جوشش رشد می‌کرده است. در این زمان سرعت رشد آهسته بوده و Al مورد نیاز از انحلال کانی‌هایی همچون پلاژیوکلاز و آمفیبول تأمین می‌شده است. بنابراین با توجه به ترکیب گارنت‌های اسکارن مورد بررسی که دارای هسته گروسولاری و حاشیه با ترکیب گروسولار- آندرادیتی هستند، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که عامل مؤثر در افزایش محتوای آندرادیت در این گارنت‌ها، رخداد جوشش بوده است.

گارنت‌های مورد مطالعه در بیشتر موارد تغییرات ترکیب را از مرکز به‌سوی حاشیه نشان می‌دهند (هسته غنی از گروسولار و حاشیه غنی تر از آندرادیت نسبت به هسته) و نیز تک بلور مطالعه شده (شکل ۷-c)، ناحیه‌بندی نوسانی همراه با تغییرات کوچکی در ترکیب را نشان می‌دهد. در واقع تکرار این روندهای مشخص نشان از آن است که تغییرات ترکیب سیال در هنگام رشد سبب ایجاد ناحیه‌بندی در گارنت‌های مورد

آغاز می‌شود. در این مرحله کانی‌های شکل گرفته در مرحله پیش مورد هجوم سیال‌ها قرار می‌گیرند و دگرسان می‌شوند. همچنین گروهی از کانی‌ها از جمله گارنت‌های نسل دوم، فلوگوپیت، وزویانیت خود می‌توانند به‌طور مستقل در این مرحله تشکیل شوند. در پایان در مراحل آخر تکامل سامانه اسکارنی، کانی‌های تأخیری تالک، اپیدوت و سرپانتین شکل گرفته‌اند (درویش، ۱۳۹۰).

۶- سنگ‌نگاری گارنت

گارنت یکی از مهم‌ترین و فراوان‌ترین کانی‌های سازنده این اسکارن است. این کانی از دید شکل، ویژگی‌های نوری و رنگ گوناگونی فراوانی در این سنگ‌ها دارد و بررسی مقاطع نازک تهیه شده از این اسکارن، نشان‌دهنده حضور چند نوع گارنت متفاوت در آن است. این گارنت‌ها در ابعاد مختلف (کمتر از ۰/۵ میلی‌متر تا در حدود ۲ میلی‌متر) از انواع بی‌رنگ، زرد تا قهوه‌ای پررنگ، همسان‌گرد تا ناهمسان‌گرد، رگه‌ای تا توده‌ای و بی‌شکل تا شکل‌دار تغییر می‌کنند (شکل ۴). برخی از این بلورها ناحیه‌بندی دارند ولی در بیشتر موارد بدون ناحیه‌بندی هستند.

دو کانی گارنت و پیروکسن در اسکارن‌ها معمولاً کانی‌های شاخص اسکارن‌سازی هستند. در این سنگ، ۸۲ نقطه گارنت و ۶۷ نقطه پیروکسن مورد تجزیه میکروپروپ قرار گرفته و همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود، شیمی عناصر اصلی این کانی‌ها نشان داده شده است. کلینوپيروكسن‌ها غنی از منیزیم هستند و ترکیب دیوپسیدی دارند. گارنت‌های مورد بررسی ترکیب گسترده‌ای از محلول جامد گروسولار- آندرادیت (گرانادیت) دارند و در چند مورد محتوای Fe^{2+} , Mg, Mn, Cr آنها افزایش نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول ۲ و شکل ۵ دیده می‌شود، همه این گارنت‌ها به‌جز ۲ نقطه، دارای محتوای پیروپ در حدود ۲ تا ۲/۵ درصد هستند که این می‌تواند به‌دلیل بالا بودن Mg در سنگ کربناتی مادر این اسکارن باشد. این گارنت‌ها ترکیب به نسبت یکنواختی دارند. با توجه به شکل‌های ۶، ۷ و ۸-b تنها تغییر ترکیبی دیده شده در این گارنت‌ها، افزایش نسبی محتوای آندرادیت به سوی حاشیه گارنت است.

فرمول ساختاری گارنت بر پایه ۱۲ اکسیژن محاسبه شده و نتایج تجزیه الکترون میکروپروپ گارنت اسکارن منطقه خونی در جدول ۲ آورده شده است. نتایج به دست آمده از اعضای انتهایی در نمودار سه‌تایی آندرادیت- گروسولار- آلماندین+ اسپسارتین+ پیروپ+ اواریت نشان داده شده است (شکل ۵) تا محدوده ترکیبی گارنت‌های منطقه مشخص شود. گارنت‌های مورد مطالعه از دید ترکیب شیمیایی شامل درصد بالایی از گروسولار (۵۴/۳۱ تا ۸۶/۸۹ درصد)، مقادیر کمتر آندرادیت (۱۰/۴۵ تا ۴۲/۳۳ درصد) و مقادیر ناچیزی اسپسارتین، پیروپ هستند و محتوای آلماندین و اواریت در آنها در حد صفر است (جدول ۲). با بررسی ترکیب شیمیایی بلورهای گارنت در مرکز و حاشیه، تغییرات منظمی در میزان اکسیدهای Al_2O_3 و Fe_2O_3 دیده شد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است میزان Al_2O_3 در مرکز بیشتر و در حاشیه‌های کانی کمتر است. این حالت برای Fe_2O_3 وارون است و در حاشیه گارنت مقدار آن از مرکز بیشتر است. مقدار MnO و MgO (اسپسارتین و پیروپ) تغییرات مشخصی در مرکز و حاشیه نشان نمی‌دهند. البته به‌طور تیبیک ترکیب گارنت‌های اسکارن، از هسته به سوی حاشیه، به سوی ترکیبات ساب‌کلسیک‌تر زونه پیش می‌رود. برای حضور گارنت ساب‌کلسیک در یک اسکارن، حالت اکسایش به نسبت پایین، اکتیویته بالای یون منگنز و اکتیویته پایین یون کلسیم در سیال تشکیل‌دهنده اسکارن لازم است (Newbery, 1983). درصد اکسیدهای SiO_2 و CaO تغییرات چندانی ندارد و دو اکسید Fe_2O_3 و Al_2O_3 نوسانات مشخص‌تری نشان می‌دهند. این نوسانات به‌صورت عکس یکدیگر است یعنی در بخش‌هایی که Al_2O_3 افزایش یافته، Fe_2O_3 کاهش نشان می‌دهد و بالعکس.

- بررسی نیمرخ عناصر اصلی شرکت کننده در گارنت‌های متعلق به زیرپهنه آگرواسکارنی در این سامانه اسکارنی، آشکارکننده افزایش نسبی محتوای آندرادیت در این گارنت‌ها به سوی حاشیه کانی است. به عبارت دیگر این گارنت‌ها دارای هسته غنی از گروسولار هستند که محتوای آندرادیت آنها به سوی حاشیه افزایش نشان می‌دهد.

- تغییر در ترکیب سیال در طول رشد گارنت به‌طور موقتی موجب افزایش فشار بخشی اکسیژن و افزایش محتوای آهن در سیال تأخیری و در نتیجه افزایش درصد آندرادیت در محلول جامد گارنت شده است.

- این پدیده می‌تواند بیانگر نقش عوامل خارجی (از جمله جوشش) در مراحل پایانی تکامل این سامانه اسکارنی باشد.

سپاسگزاری

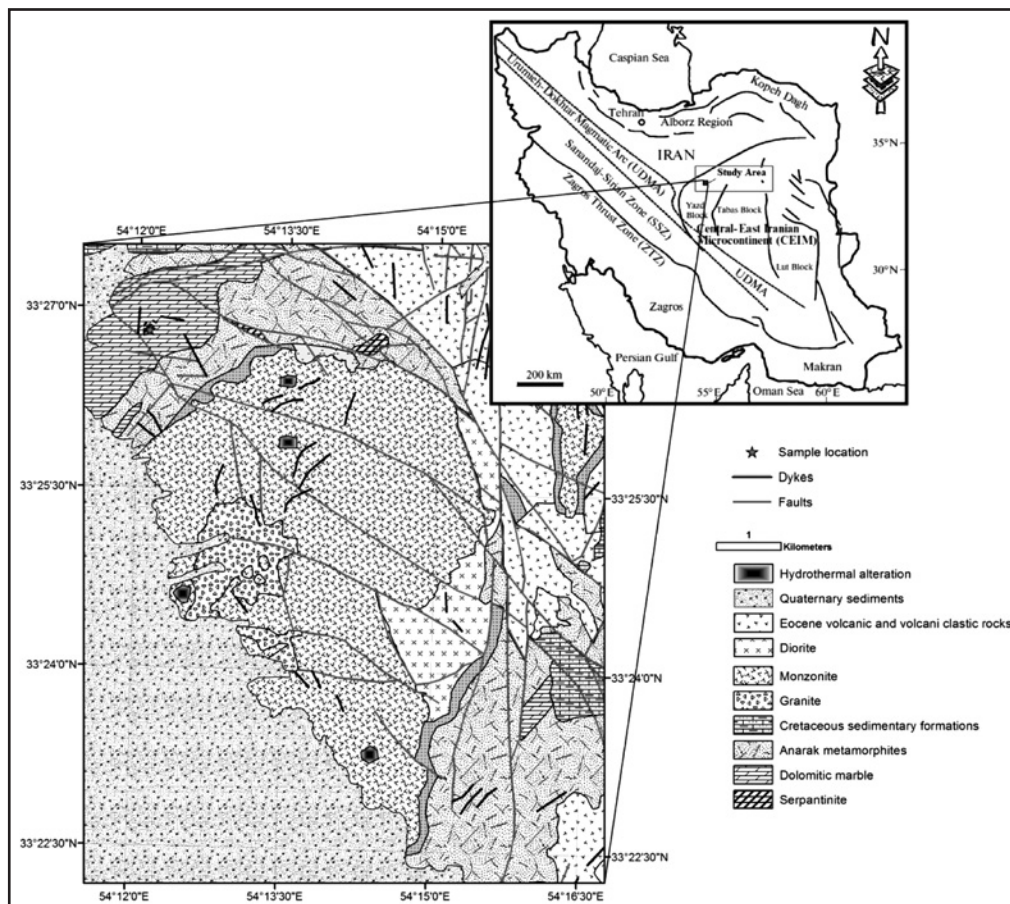
این پژوهش از پایان‌نامه دکترای نگارنده اول استخراج شده و از دید مالی مورد حمایت گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان بوده است. بدین وسیله از جناب آقای پروفیسور Massonne رئیس انستیتو مینرال شیمی دانشگاه اشتوتگارت برای همکاری در تجزیه مایکروپروب و انجام X-Ray Map سپاسگزاری ویژه می‌شود. از نقطه نظرات سازنده داوران محترم فصلنامه علوم زمین برای هر چه پربارتر شدن محتوای این پژوهش نیز سپاسگزاری می‌شود.

مطالعه شده است. مطالعات (1993) Jamtveit et al. روی کانی‌های تعادلی (پاراژنز کانی‌ها) و سیال‌های درگیر گارنت‌های زونه نشان داده است که هسته و حاشیه این گارنت‌ها در دمای مشابه رشد کرده‌اند و بنابراین دما به تنهایی عامل ایجاد الگوی ناحیه‌بندی در گارنت‌های در حال رشد نیست. الگوی ناحیه‌بندی گارنت‌ها در نتیجه تغییر ترکیب سیال گرمایی در محل تشکیل گارنت و یا از فرایندهایی که در نزدیکی سطوح رشد بلور رخ می‌دهد حاصل می‌شود. ترکیب سیال‌های پراکنده منافذ و شکاف‌ها به وسیله عوامل خارجی (تراوش) و داخلی (تجزیه کانی‌های موجود در سنگ) کنترل می‌شود.

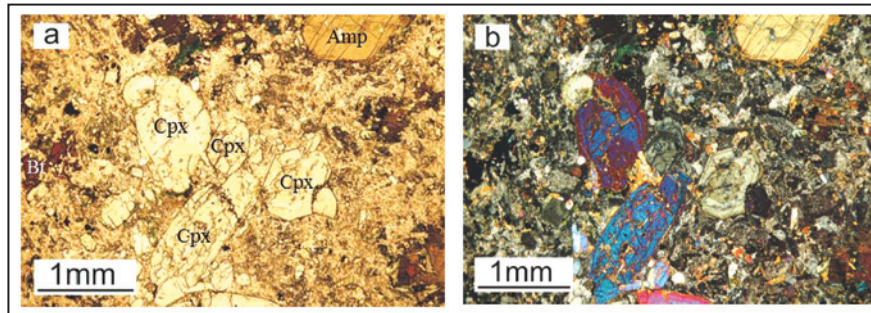
با توجه به آنچه در بالا گفته شد و با توجه به این که الگوی هسته غنی‌تر از گروسولار نسبت به حاشیه غنی‌تر از آندرادیت تقریباً در همه بلورهای گارنت تجزیه شده تکراری است، می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه‌بندی در گارنت‌های منطقه حاصل از تغییر ترکیب سیال در هنگام رشد بلور گارنت است. در زمان‌هایی که دوره میان جوشش رخ داده، میزان عضو انتهایی گروسولار افزایش یافته است و در فاصله میان آن، عضو انتهایی آندرادیت بیشتر شده است. با ورود برخی از یون‌ها چون آهن و منیزیم به سیال‌های گرمایی و یا از منشأ سنگ مادر کربناتی (دولومیت‌ها)، محتوای پیروپ (یا آلماندین) در برخی از گارنت‌ها تغییر می‌کند.

۸- نتیجه‌گیری

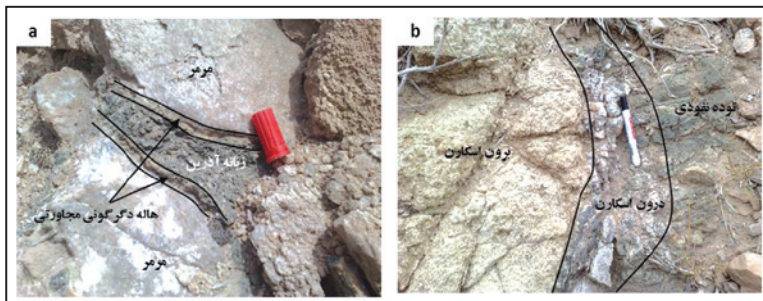
- سامانه اسکارنی خونی، در نتیجه همبندی زبانه‌های منشأ گرفته از توده نفوذی کالکافی، با واحد مرمر-دولومیتی لاخ به‌طور محلی ایجاد شده است.



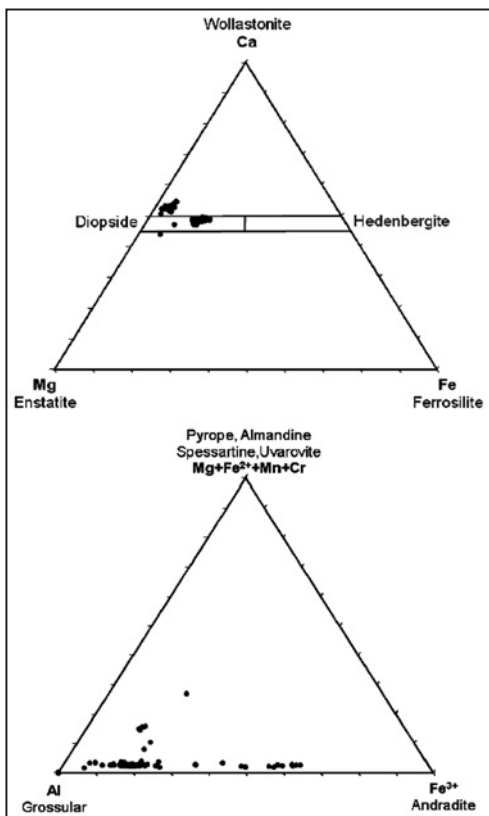
شکل ۱- نقشه ساده شده از منطقه. برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کیودان (Tecnoexport, 1984) همراه با موقعیت اسکارن مورد بررسی.



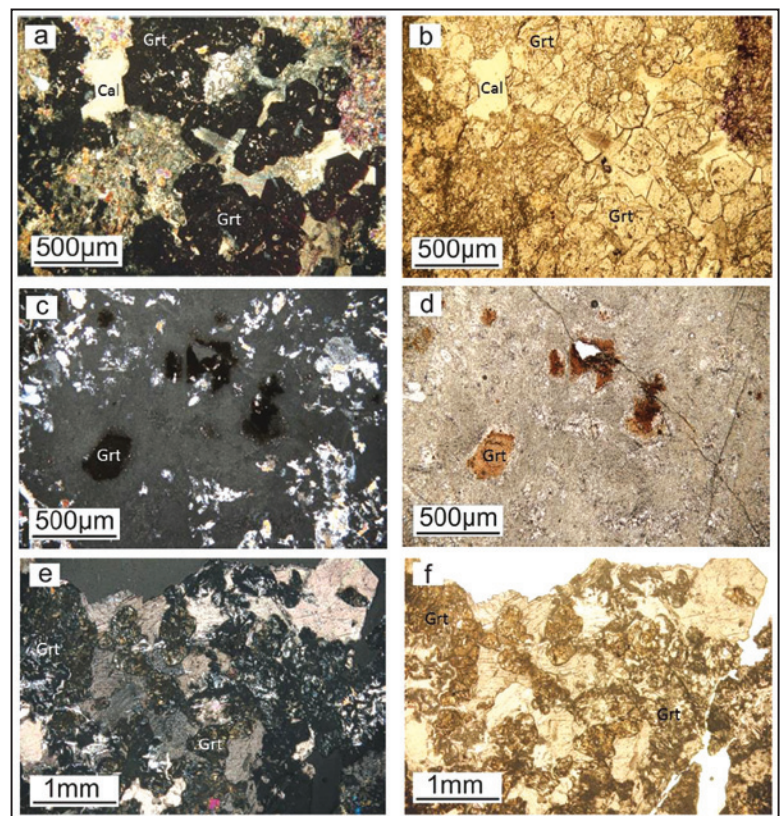
شکل ۲- دایک‌های مونزونیتی- کوارتز مونزونیتی مادر اسکارن خونی، زمینه این سنگ‌ها را پلاژیوکلاز و ارتوکلاز دگرسان شده ریزبلور همراه با ریزبلورهای پیروکسن و آمفیبول تشکیل داده است. بلورهای پورفیری کلینوپیروکسن به صورت خودشکل و خوشه‌ای در این سنگ‌ها به فراوانی دیده می‌شوند. پورفیرهای خودشکل آمفیبول نیز در این سنگ‌ها فراوانی خوبی دارند ولی فراوانی آنها کمتر از پیروکسن هاست. در زمینه سنگ ورقه‌های بیوتیت به صورت منفرد و یا در حاشیه آمفیبول دیده می‌شود. در مواردی این کانی‌ها خود به کلریت و کانی‌های کدر دگرسان شده‌اند. (مخفف نام کانی‌ها برگرفته از (Whitney & Evans (2010).



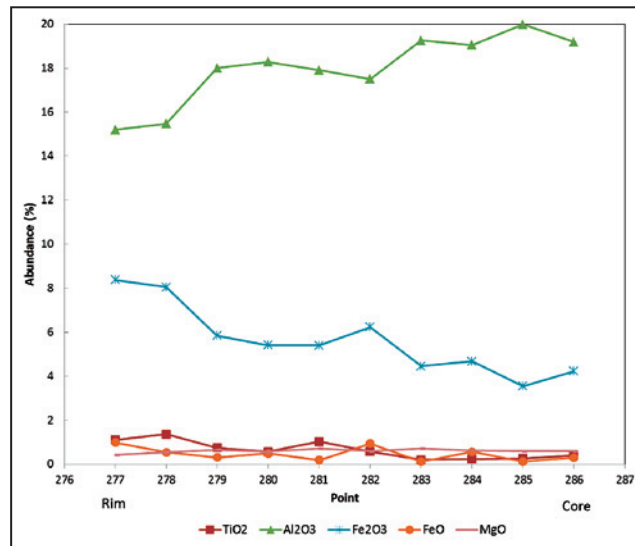
شکل ۳- (a) گسترش هاله کوچک مقیاس اسکارنی در اثر نفوذ زیانه آذرین به درون مرمر؛ (b) گسترش بزرگ مقیاس درون اسکارن و برون اسکارن در مجاورت توده نفوذی.



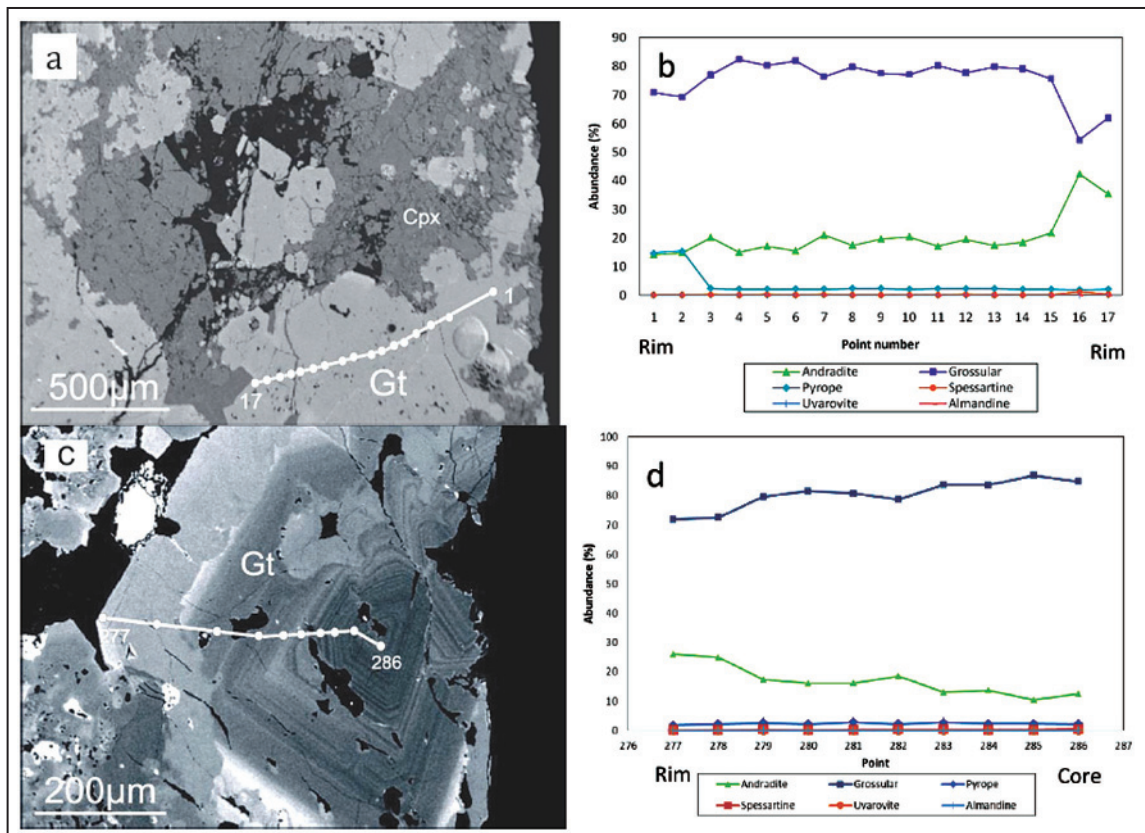
شکل ۵- تصویر اعضای پایانی گارنت (سمت چپ) و پیروکسن (سمت راست) موجود در اسکارن خونی، گارنت‌ها بیشتر ترکیب گروسولار- آندرادیتی دارند و پیروکسن‌ها به دو گروه ترکیبی مجزا با ترکیب دیوپسید و نزدیک به دیوپسید تقسیم شده‌اند.



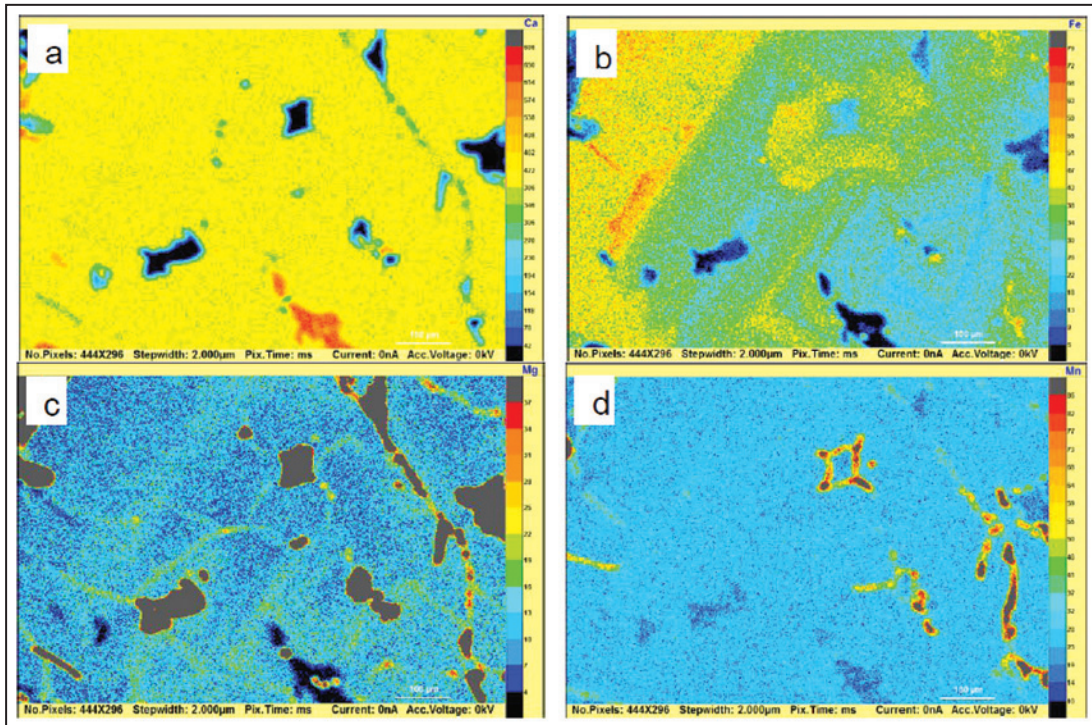
شکل ۴- انواع گارنت‌های دیده شده در اسکارن مورد بررسی، (a و b) گارنت‌های خودشکل، بی‌رنگ و همسان‌گرد دارای ادخال‌های کوچک کلسیت، (c و d) گارنت‌های خودشکل، قهوه‌ای رنگ و همسان‌گرد؛ (e و f) گارنت‌های نیمه‌شکل‌دار، زرد رنگ و تقریباً ناهمسان‌گرد (مخفف نام کانی‌ها برگرفته از (Whitney & Evans (2010).



شکل ۶- نیمرخ چند اکسید اصلی گارنت مورد بررسی (شکل ۷- c)، Fe_2O_3 و Al_2O_3 ناحیه‌بندی نوسانی مشخصی را از حاشیه به مرکز به نمایش می‌گذارند و رفتاری مخالف یکدیگر دارند. FeO رفتاری مشابه با Fe_2O_3 دارد. TiO_2 برخلاف Fe_2O_3 و همانند Al_2O_3 رفتار کرده و MgO دارای روند به نسبت یکنواختی در طول کانی است.

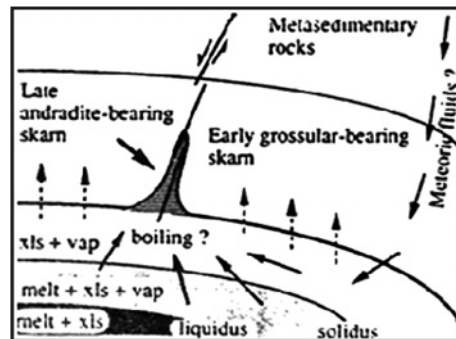


شکل ۷- تصویر BSE و نیمرخ تجزیه شده از دو نمونه گارنت از یک سنگ. همان‌گونه که دیده می‌شود، هر دو گارنت با وجود تفاوت در تصویر BSE، دارای الگوی اعضای پایانی به نسبت همانندی هستند. در هر دو نمونه، با حرکت از هسته گارنت به سوی حاشیه، گروسولار کاهش و در برابر آن آندرادیت افزایش یافته است.



شکل ۸- الگوی تمرکز عناصر Ca, Fe, Mg و Mn به دست آمده از گارنت توسط دستگاه الکترون میکروپروپ CAMECA SX 100.

شکل ۹- مدل ارائه شده توسط Jamtveit et al. (1993) در مورد چگونگی تشکیل آندرایت-گروسولار در اسکارن. Xls: فاز جامد، vap: فاز سیال غنی از آب.



جدول ۱- روابط پاراژنتیکی کانی‌ها در اسکارن خونی.

کانی‌ها	مرحله دگرگونی - بی‌متاسوماتیسم	دگرسانی برکنشی		
		مرحله پیش‌رونده	مرحله پس‌رونده	
			پس‌رونده پیشین	پس‌رونده پسین
کلینوپیروکسن				
گارنت (گراندیت)				
الیون				
اسپیتل				
فلوگوپیت				
وزووینایت				
سربانتین				
تالک				
ایدوت				
کانی‌های تیره				
کلسیت				
کوارتز				
کلریت				
اسفن				

کتابنگاری

- آفانباتی، م. ع.، ۱۳۸۵- زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی منابع کشور، چاپ دوم، ۵۸۶ ص.
- احمدیان، ج.، هاشم امامی، م.، قربانی، م. و لطفی، م.، ۱۳۸۳- معرفی گرانیتوئیدهای پتاسیک در مجموعه ولکانوپلوتونیک کالکافی (شمال خاور انارک) و نحوه تشکیل آنها. بیست و سومین گردهمایی علوم زمین شناسی، سازمان زمین شناسی کشور.
- باباخانی، ع.، مهرپرتو، م.، رادفر، ج. و مجیدی، ج.، ۱۳۷۶- مطالعات زمین شناسی و اکتشاف مقدماتی در منطقه کالکافی - خونی جهت طلا و سایر فلزات همراه، شرکت توسعه علوم زمین، ۱۱۱ ص.
- درویش، م.، ۱۳۹۰- مطالعات کانی شناسی و خاستگاه اسکارن خونی - انارک (شمال خاور نایین، استان اصفهان)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۱۲۰ ص.
- رساء، ا.، نظام پور، م. ه. و لیاقت. س.، ۱۳۸۴- مطالعه کانه سازی طلا در رگه های اکسیدی منطقه ی خونی - انارک، بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین شناسی، سازمان زمین شناسی کشور.
- رنجبر، س.، ۱۳۸۸- پژوهش های سنگ شناسی و کانی شناختی اسکارن های منطقه کالکافی (شمال خاور انارک، استان اصفهان)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۱۳۵ ص.
- شرکت مهندسی مشاور کان آذین، ۱۳۸۴- گزارش زمین شناسی، معدنی و لیتوژئوشیمیایی ۱:۵۰۰۰ جهت اکتشاف طلا در منطقه خونی، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۳۴۷ ص.

References

- Allegre, C. J., Provost, A. & Jaupart, C., 1981- Oscillatory zoning: a pathological case of crystal growth. *Nature* 294, 223-228.
- Auwers, J. V. & Andre, L., 1991- Trace elements (REE) and isotopes (O, C, Sr) to characterise the metasomatic fluid sources: evidence from the skarn deposit (Fe, W, Cu) of Traversella (Ivrea, Italy). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 106: 325-339.
- Bernhardt, H. J., Massonne, H. J., Reinecke, T., Reinhardt, J. & Willner, A., 1995- Digital element distribution maps, an aid in pathological investigations. (*Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft*), Beihefte zum *European Journal of Mineralogy* 7: 28.
- Burt, D. M., 1977- Mineralogy and petrology of skarn deposits. *Rendiconti Societa Italiana di Mineralogia e Petrologia* 33(2): 859-873.
- Chakraborty, S. & Ganguly, J., 1991- Compositional zoning and cation diffusion in garnets, in *Diffusion, atomic ordering and mass transport, selected topics in geochemistry*, V. 8, edited by J. Ganguly, Springer-verlag, New York, 567 pp.
- Fleet, M. E., Seller, M. H. & Pan, Y., 1997- Rare earth elements, protoliths and alteration at the Hemlo Gold deposit, Ontario, Canada, and comparison with argillic and sericitic alteration in the Highland Valley Porphyry district, British Columbia. *Economic Geology* 92: 551-568.
- Gaspar, M., Knaack, C., Meinert, L. D. & Moretti, R., 2008 - REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit. *Geochimica et cosmochimica acta* 72(1): 185-205.
- Giuliani, G., Cheilletz, A. & Mechiche, M., 1987- Behavior of REE during thermal metamorphism and hydrothermal infiltration associated with skarn- and vein-type tungsten orebodies in Central Morocco. *Chemical Geology* 64: 279-294.
- Haase, C. S., Chadam, J., Feinn, D. & Ortoleva, P., 1980- Oscillatory zoning in plagioclase feldspar. *Science* 209: 272-274.
- Holten, T., Jamtveit, B., Meakin, P., Cortini, M., Blundy, J. & Austrheim, H., 1997- Statistical characteristics and origin of oscillatory zoning in crystals. *American Mineralogist* 82(5): 596-606.
- Hwang, S. I., Shen, P., Yui, T. F. & Chu, H. T., 2003- On the mechanism of resorption zoning in metamorphic garnet. *Metamorphic Geology* 21: 761-769.
- Jamtveit, B., 1991- Oscillatory zonation patterns in hydrothermal grossular-andradite garnet. *Nonlinear dynamics in regions of immiscibility. American Mineralogist* 76: 1319-1327.
- Jamtveit, B., Ragnarsdottir, K. V. & Wood, B. J., 1995- On the origin of zoned grossular-andradite garnets in hydrothermal systems. *European Journal of Mineralogy* 7(6): 1399-1410.
- Jamtveit, B., Wogelius, R. A. & Fraser, D. G., 1993- Zonation patterns of skarn garnets: Records of hydrothermal system evolution. *Geology* 21(2): 113-116.
- Kato, Y., 1999- Rare Earth Elements as an Indicator to Origins of Skarn Deposits: Examples of the Kamioka Zn-Pb and Yoshiwara-Sannotake Cu (-Fe) Deposits in Japan. *Resource Geology* 49(4): 183-198.
- L'Heureux, I. & Fowler, A. D., 1994- A nonlinear dynamical model of oscillatory zoning in plagioclase. *American Mineralogist* 79, 885-891.
- Ling, Q. & Liu, C., 2003- Geochemical behaviors of REE and other trace elements during the formation of strata-bound skarns and related deposits: A case study of the Dongguashan Cu (Au) deposit, Anhui Province, China. *Acta Geologica Sinica* 77(2): 246-257
- Lipin, B. R. & McKay, G. A., 1989- Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. In *Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy* 21.
- Lottermoser, B. G., 1992- Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews* 7: 25-41.
- Massonne, H. J., 2012- Formation of amphibole and clinozoisite-epidote during exhumation of eclogite in a subduction channel. *Journal of Petrology* 53: 2115-2138.

- Newbery, R. J., 1983- The formation of subcalcic garnet in scheelite-bearing skarns. *Canadian Mineralogist* 21: 529-544.
- Ortoleva, P., 1990- Role of attachment kinetic feedback in the oscillatory zoning of crystals grown from melts. *Earth Science Reviews* 29: 3-8.
- Shore, M. & Fowler, A. D., 1996- Oscillatory zoning in minerals: A common phenomenon. *Canadian Mineralogist* 34: 1111-1126.
- Simakin, A. G., 1983- A simple quantitative model for rhythmic zoning in crystals. *Geokhimiya* 12: 1720-1729.
- Smith, M. P., Henderson, P., Jeffries, T. E. R., Long, J. & Williams, C. T., 2004- The rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn an Dubhaich Aureole, Skye, Scotland, UK: constraints on processes in a dynamic hydrothermal system. *Journal of Petrology* 45(3): 457-484.
- Technoexport, 1984- Geological map of Kabudan: Geological survey of Iran, 1:100000 series, sheet 68. 1:250000, No. H7.
- Wang, Y. & Merino, E., 1992- Dynamic model of oscillatory zoning of trace elements in calcite: Double layer, inhibition, and self-organization. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56: 587-596.
- Whitney, D. L. & Evans, B. W., 2010- Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist* 95(1): 185-187.
- Yardley, B. W. D., Rochelle, C. A., Barnicoat, A. C. & Lloyd, G. E., 1991- Oscillatory zoning in metamorphic minerals: an indicator of infiltration metasomatism. *Mineralogical Magazine* 55: 357-365.
- Ykovenko, V., Chinakov, I., Kokorin, Y. & Krivyakin, B., 1981- Report on geological prospecting in Anarak area (Kal-e Kafi- Khuni locality). V/O Technoexport, Rep. No. 13, Moscow, 239 p.

Mineralogy of Garnet in Khuni Skarn, Northeast of Anarak, Isfahan Province: Evidences for a Hydrothermal System Evolution

S. Ranjbar ^{1*}, S. M. Tabatabaei Manesh ² & M. A. Mackizadeh ²

¹ Ph. D. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Received: 2014 January 18

Accepted: 2015 March 01

Abstract

The Khuni skarn has been developed in the contact between small tongues of the Late Eocene-Oligocene I-type Kal-e kafi granitoidic intrusive body and the Precambrian Lakh marble-dolomite unit, located 220 km northeast of Esfahan in the Central Iran structural zone. Skarnification could be divided into two subzones: endoskarn and exoskarn. There is no significant mineralization in relation to this skarn system. The extent of the endoskarn subzone is very limited (often from 2 mm to 2 cm), but the exoskarn has the most extension across the contact. The endoskarn subzone can be recognized by formation of euhedral garnets adjacent to the carbonate part. In the immediate vicinity of the endoskarn, the exoskarn subzone initiates with formation of garnet and clinopyroxene in the carbonates and is extended far away from the contact as represented by vesuvianite and phlogopite minerals. Garnet is one of the most abundant minerals in this skarn system and is found in different sizes and forms. In this paper, the zonation pattern of garnet crystals in the exoskarn subzone in the immediate vicinity of intrusive body is investigated. These garnets are mainly euhedral and isotropic and in some cases anhedral and anisotropic. They are commonly cored by a grossular-rich inner part, and a sharp considerable increase in their andradite content is found toward the rim in most cases. Most studies on skarn systems consider boiling to be the most important cause for this phenomenon. This means that boiling increases the Fe content and oxygen fugacity in the final stages of the system evolution, which consequently increases the andradite content of garnet in its solid solution.

Keywords: Mineralogy, Garnet, Contact metamorphism, Hydrothermal system, Khuni skarn.

For Persian Version see pages 173 to 182

*Corresponding author: S. Ranjbar; E-mail: Saeideh.ranjbar@gmail.com