



زمین شیمی عناصر کمیاب خاکی و شیمی کانی گارنت در اسکارن‌های منطقه دره‌ی زرشک (جنوب غرب یزد)

فرید مَر، صالح دیمر*، بتول تقی پور

بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

(دریافت مقاله: ۹۰/۱۰/۱، نسخه نهایی: ۹۱/۳/۲۷)

چکیده: گارنت فراوانترین کانی کلسیمی-سیلیکاتی اسکارن‌های دره‌ی زرشک را تشکیل می‌دهد و به شکل توده‌ای بی‌وجه تا دانه‌ای خوش وجه، همسانگرد تا ناهمسانگرد و با منطقه‌بندی نوسانی تا قطعی یا بدون هر نوع منطقه‌بندی دیده می‌شود. بر اساس مشاهدات کانی‌شناختی و روابط پاراژنتیکی، این کانی در مرحله‌ی دگرنهادی پیشرونده تشکیل شده است. این کانی دو الگوی متفاوت: (۱) غنی‌شدگی در LREEs نسبت به HREEs به همراه بی‌هنجاری مثبت و بالای Eu، و (۲) غنی‌شدگی در HREEs نسبت به LREEs همراه با بی‌هنجاری اندک Eu را از خود نشان می‌دهد که به ترتیب سرشتی ترکیب‌های آندرادیتی و گراسولاری است. بررسی با میکروسکوپ ریزکاونده‌ی الکترونی (EPMA) نشان می‌دهد که ترکیب گارنت‌های دره‌ی زرشک در گستره‌ی گارنت‌های گراندایتی قرار می‌گیرند و از نوع آندرادیت-گراسولار هستند و تنها حاوی درصد کمی اسپسارتین و پیروپاند و از این نظر ترکیبی مشابه با گارنت‌های اسکارن‌های مس، آهن و طلای جهان دارند.

واژه‌های کلیدی: گارنت؛ اسکارن؛ REE؛ میکروسکوپ ریزکاونده‌ی الکترونی؛ دره‌ی زرشک؛ جنوب غربی یزد؛ ایران.

مقدمه

شناخته می‌شوند و معمولاً دارای نسبت بالایی از Lu/Hf و Sm/Nd هستند و همین ویژگی، آن‌ها را به ابزاری مفید در بررسی‌های زمین شیمیایی تبدیل کرده است [۱]. انتظار می‌رود با توجه به تنوع ترکیبی گارنت‌ها که در بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری به خوبی دیده می‌شود، این کانی بازتاب‌های متفاوتی از روند عناصر نادر خاکی را به نمایش بگذارد. هدف از این پژوهش بررسی این الگوها و ارتباط آن‌ها با نوع گارنت است. گرچه انتظار می‌رود با توجه به نوع اسکارن-های منطقه، گارنت‌ها ترکیبی گراندایتی داشته باشند، ولی شناسایی ترکیب دقیق گارنت‌ها و تعیین اجزای پایانی آن‌ها در جهت برآورد کیفی پتانسیل کانه زایی اسکارن‌ها نیازمند

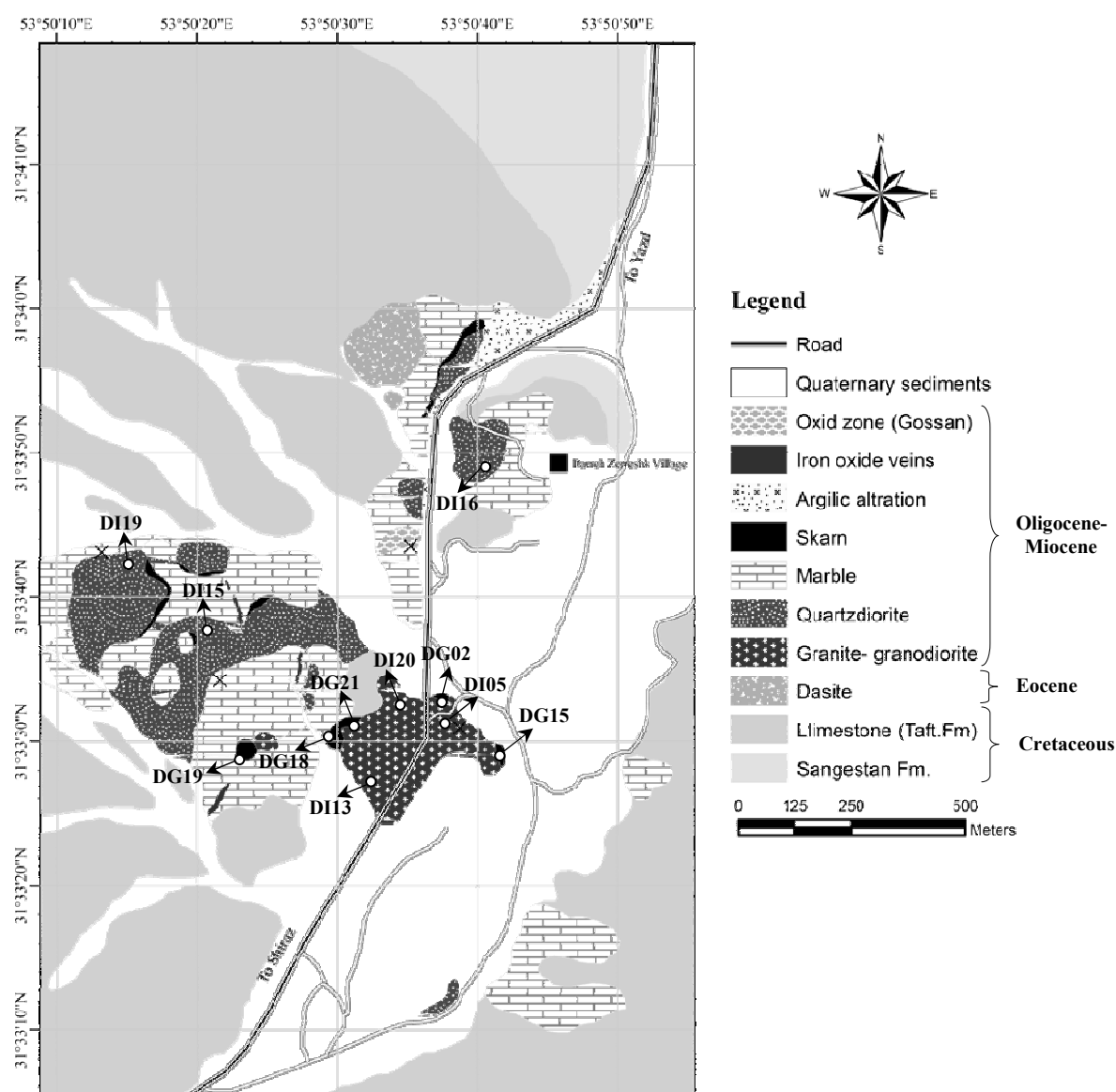
عناصر نادر خاکی به میزان گسترده‌ای و به عنوان ردیاب‌های زمین شیمیایی در فرایندهای زمین‌شناسی، به ویژه در سامانه‌های ماگمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی‌های گسترده‌ای بر روی کانی‌های REE دار (نظیر آلانیت و مونازیت) و کانی‌های دیگری که به عنوان انباشتگر عناصر REE شناخته می‌شوند (نظیر تیتانیت، آپاتیت و زیرکن) انجام گرفته است ولی توجه کمتری به گارنت‌ها و بویژه گارنت‌های سامانه‌های اسکارنی شده است که اتفاقاً از سازهای اصلی این سنگ‌ها هستند شد [۱]. گارنت‌ها به عنوان کانی‌های تفکیک کننده‌ی عناصر نادر سنگین (HREE) از عناصر نادر سبک (LREE)

ساختی متأثر از عبور گسل دهشیر- بافت و شاخه‌های فرعی وابسته به آن است که نقشی اساسی در پیدایش و تکامل سامانه پورفیری- اسکارن منطقه داشته اند [۴]. اسکارن دره زرشک، در جنوب غربی استان یزد و در گستره‌ی جغرافیایی $37^{\circ} 50' 53''$ طول شرقی و $31^{\circ} 33' 30''$ عرض شمالی و در کمربند تکتونوماگمایی ارومیه- دختر واقع شده است. کهن-ترین واحد سنگ‌شناختی منطقه، سازند آواری سنگستان به سن کرتاسه پیشین است که در زیر سنگ‌های آهکی سازند تفت به سن کرتاسه میانی تا بالایی قرار دارد (شکل ۱).

استفاده از آنالیز دقیق ریز کائوده‌ی الکترونی (EPMA) است، زیرا بر اساس بررسی‌های انجام شده، ترکیب گارنت می‌تواند به عنوان نشانگر کانه زایی مس در اسکارن‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۲].

زمین‌شناسی منطقه

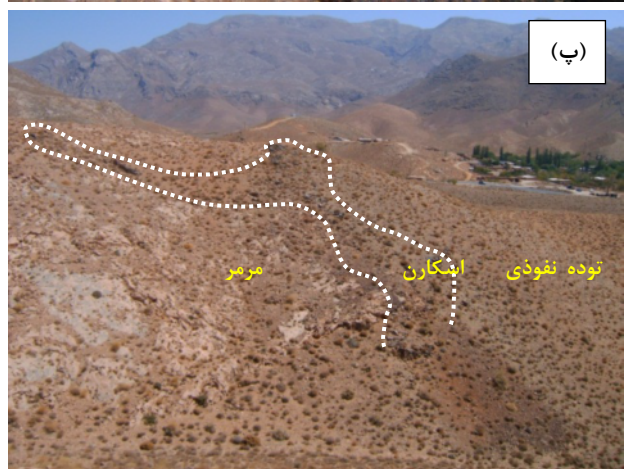
فعالیت‌های ماگمایی گسترده در کمربند تکتونوماگمایی ارومیه- دختر منجر به تزریق توده‌های نفوذی متعدد طی دوران سنوزوئیک در راستای این کمربند و در نتیجه در موارد زیادی مانند سونگون، مزرعه [۳]، دره زرشک و خوت [۴] سبب اسکارن زایی شده است. این منطقه به لحاظ زمین



شکل ۱ نقشه زمین‌شناختی منطقه دره زرشک و موقعیت اسکارن‌ها و نمونه‌ها روی آن.

صحرائی و بررسی‌های میکروسکوپی اسکارن دره زرشک شامل دو زون درون اسکارن به صورت محدود و برون اسکارن به میزان گسترده است. برون اسکارن، زون اصلی اسکارنی و کانسنگی اسکارن دره زرشک است. معمولاً همبری برون اسکارن با مرمر تیز و ناگهانی (Sharp) (شکل ۲ الف) ولی با توده‌ی نفوذی مشخص تا تدریجی است، ضمن اینکه زبانه‌هایی از توده‌ی نفوذی درون جبهه اسکارنی مشاهده می‌شوند (شکل ۲ ب). منطقه‌بندی سنگ‌شناختی و کانی‌شناختی مشخصی در جهت دور شدن از توده‌ی نفوذی مشاهده می‌شود که به ترتیب شامل توده‌ی نفوذی، اسکارن گارنت، اسکارن اپیدوت (به‌صورت خیلی محدود)، مرمر و سنگ آهک است (شکل ۲ پ). کانه‌زایی آهن به‌صورت نواری (رگه‌ای) در راستای شکستگی‌های بزرگ درون مرمرهای میزبان (شکل ۲ ت) دیده می‌شود.

قدیمی‌ترین واحد آذرین در منطقه داسیت‌های ائوسن [۴] هستند که به شکل گنبد‌های زیر آتشفشانی (Subvolcanic) در واحدهای رسوبی منطقه نفوذ کرده‌اند. نفوذ استوک پورفیری دره‌ی زرشک، که خود میزبان کانه‌زایی مس پورفیری است، با ترکیب گرانیت-گرانودیوریت-کوارتزیدیوریت در سازند آهکی تفت سبب پیدایش سنگ‌های دگرگونی مجاورتی با ترکیب مرمر، هورنفلس کلسیمی-سیلیکاتی و اسکارن در زمان الیگو-میوسن [۴] شده است. در اثر نفوذ این سنگ‌های آذرین انواع دگرسانی در سنگ‌های رسوبی و آذرین منطقه پدید آمده است. در مجموعه سنگ‌های آذرین منطقه دره زرشک طیف وسیعی از دگرسانی‌ها دیده می‌شود. مهم‌ترین این دگرسانی‌ها شامل دگرسانی‌های پتاسیکی، کوارتز-سرستی (فیلیک)، آرژلیک و پروپیلیتیک هستند [۴]. اسکارن‌های این منطقه دارای گسترش نسبتاً وسیعی هستند و به‌طور گسترده‌ای دارای ساخت توده‌ای هستند (شکل ۲ الف، ب). بر اساس شواهد



شکل ۲ الف) مرز توده‌ی نفوذی با اسکارن، ب) همبری تیره میان اسکارن و مرمر، پ) همجواری توده‌ی نفوذی، اسکارن و مرمر، ت) رگه اکسید آهن (مگنتیت + هماتیت) در مرمر.

روش بررسی

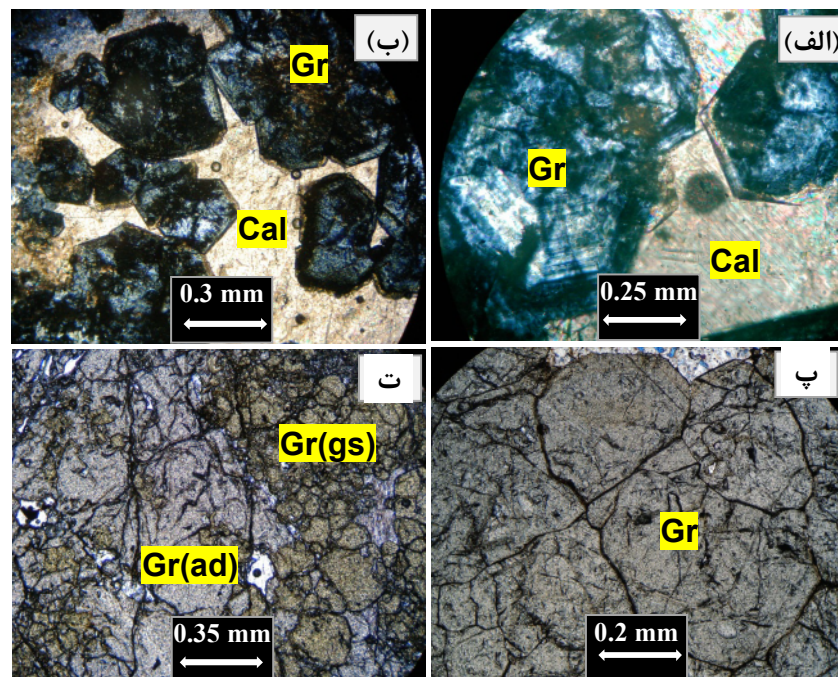
در این پژوهش بررسی‌های سنگ‌شناختی و کانی‌شناختی با استفاده از روش‌های رایج بررسی مقاطع نازک در نور گذرا صورت گرفته است. تجزیه کمی (WDS) (جدول ۲) و کیفی (EDS) (شکل ۱۰) عناصر اصلی کانی گارنت با استفاده از میکروسکوپ ریزکاونده الکترونی مدل Cameca SX100 ساخت فرانسه و در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران انجام شده است. ولتاژ و جریان مورد استفاده در این آنالیز به ترتیب برابر 12kv و 10nA بوده است. برای تعیین غلظت عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های گارنت، دانه‌های ریز گارنت خالص با استفاده از میکروسکوپ دوچشمی (روش Hand pick) جدا شده و پس از اسید شویی با اسید کلریدریک رقیق (برای از بین بردن ناخالصی‌های احتمالی مانند کلسیت) برای تعیین غلظت عناصر کمیاب خاکی به آزمایشگاه SGS کانادا فرستاده شد و به روش تجزیه‌ای ICP-MS عناصر مورد نیاز آن‌ها اندازه‌گیری شدند (جدول ۱). داده‌های REE توده‌ی نفوذی نیز برای مقایسه با گارنت‌ها، به روش مشابه ICP-MS و در آزمایشگاه SGS کانادا اندازه‌گیری شدند (جدول ۱).

سنگ‌نگاری اسکارنها

بر اساس بررسی‌های کانی‌شناختی و روابط پاراژنزی، حداقل سه مرحله اصلی در پیدایش اسکارن‌های منطقه دره‌ی زرشک تشخیص داده شدند: (۱) مرحله دگرگونی هم شیمیایی - دو دگرنهادی (Bimetasomatism): این مرحله همزمان با جای-گیری توده‌ی نفوذی در سنگ‌های کربناتی سازند تفت آغاز شده است. در این مرحله جریان گرمایی ناشی از توده سبب دگرگونی هم شیمیایی سنگ‌های اطراف و تبدیل آن‌ها به مرمر و هورنفلس شده است. وجود ناخالصی در سنگ کربناتی اولیه (کانی‌های رسی، سیلیس و ...) به تشکیل سیلیکات‌های کلسیمی دو دگرنهادی از جمله گارنت، پیروکسن و اپیدوت در شرایط هم شیمیایی شده است. (۲) مرحله‌ی دگرسانی دگرنهادی پیشرونده: شواهد این مرحله از دگرسانی دگرنهادی پیدایش کانی‌های کلسیمی - سیلیکاتی بی‌آب (گارنت نوع گراندایت و کلینوپیروکسن نوع دیوپسید - هدربرگیت) با بافت-های معرف اسکارن پیشرونده مانند بافت‌های دانه‌ای (شکل ۳ الف، ب)، موزائیکی (شکل ۳ پ) و توده‌ای (شکل ۳ ت) است.

جدول ۱ نتایج تجزیه عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های گارنت و توده نفوذی به روش ICP-MS.

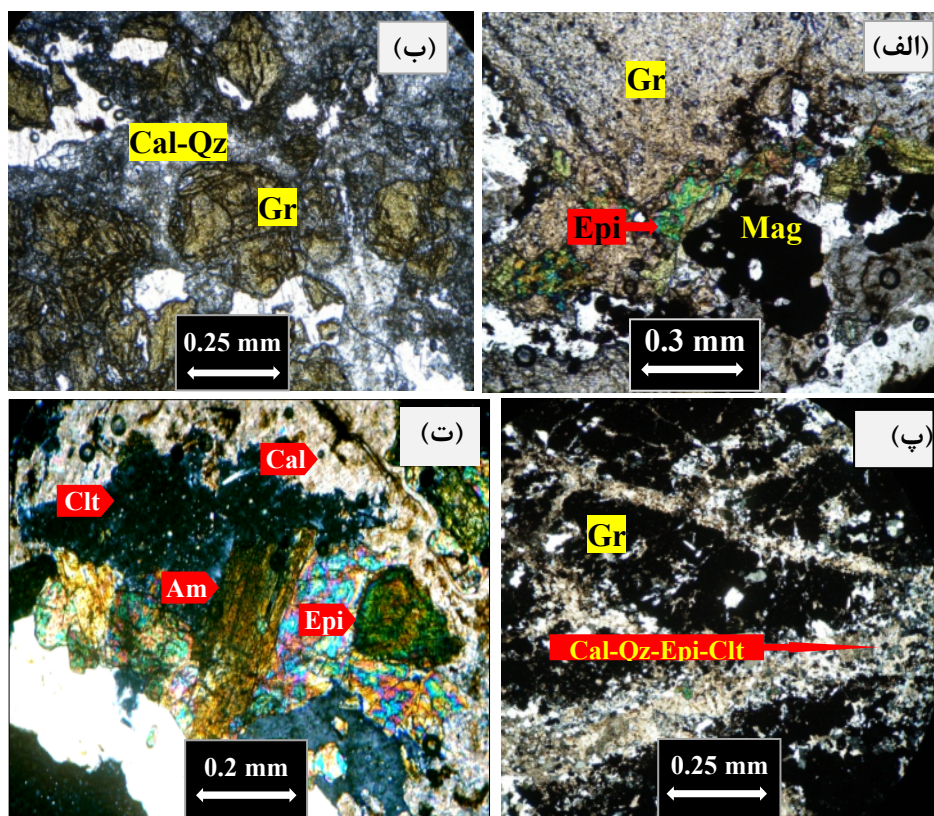
Sample no.:	DG02	DG15	DG18	DG19	DG21	DI20	DI19	DI16	DI15	DI13	DI05
Sample type	Garnet					Igneous					
La (ppm)	۲۱,۳	۰,۹	۰,۵	۰,۶	۹,۱	۳۲,۳	۲۲,۱	۱۸,۵	۲۶,۶	۲۲,۴	۲۰
Ce	۸۲,۸	۱۷,۶	۱,۲	۱,۵	۱۶,۸	۵۷,۹	۳۹,۸	۳۳,۱	۴۹,۱	۳۹,۴	۳۳,۶
Pr	۷,۹۳	۲,۱۷	۰,۳۴	۰,۳۷	۲	۶,۵۲	۴,۵۸	۳,۸۴	۵,۶۲	۴,۵۸	۴,۱۲
Nd	۱۷,۲	۸,۵	۲,۶	۳	۷,۵	۲۴,۶	۱۷,۶	۱۴,۸	۲۲	۱۷,۶	۱۵,۴
Sm	۱,۱	۱,۸	۱,۷	۱,۸	۱,۷	۴,۱	۳,۲	۲,۴	۳,۸	۳,۳	۲,۸
Eu	۰,۷۳	۰,۵۲	۰,۵۴	۰,۶۹	۰,۵۷	۱,۰۵	۰,۸۳	۰,۶۸	۱,۰۵	۰,۷۹	۰,۶۶
Gd	۰,۴۹	۱,۵۷	۲,۴۵	۲,۷۶	۱,۸۷	۲,۹۷	۲,۲۵	۱,۷۱	۲,۹۴	۲,۴۵	۲,۱۵
Tb	۰,۰۷	۰,۲۳	۰,۵۱	۰,۵۹	۰,۳۳	۰,۳۳	۰,۳۲	۰,۲۴	۰,۴۳	۰,۳۳	۰,۲۹
Dy	۰,۳۹	۱,۳۵	۳,۳۳	۴,۰۷	۲,۰۷	۱,۹۴	۱,۷۵	۱,۱	۲,۳۹	۱,۸	۱,۵۴
Ho	۰,۰۸	۰,۲۶	۰,۷۴	۰,۹۵	۰,۴۶	۰,۳۳	۰,۳۵	۰,۲۲	۰,۴۹	۰,۳۵	۰,۲۸
Er	۰,۱۹	۰,۶۳	۲,۴۳	۲,۸۵	۱,۴۶	۰,۹۲	۱,۰۳	۰,۶۶	۱,۴۹	۰,۹۵	۰,۸۷
Tm	۰,۰۵	۰,۰۸	۰,۳۶	۰,۴۶	۰,۲۲	۰,۱۳	۰,۱۵	۰,۰۸	۰,۲۱	۰,۱۴	۰,۱۱
Yb	۰,۳	۰,۵	۲,۵	۳	۱,۴	۰,۹	۱	۰,۷	۱,۴	۰,۸	۰,۷
Lu	۰,۰۷	۰,۱۰	۰,۳۸	۰,۵۱	۰,۲۱	۰,۱۱	۰,۱۳	۰,۰۹	۰,۲۳	۰,۱۴	۰,۰۹



شکل ۳ رخداد گارنت در اسکارن دره‌ی زرشک؛ (الف) منطقه‌بندی نوسانی و ماکل پروانه‌ای در گارنت (XPL)؛ (ب) بلورهای گارنت ناهمسانگرد خوش وجه با منطقه‌بندی نوسانی و پروانه‌ای در زمینه‌ی کلسیت (XPL)؛ (پ) بافت موزائیکی ناشی از رشد تعادلی بلورهای خوش وجه گارنت با زوایای بین بلوری ۱۲۰ درجه (PPL)؛ (ت) درهم رشدی گارنت آندرادیتی با گارنت گراسولاری (PPL). علائم اختصاری: Gr: گارنت، Cal: کلسیت، Gr(g): گارنت گراسولاری، Gr(ad): گارنت آندرادیتی.

اسکارن دره‌ی زرشک در نمودار شکل ۵ آورده شده‌اند. بر اساس شواهد سنگ نگاری، نهشت کانه‌ها در اسکارن دره‌ی زرشک با شروع مرحله‌ی دگرسانی پسروده آغاز شده است به‌طوری که مگنتیت به‌صورت پرکننده‌ی فضای خالی بین بلورهای گارنت (شکل ۶ الف) و پیروکسن و در مواردی به صورت توده‌ای جانشین گارنت شده است. هماتیت در پی تشکیل مگنتیت و بر اثر دگرسانی پسروده کانی‌های اولیه اسکارنی (گارنت) (شکل ۶ ب) و یا در ادامه از طریق جانشینی مگنتیت و کانی‌های سولفیدی مس (شکل ۶ پ) تشکیل شده است. پیریت، کالکوپیریت و بورنیت (شکل ۶ ت) کانه‌های سولفیدی شناسایی شده در اسکارن دره‌ی زرشک هستند که بیشتر در حفره‌ها و شکستگی‌های اسکارن اولیه دیده می‌شوند (شکل ۶ پ)، این نشان دهنده‌ی نهشت کانی‌های سولفیدی در مرحله‌ی دگرسانی پسروده و نقش عوامل ساختاری در نهشت آن‌هاست. پس از اسکارن‌زایی و کانه زایی همزمان با آن، کانی‌سازی اکسیدی (هماتیت-گوتیت)، سولفیدی (کالکوسیت و دیژنیت) و کربناتی مس (مالاکیت-آزوریت) نیز طی فرآیندهای برون‌زایی در اسکارن دره‌ی زرشک صورت گرفته است.

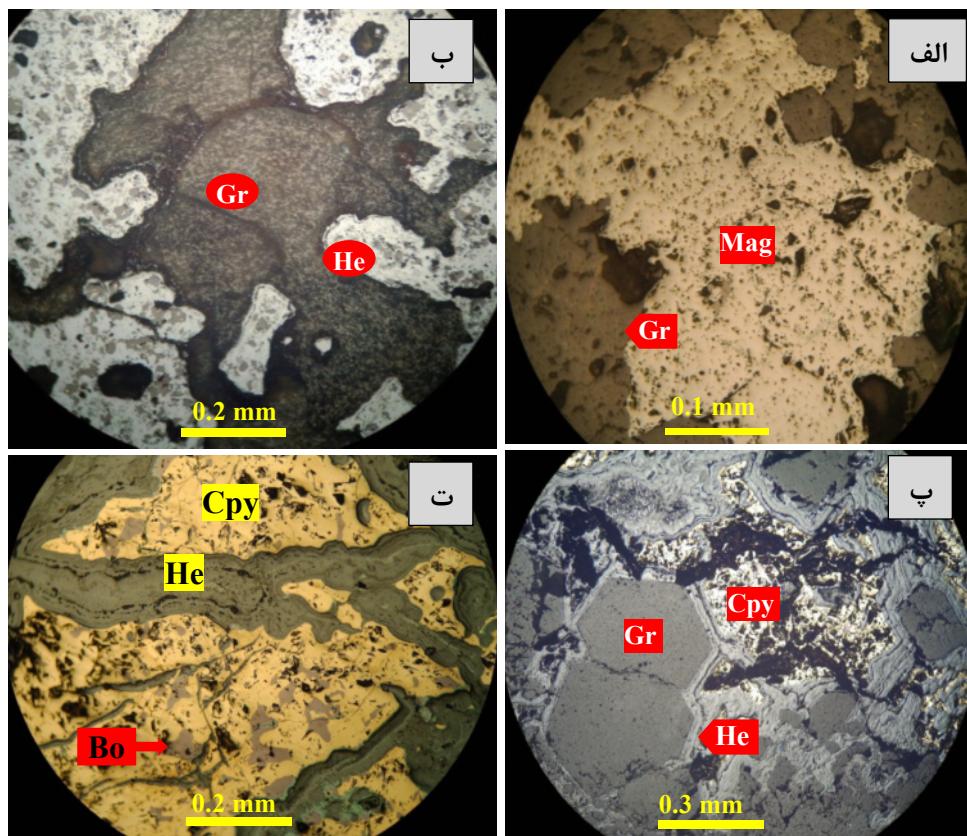
(۳) مرحله‌ی دگرسانی مخرب پسروده: در این مرحله در اثر برهمکنش گرماب با مجموعه‌های کلسیمی-سیلیکاتی مرحله-ی پیشرونده، حجم زیادی فازهای سیلیکاتی (کوارتز) و کلسیمی-سیلیکاتی آبدار (اپیدوت، ترمولیت-اکتینولیت) همراه با سولفیدها (پیریت، کالکوپیریت و بورنیت)، اکسیدها (مگنتیت و هماتیت) و کربنات‌ها پدید آمده‌اند. در اثر این دگرسانی مخرب، بافت اسکارن پیشرونده به شکل جزئی یا به‌طور کامل محو شده و بافت و آرایش جدیدی از کانی‌ها شکل گرفته‌اند که معرف اسکارن پسروده هستند. از جمله‌ی این بافت‌ها می‌توان به بافت‌های جانشینی مانند جانشینی گارنت به وسیله‌ی اپیدوت (شکل ۴ الف) و آمفیبول، برشی (شکل ۴ ب) و شکافه پرکن اشاره کرد. طی مرحله‌ی دگرسانی پسروده پسین بر اثر ورود شارهای با دمای نسبتاً پایین، مجموعه‌های کلسیمی-سیلیکاتی بی‌آب و آبدار پیشین به مجموعه‌های ریزدانه شامل کلریت، کلسیت، کوارتز و کانی‌های رسی دگرسان شده و بیشتر در مسیر شکستگی‌ها متمرکز شده‌اند (شکل ۴ پ). مرزهای جانشینی کلریت با اپیدوت و آمفیبول نشان می‌دهد که کلریت جانشین این کانی‌ها شده است (شکل ۴ ت). دنباله‌ی پاراژنزی مجموعه‌های کانیایی شناسایی شده در



شکل ۴ (الف) تشکیل مگنتیت و اپیدوت از راه جانشینی گارنت (PPL)؛ (ب) خردشدگی و سیمانی شدن گارنت به وسیله‌ی کوارتز و کلسیت در مرحله‌ی دگرسانی قهقرایی (PPL)؛ (پ) قطع اسکارن پیشرونده با رگچه‌های اسکارن قهقرایی (XPL)؛ (ت) تشکیل کلریت از راه جانشینی اپیدوت و آمفیبول در مرحله‌ی دگرسانی پسرونده (XPL)؛ (د) علایم اختصاری: Gr: گارنت، Mag: مگنتیت، Epi: اپیدوت، Cal: کلسیت، Qz: کوارتز، Clt: کلریت، Am: آمفیبول.

کانی ها		مرحله دگرگونی - بی متاسوماتیسم (I)	دگرسانی دگرنهادی و کانه زایی			مرحله دگرسانی برونزاد
			مرحله پیشرونده (II)	مرحله پسرونده		
				پسرونده پیشین (III)	پسرونده پسین (IV)	
سیلیکاتها	گارنت (گرانادایت)					
	دیوپسید-هیدنبرژیت					
	ترمولیت-اکتینولیت					
	اپیدوت					
	کلریت					
	کوارتز					
سولفیدها	پیریت					
	کالکوپیریت					
	بورنیت					
	کالکوسیت					
	دیژنیت					
اکسیدها	مگنتیت					
	هماتیت					
	گوئیتیت					
کربناتها	کلسیت					
	مالاکیت - آزوریت					

شکل ۵ نمودار دنباله‌ی پاراژنزی کانی‌های موجود در اسکارن دره زرشک.



شکل ۶ (الف) مگنتیت خوش وجه فضای میان بلورهای گارنت را پر کرده است (XPL)؛ (ب) جانشینی گارنت با هماتیت (XPL)، (پ) کالکوپیریت به شکل شکاف پرکن فضای بین بلورهای گارنت را پر کرده است و خود در مرحله ی بعد به وسیله هماتیت جانشین شده است (XPL)؛ (ت) درون رشدی کالکوپیریت با بورنیت، جانشینی کالکوپیریت با هماتیت با بافت کلونیدی (XPL). علایم اختصاری: Mag: مگنتیت، Gr: گارنت، He: هماتیت، Cpy: کالکوپیریت، Bo: بورنیت.

گراسولار نزدیک ترند. منطقه بندی کانیایی (نوسانی یا قطاعی) که یکی از ویژگی های روشن گارنت ها در ذخایر اسکارن است و استفاده زیادی در ارزیابی شرایط فیزیکوشیمیایی تکامل اسکارن ها دارد، و در گارنت های دره زرشک به فراوانی دیده می شود (شکل ۳ الف، ب).

بحث و بررسی

زمین شیمی عناصر کمیاب خاکی

بررسی الگوی عناصر کمیاب خاکی در گارنت ها کمک زیادی به شناخت فرایندهای شکل گرفته و تکامل شاردهای دگرتهادی می کند [۱]. جانشینی REE در ساختار گارنت با استفاده از ساختار و شیمی بلوری آن کنترل می شود. گارنت ها دارای فرمول شیمیایی عمومی $X_3Y_2Z_3O_{12}$ هستند. در این فرمول X شامل کاتیونهای دو ظرفیتی (Ca, Mg, Mn یا Fe^{2+})، با همارایی هشت تایی، Y شامل کاتیون های سه ظرفیتی (Fe^{3+} ، Al و

گارنت در بسیاری از مقاطع میکروسکوپی تنها کانی کلسیمی-سیلیکاتی تشکیل دهنده ی سنگ به شمار می آید و فضای بین بلورهای آن از کانی های غیر کلسیمی-سیلیکاتی مانند کوارتز یا کلسیت پر شده است (شکل ۳ الف، ب). بلورهای گارنت در مجموعه اسکارن های دره زرشک طیف وسیعی از شرایط بافتی و کانی شناختی را نشان می دهند (شکل ۳ الف، ب، پ، ت) و در اندازه های متفاوت بسیار ریز تا چند میلیمتر دیده می شوند. گارنت های نزدیک به همبری توده ی نفوذی به رنگ سرخ قهوه ای تا تیره و درشت بلور هستند و ناهمسانگردی شدید، ماکل قطاعی و منطقه بندی هم مرکز از خود نشان می دهند (شکل ۳ الف، ب) که بیشتر ترکیب آنداردیتی دارند، ولی گارنت های ریز بلور نزدیک به همبری مرمر، در نمونه های دستی به رنگ قهوه ای روشن و گاه سبز دیده می شوند، و دارای ناهمسانگردی متوسط و گاه همسانگرد هستند و به ترکیب

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته روی گارنت‌های گرانادیتی، گارنت‌های غنی در Al (گراسولاری) الگوی نوعی غنی شدگی در HREE و تهی‌شدگی در LREE همراه با بی‌هنجاری کوچک Eu را نشان می‌دهند. در مقابل گارنت‌های غنی در Fe (آندرادیتی) مجموع REE پایینی دارند و الگوی غنی شدگی در LREE و تهی‌شدگی در HREE همراه با بی‌هنجاری شدید و مثبت Eu را به نمایش می‌گذارند [۱].

الگوی REE نمونه‌های گارنت وابسته به اسکارن دره‌ی زرشک برداشت شده از زون‌های اسکارنی نزدیک به همبری توده‌ی نفوذی (گارنت‌های قهوه‌ای) و گارنت‌های نزدیک به همبری مرمر (گارنت‌های سبز تا سبز تیره) در شکل ۷ نشان داده شده. REE گارنت‌ها بر اساس مقادیر کندریت C1 [۸] بهنجار شده‌اند. چنانکه در شکل ۷ دیده می‌شود دو روند کاملاً متضاد در رفتار REE ها دیده می‌شوند: (۱) گارنت‌های با الگوی غنی‌شدگی در LREE و تهی‌شدگی در HREE و (۲) گارنت‌های با الگوی غنی‌شدگی در HREE و تهی‌شدگی در LREE. نمونه‌های DG18 و DG19 (شکل ۷) که در نمونه‌ی دستی به رنگ سبز دیده می‌شوند از اسکارن‌های دور از همبری توده و نزدیک به جبهه‌ی مرمر برداشت شده‌اند. این دو نمونه تهی‌شدگی در LREE و غنی‌شدگی در HREE را از خود نشان می‌دهند. این الگو از ویژگی گارنت‌های غنی در Al (گراسولاری) است [۱]. در مقابل نمونه‌های DG15، DG21 و DG02 (شکل ۷) که از اسکارن‌های نزدیک به همبری توده‌ی نفوذی برداشت شده‌اند و رنگ قهوه‌ای تیره داشته و در مقاطع نازک نیز ویژگی آندرادیتی داشته‌اند، الگوی متفاوت غنی‌شدگی در LREE و تهی‌شدگی در HREE را از خود به نمایش می‌گذارند. این گونه گارنت‌ها رفتاری مشابه با گارنت‌های غنی در Fe (آندرادیتی) دارند [۱]، بنابراین با توجه به شباهت روند REE ها ترکیب آندرادیتی دارند. از نظر بی‌هنجاری Eu، گارنت‌های آندرادیتی بی‌هنجاری مثبت و بالا (به ویژه نمونه‌ی DG02) و گارنت‌های گراسولاری این بی‌هنجاری را به شکل بسیار خفیف (مثبت یا منفی) نشان می‌دهند (شکل ۷)، این رفتار نیز به ترتیب بازتاب ویژگی گارنت‌های آندرادیتی و گراسولاری است [۱].

بنابراین با تلفیق عوامل موثر در پیدایش نوع گارنت، می‌توان گفت که گارنت‌های نزدیک به همبری توده به یاری

Cr) با همارایی هشت وجهی و Z بیشتر شامل Si با همارایی چهاروجهی است [۵]. عناصر جزئی و کمیاب خاکی نیز می‌توانند در ساختار بلوری گارنت‌ها حضور داشته باشند. بر اساس بررسی‌های بلور نگاری شیمیایی^۱ انجام شده روی گارنت، Ca^{2+} شعاع یونی مشابه با REE ها دارد، بنابراین، HRE ها به آسانی می‌توانند جانشین کاتیون Ca^{2+} در شبکه‌ی بلوری گارنت‌ها شوند [۶]. واکنش جانشینی گارنت گرانادیت به صورت زیر است [۱]:

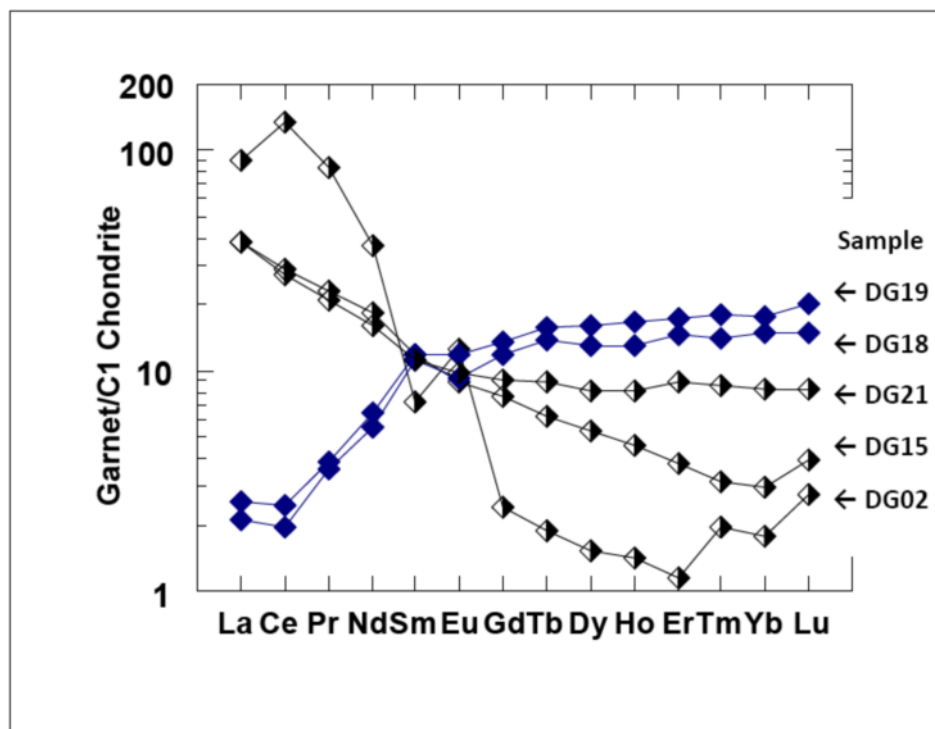
$$Ca_3(Al,Fe)_2Si_3O_{12} + 3REE^{3+}_{(aq)} + 3(Al^{3+}, Fe^{3+})_{(aq)} = (REE)_3(Al,Fe)_2(Al,Fe)_3O_{12} + 3Ca^{2+}_{(aq)} + 3Si^{4+}_{(aq)}$$

داده‌های ترمودینامیکی وابسته به سری محلول جامد گراسولار-آندرادیت، موید جانشینی ترجیحی HREE در گراسولار و LREE در ترکیبات آندرادیتی است [۱]. جزء به جزء شدگی^۲ و نهشت REE ها در گارنت‌ها می‌تواند در اثر تغییر شرایط دمایی، pH و یا ترکیب شاره، مانند زمانی که شاره‌های ماگمایی و جوی با هم در می‌آمیزند، رخ دهد [۷]. تفاوت در الگوهای REE ها را می‌توان صرف نظر از عواملی که ضریب جدایش عناصر REE بین گارنت و شاره‌ی دگرنهادی ($D_{REE}^{gr/fluid}$) را تغییر می‌دهند توضیح داد. به این ترتیب که اگر رشد گارنت به اندازه‌ی کافی سریع باشد ضریب ($D_{REE}^{gr/fluid}$) به دلیل جذب سطحی روی سطح کانی نزدیک ۱ خواهد بود، و در نتیجه الگوی REE ها مشابه گرماب خواهد بود [۱]، ولی اگر بین شاره و سنگ میزبان تعادل برقرار باشد گارنت‌ها از عناصر HREE تهی خواهند بود زیرا غلظت این عناصر در شاره به شدت پایین است. به‌طور کلی الگوی RRE ها در گارنت‌های اسکارنی تابع شیمی بلور، سرعت رشد بلور و تا حد زیادی تابع عوامل خارجی مانند ترکیب شیمیایی شاره و سنگ میزبان، نسبت شاره به سنگ و نوع دگرنهاد، یعنی پخشی^۳، یا فرارفتی^۴ است [۱]. بنابراین، تفسیر دقیق الگوی REE ها در گارنت‌های اسکارنی با در نظر گرفتن همه این عوامل امکان‌پذیر خواهد بود. تفاوت در بزرگی بی‌هنجاری‌ها (مثل بی‌هنجاری یوروپیم Eu/Eu^*) بازتاب ناهمگنی‌های محلی در سامانه‌ی (سنگ میزبان + دگرنهاد شاری) است [۱].

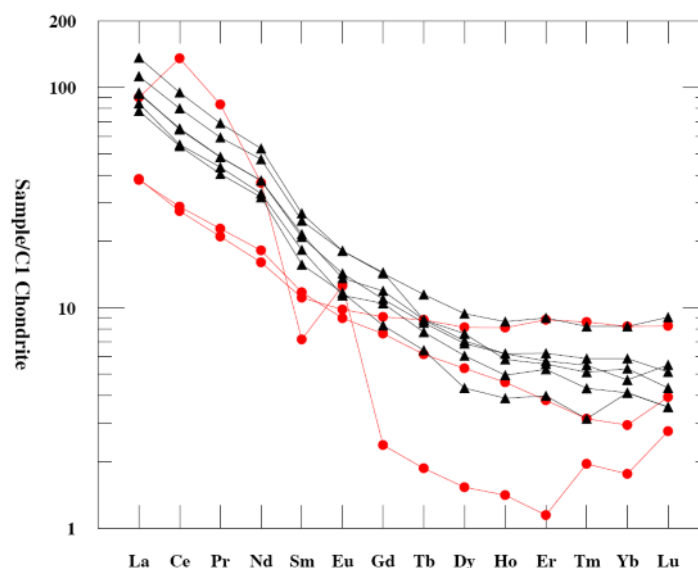
1. Chemicocrystallography
2. Fractionation
3. Diffusive
4. Advective

به وجود آمده‌اند و همین امر سبب شده است تا سامانه با شیمی سنگ میزبان (و نه شاره‌ی میانگر) بافر شود. تضاد روند REE این نوع گارنت‌ها با توده‌ی نفوذی نیز موید نقش پررنگ سنگ دیواره و همراهی‌های بالای گرماب با سنگ دیواره است. در چنین شرایطی دیگر نسبت شاره به سنگ بالا نبوده و Fe کافی در دسترس نخواهد بود، در نتیجه گارنت‌ها رشد آرامی داشته و ترکیبی گراسولاری خواهند داشت [۱]. گاسپار و همکارانشان [۱] در مطالعه‌ی مشابهی که روی REE گارنت‌های اسکارن طلای کرون چول (CrownJewel) در ایالت واشنگتن آمریکا انجام داده‌اند به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. ایشان دریافتند که گارنت‌های غنی در Al (گراسولاری) دارای الگوی غنی شدگی از HREE نسبت به LREE هستند و در نتیجه دگرنهادی پخشی در شرایطی که نسبت آب به سنگ دیواره پایین بوده وجود آمده‌اند در حالی که گارنت‌های آندرادیتی که الگوی غنی شدگی از LREE نسبت به HREE دارند، حاصل دگرنهادی نفوذی بوده و در شرایطی که تراوایی سنگ میزبان بر اثر فرایند شکنندگی (Fracturing) بالا رفته از شاره‌های با خاستگاه ماگمایی شکل گرفتند.

فرایند هیدروفراکچرینگ (Hydrofracturing) و حرکت رو به بالای توده‌ی نفوذی که سبب افزایش تراوایی سنگ دیواره می‌شده، و به این ترتیب حجم زیادی شاره در اختیار آن‌ها قرار می‌داده به سرعت رشد کرده باشند، و در شرایطی که نسبت شاره به سنگ دیواره بالا بوده از شاره‌های با خاستگاه ماگمایی (که طبیعتاً مقدار Fe بالایی دارند) طی دگرنهادی نفوذی (Infiltration metasomatism) نهشته شدند و لذا ترکیب آندرادیتی دارند. مقایسه‌ی الگوی عناصر کمیاب خاکی در این نوع گارنت‌ها با الگوی این عناصر در توده‌ی نفوذی دره‌ی زرشک نیز گویای شباهت الگوی رفتاری این عناصر در هر دو نمونه است، به‌طوری که مجموع REE ها در هر دو بالا و غنی شدگی عناصر کمیاب خاکی سبک (LREEs) نسبت به عناصر کمیاب خاکی سنگین (HREEs) مشاهده می‌شود (شکل ۸). بنابراین این دسته از گارنت‌ها، الگویی شبیه به REE گرمابه‌ای با خاستگاه ماگمایی دارند (با توجه به الگوی REE در توده‌ی نفوذی که طبیعتاً شاره‌ی حاصل از آن نیز دارای چنین ویژگی‌ای است). در مقابل گارنت‌های دور از همبری توده در اثر برهمکنش طولانی مدت شاره‌های منفذی، با سنگ‌های میزبان



شکل ۷ الگوی رفتاری عناصر کمیاب خاکی در گارنت‌های اسکارن دره‌ی زرشک. علائم اختصاری: DG02، DG15 و DG21 گارنت‌های با ترکیب آندرادیتی، DG18 و DG19 گارنت‌های با ترکیب گراسولاری.



شکل ۸ مقایسه‌ی الگوی عناصر کمیاب خاکی میان توده‌ی نفوذی (با علامت مثلث) و گارنت‌های با ترکیب آندرادیتی (با علامت دایره) در اسکارن دره‌ی زرشک (داده‌های مربوط در جدول ۱ آمده‌اند).

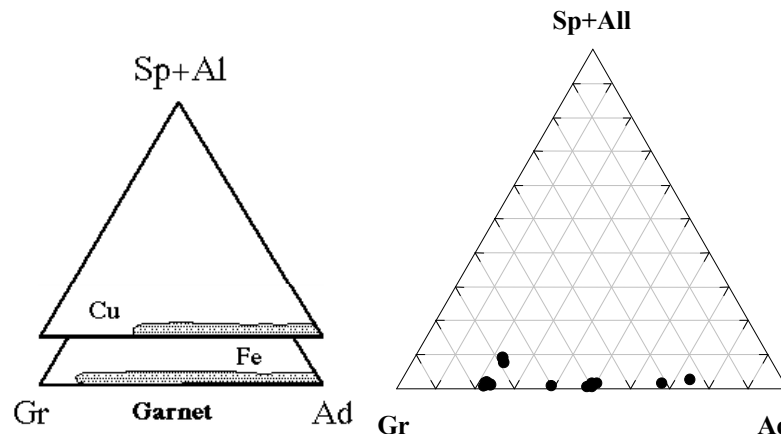
شیمی گارنت

شیمی گارنت‌ها در مجموعه‌ی اسکارنی با میکروسکوپ ریزپردازنده الکترونی تعیین شده است. برای این منظور پس از بررسی‌های میکروسکوپی و شناسایی بلورهای مناسب گارنت (هر دو نوع گارنت آندرادیتی و گراسولاری) تعداد دو مقطع نازک برای صیقل دادن و آماده‌سازی به مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران فرستاده شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌های بررسی شده تا حد امکان از انواع نادگران انتخاب شدند تا بتوانند برآورد دقیق‌تری از شیمی گارنت ارائه دهند. شش گونه اصلی گارنت وجود دارند که تحت عنوان اجزای پایانی^۵ شناخته می‌شوند: پیروپ ($\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)، آلماندین ($\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)، اسپسارتین ($\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)، گروسولار ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)، آندرادیت ($[\text{Ca}_3(\text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}]$) و اواروویت ($\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$). گونه‌ای آبدار نیز وجود دارد که هیدروگروسولار ($[\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{SiO}_4)_1\text{m}(\text{OH})_{4\text{m}}]$) نامیده می‌شود. در واقع بیشتر گارنت‌های سری‌های محلول جامدی از یک یا چند جزء پایانی هستند. براساس نمودار سه تایی گراسولار- آندرادیت- (اسپسارتین- آلماندین) که از طریق محاسبه اعضای پایانی به‌دست آمدند، گارنت‌های اسکارن دره‌ی زرشک در گستره‌ی گارنت‌های گراندایتی قرار می‌گیرند و از

نوع آندرادیت- گراسولار هستند و تنها درصد کمی اسپسارتین و پیروپ دارند (شکل ۹). محاسبه‌ی اعضای پایانی ۲۰ نقطه تجزیه انجام شده با میکروسکوپ ریزکاونده‌ی الکترونی نشان می‌دهد که ترکیب کانی‌شناختی گارنت‌ها از ۲۰ تا ۷۴ درصد آندرادیت، ۲۳ تا ۶۸ درصد گراسولار، تا ۱۱ درصد پیروپ و صفر تا ۱۰ درصد اسپسارتین تغییر می‌کند (جدول ۲). الگوی طیفی (طیف EDS) کانی گارنت نیز گویای ترکیب گراندایتی گارنت-های اسکارن دره‌ی زرشک است (شکل ۱۰). الگوی ترکیب کانی‌شناختی گارنت‌های اسکارن دره‌ی زرشک شبیه به اسکارن‌های مس، آهن و طلای جهان است [۹، ۱۰] (شکل ۱۰). بررسی منطقه‌بندی در گارنت‌های سری گراندایت می‌تواند راهنمای مفیدی برای شناخت سامانه‌ی تشکیل اسکارن باشد [۱۱]. بررسی‌های انجام شده روی همیافتی کانی‌ها و میانبرهای شاری در گارنت‌های با منطقه‌بندی نوسانی در اسکارن‌ها نشان می‌دهد که دمای تشکیل مرکز و حاشیه بلورهای گارنت شبیه به یکدیگر است، لذا دما نمی‌تواند عامل چنین پدیده‌ای هنگام رشد گارنت‌ها باشد [۱۲]. تغییرات دوره-ای فشار در اثر جنبش‌های گسلی و به ویژه حرکت‌های مستمر و ضربانی این جنبش‌ها می‌تواند سبب تغییرات دوره‌ای در حالت‌های جوشش و اکسایش گرمایی‌ها و در نتیجه نهشت دوره‌ای آندرادیت- گراسولار شود [۱۳]. شکل‌گیری سلول‌های

شاره‌های این سامانه‌ها شود. از آنجا که این آب‌های بیگانه متأثر از شرایط جوی سطحی زمین‌اند، لذا تغییرات دوره‌ای آن‌ها می‌تواند بر سامانه‌های گرمایی تأثیر گذارد [۱۴].

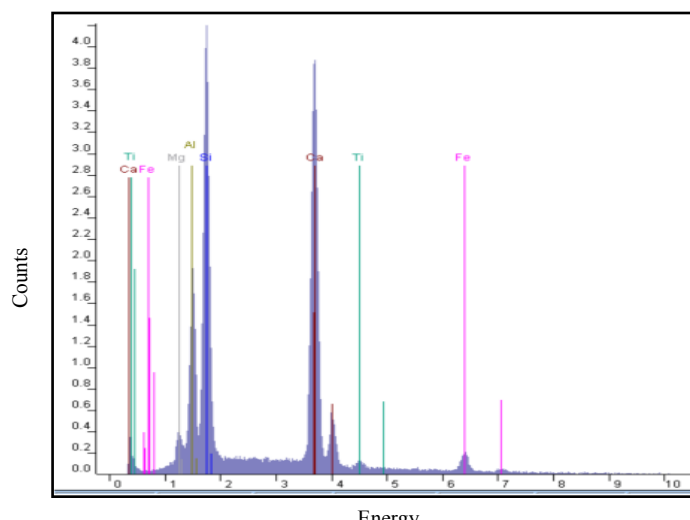
همرفتی نیز در اثر گردش آب‌های جوی در مجاورت توده‌های نفوذی و مشارکت این آب‌ها در سامانه‌های گرمایی می‌تواند سبب تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی (Eh, PH, T)



شکل ۹ نمودار توزیع ترکیب تجزیه‌های ریزکالندهی الکترونی گارنت‌های اسکارن دره‌ی زرشک و مقایسه آن‌ها با ترکیب گارنت‌های انواع نهشته-های اسکارنی [۱۱،۱۰]. علائم اختصاری: Gr: گراسولار، Ad: آندرادیت، Sp: اسپسارتین، Al: آلماندن.

جدول ۲ محاسبه فرمول ساختاری گارنت‌های دره‌ی زرشک بر اساس ۱۲ اتم اکسیژن.

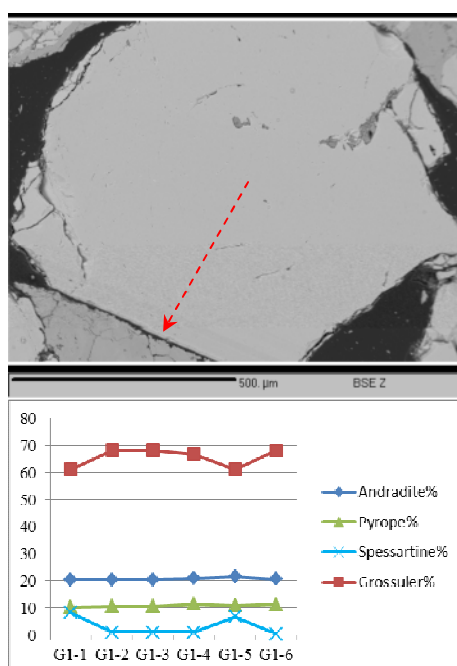
پیمایش	حاشیه → پیمایش ۱ → مرکز						حاشیه → پیمایش ۲ → مرکز						مرکز → پیمایش ۳ → حاشیه					
نمونه	G1-1	G1-2	G1-3	G1-4	G1-5	G1-6	G1-9	G1-10	G1-11	G1-12	G2-14	G2-15	G2-16	G2-17	G2-18	G2-19		
SiO ₂	۳۴٫۷۹	۳۴٫۸	۳۵٫۰۲	۳۵٫۲۲	۳۴٫۹۷	۳۵٫۱۹	۳۴٫۵۱	۳۴٫۳	۳۴٫۳۴	۳۴٫۱۲	۳۵٫۶۱	۳۵٫۱۵	۳۵٫۵۲	۳۵٫۱۸	۳۴٫۹۲	۳۵٫۰۳		
TiO ₂	۰٫۲۷	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۱٫۲۱	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۰٫۹۷	۰٫۷	۰٫۴۱	۰٫۶۵	۰٫۷۱	۲٫۰۹	۲٫۲۵	۲٫۲۶	۲٫۵۵	۲٫۷۳		
Al ₂ O ₃	۱۵٫۲۵	۱۵٫۲۸	۱۵٫۱۳	۱۵٫۱۱	۱۵٫۱	۱۴٫۹۶	۱۵٫۴۶	۱۵٫۳۶	۱۵٫۱۹	۱۵٫۲	۱۵٫۵۹	۱۰٫۰۲	۱۰٫۴۴	۱۰٫۱۲	۹٫۸۷	۹٫۸۲		
FeO	۴٫۳۸	۴٫۷۷	۵٫۰۷	۴٫۹۵	۴٫۷۵	۴٫۸۳	۴٫۶۲	۴٫۶۸	۴٫۵۸	۴٫۷۹	۱۸٫۰۱	۱۳٫۷۱	۱۳٫۶۹	۱۳٫۵۶	۱۳٫۷۹	۱۳٫۷۶		
MnO	۴٫۴۸	۰٫۴۴	۰٫۵۱	۰٫۴۵	۳٫۶۵	۰٫۱۲	۰٫۷۴	۰	۰٫۰۷	۰٫۰۲	۰٫۶۱	۰٫۰۷	۰٫۱	۰٫۵۹	۰٫۵۵	۰٫۱۱		
MgO	۳٫۲۱	۳٫۰۵	۳٫۳۴	۳٫۳۷	۳٫۳۵	۳٫۲۶	۳٫۳۸	۳٫۳۳	۳٫۳۱	۳٫۲۹	۰٫۳۸	۰٫۴۶	۰٫۴۶	۰٫۴۵	۰٫۵۱	۰٫۴۷		
CaO	۳۵٫۵۹	۳۶٫۰۹	۳۵٫۷۶	۳۵٫۹۲	۳۵٫۶۹	۳۶	۳۵٫۳۴	۳۵٫۴۹	۳۵٫۴۲	۳۵٫۲۹	۳۴٫۱۳	۳۴٫۹۱	۳۴٫۶۵	۳۴٫۴۴	۳۴٫۴۱	۳۴٫۴۴		
Total	۹۸٫۰۷	۹۵٫۴۱	۹۵٫۸۱	۹۶٫۲۳	۹۸٫۵۳	۹۵٫۳۹	۹۵٫۰۲	۹۳٫۸۶	۹۳٫۳۲	۹۳٫۳۶	۹۶٫۰۴	۹۶٫۴۱	۹۷٫۱۱	۹۶٫۶	۹۶٫۶	۹۶٫۳۶		
تعداد کاتیون‌ها بر پایه ۱۲ اتم اکسیژن																		
Si	۲٫۶۸	۲٫۷۵	۲٫۷۵	۲٫۷۶	۲٫۶۹	۲٫۷۸	۲٫۷۳	۲٫۷۴	۲٫۷۶	۲٫۷۵	۲٫۹۴	۲٫۸۶	۲٫۸۷	۲٫۸۶	۲٫۸۴	۲٫۸۶		
Ti	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۹۳	۰٫۰۴	۰٫۱۲	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۵	۰٫۱۶		
Al	۱٫۳۹	۱٫۴۲	۱٫۱۵	۱٫۳۹	۱٫۳۷	۱٫۳۹	۱٫۴۴	۱٫۴۵	۱٫۴۴	۱٫۴۴	۰٫۶۴	۰٫۹۶	۰٫۹۹	۰٫۹۷	۰٫۹۴	۰٫۹۴		
Fe ³⁺	۰٫۲۸	۰٫۳۱	۰٫۳۱	۰٫۳۲	۰٫۳۰	۰٫۳۱	۰٫۳۰	۰٫۳۱	۰٫۳۰	۰٫۳۲	۱٫۲۴	۰٫۹۳	۰٫۹۲	۰٫۹۲	۰٫۹۴	۰٫۹۴		
Mn	۰٫۲۹	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۲۳	۰٫۰۰	۰٫۰۵	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۰		
Mg	۰٫۳۷	۰٫۳۶	۰٫۳۶	۰٫۳۹	۰٫۳۸	۰٫۳۸	۰٫۴۰	۰٫۳۹	۰٫۳۹	۰٫۳۹	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۵		
Ca	۲٫۹۴	۳٫۰۵	۳٫۰۵	۳٫۰۱	۲٫۹۴	۳٫۰۵	۳٫۰۰	۳٫۰۴	۳٫۰۵	۳٫۰۴	۳٫۰۲	۳٫۰۴	۳٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۰	۳٫۰۱		
Sum	۷٫۹۹	۷٫۹۹	۷٫۷۳	۷٫۹۹	۷٫۹۹	۷٫۹۹	۷٫۹۹	۸٫۰۰	۷٫۹۹	۷٫۹۹	۷٫۹۹	۸٫۰۰	۷٫۹۹	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۷٫۹۹		
Andradite%	۲۰٫۴۳	۲۰٫۳۶	۲۰٫۳۶	۲۰٫۸۹	۲۱٫۴۱	۲۰٫۵۱	۱۹٫۸۲	۲۰٫۱۷	۲۰٫۰۳	۲۰٫۷۶	۶۶٫۲۷	۴۹٫۴۴	۴۷٫۹۴	۴۸٫۶۵	۴۹٫۶۸	۴۹٫۰۹		
Grossuler%	۶۱٫۳۱	۶۸٫۲۷	۶۸٫۲۷	۶۶٫۷۱	۶۱٫۱۰	۶۸٫۰۸	۶۷٫۱۲	۶۸٫۲۷	۶۸٫۲۹	۶۷٫۶۷	۳۰٫۸۰	۴۸٫۵۹	۴۹٫۹۷	۴۸٫۲۷	۴۷٫۰۹	۴۸٫۶۵		
Pyrope%	۱۰٫۲۳	۱۰٫۴۲	۱۰٫۴۲	۱۱٫۴۳	۱۰٫۷۷	۱۱٫۱۶	۱۱٫۵۷	۱۱٫۵۴	۱۱٫۴۸	۱۱٫۴۷	۱٫۵۰	۱٫۷۹	۱٫۸۰	۱٫۷۶	۱٫۹۹	۱٫۸۵		
Spesartine%	۸٫۱۱	۰٫۸۵	۰٫۸۵	۰٫۸۶	۶٫۶۷	۰٫۲۳	۱٫۴۳	۰٫۰۰	۰٫۱۳	۰٫۰۴	۱٫۳۷	۰٫۱۵	۰٫۲۲	۱٫۳۱	۱٫۲۲	۰٫۲۴		



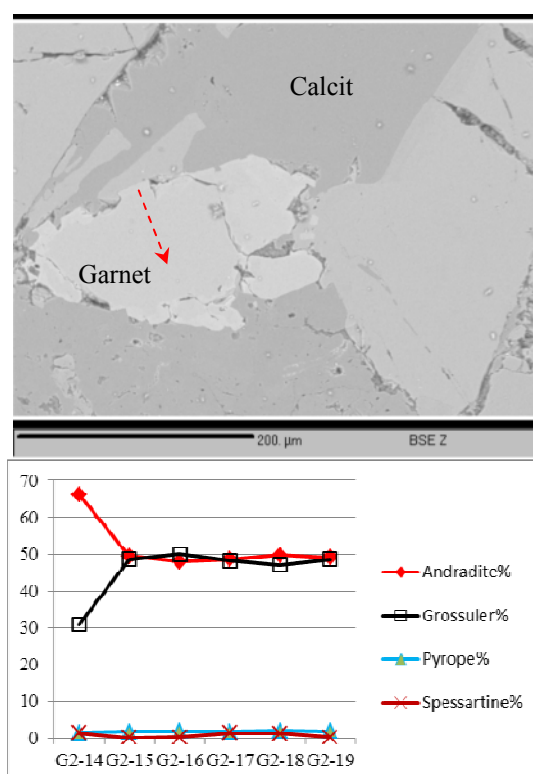
شکل ۱۰ تصویر طیف EDS کانی گارنت (مرکز کانی).

کانی گارنت است، به گونه‌ای که در حاشیه‌ی بلور درصد سازای آندرادیت بالاتر از سازای گراسولار است (شکل ۱۲). احتمالاً هسته‌ی گراسولاری بلور در شرایطی که سامانه تحت فشار و شرایط احیایی بوده تشکیل شده و در ادامه در اثر برداشته شدن فشار و جوشش شاره و شاید ورود آب‌های جوی به داخل سامانه شرایط فیزیکی شیمیایی شاره عوض شده و حالت اکسایشی تری پیدا کرده و در نتیجه شرایط برای نهشت آندرادیت مهیا شده است.

تصویر الکترونی پس پراکنده‌ی (BSE) بلور گارنت در شکل ۱۱ منطقه‌بندی ضعیفی را به ویژه در حاشیه و مرکز بلور نشان می‌دهد. درصد تغییرات اعضای پایانی از مرکز به حاشیه بلور نیز گویایی تغییر در اجزای گراسولار و اسپسارتین است به گونه‌ای که در مناطق با درصد اسپسارتین بیشتر مقدار درصد گراسولار کمتر است (شکل ۱۱). در شکل ۱۲ نیز درصد تغییرات عضوهای انتهایی گارنت که از حاشیه به مرکز بلور ترسیم شده‌اند، بیانگر تغییر مقدار درصد آندرادیت و گراسولار



شکل ۱۱ تصویر BSE کانی گارنت و نمودار درصد تغییرات نوع گارنت در راستای پیمایش (مرکز به حاشیه) ریزکاوته‌ی الکترونی (داده‌های پیمایش ۱ در جدول ۲).



شکل ۱۲ تصویر BSE کانی گارنت (از حاشیه به مرکز بلور) و نمودار درصد تغییرات نوع گارنت در راستای پیمایش میکروسکوپی ریزکاوندهی الکترونی (داده‌های پیمایش ۳ در جدول ۲).

برداشت

اسکارن‌های دره‌ی زرشک از دیدگاه کانی‌شناختی از نوع اسکارن‌های گارنت هستند. کانی گارنت در مجموعه اسکارن‌های این منطقه در گستره‌ی سری محلول جامد آندرادیت-گراسولار با درصد ناچیزی اسپسارتین و پیروپ قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد که ترکیب‌های آندرادیتی و گراسولاری نقش متضادی در جدایش عناصر REE طی فرایند دگرنهادی و رشد بلوری داشته‌اند. در شرایطی که نسبت شاره به سنگ بالا باشد شاره‌های حاصل از انجماد ماگما دارای درصد بالایی Fe هستند، در چنین شرایطی سامانه زیر کنترل شاره بوده و سرعت رشد بلور بالاست. گارنت‌هایی که در چنین حالتی رشد می‌کنند ترکیب آندرادیتی دارند و تمایل به غنی‌شدگی در عناصر LREE نسبت به عناصر HREE دارند. در مقابل در شرایطی که حجم شاره‌ها حاصل از انجماد توده افت می‌کند، نسبت شاره به سنگ نیز پایین می‌افتد و سامانه در کنترل سنگ میزبان قرار می‌گیرد. در این شرایط رشد بلور آرام بوده و گارنت‌های با ترکیب گراسولاری تشکیل شده‌اند. این گونه

گارنت‌ها تهی‌شدگی عناصر LREE نسبت به عناصر HREE را نشان می‌دهند.

مراجع

- [1] Gaspar M., Knaak C., Meinert L. D., Moretti R., "REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72 (2008) 185–205.
- [2] Karimzadeh Somarin A., "Garnet composition as an indicator of Cu mineralization: evidence from skarn deposits of NW Iran", *Journal of Geochemical Exploration* 81 (2004) 47–57.
- [3] Karimzadeh Somarin A., Moayyed M., "Granite- and gabbrodiorite-associated skarn deposits of NW Iran", *Ore Geology Reviews* 20 (2002) 127–138.
- [4] Zarasvandi A., "Magmatic and structural controls on localization of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper deposits, Yazd province, Iran", Ph.D. thesis, university of Shiraz (2004).
- [5] Menzer G., "Die kristallstruktur von granat", *Zeitschrift für Kristallographie* 63 (1926) 157–158.

- [11] Jamtveit B., "Oscillatory Zonation patterns in hydrothermal grossular-andradite garnet, Nonlinear behavior in regions of immiscibility", American Mineralogist 76 (1991) 1319-1327.
- [12] Morimoto N., Chairman B., "Nomenclature of pyroxens. Subcommittee on pyroxens", International Mineralogical Association, Contributions to Mineralogy and Petrology 27(1989) 143-156.
- [13] Jamtveit B., Wogelius R. A., Fraser D. G., "Zonation patterns of skarn garnets, records of hydrothermal system evolution", Geology 21 (1993) 113-116.
- [۱۴] مکی زاده م.ع.، رهگشای م.، تقی پور ب.، تقی پور ص.، "کانی شناسی، ژئوشیمی و سنگ زایی اسکارن منطقه ی زرو (شمال غربی استان یزد)"، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲ (۱۳۸۹) ص ۲۰۹-۲۲۲.
- [6] Zhao A., Pan T., "Chemistry of Crystals", Wuhan: China University of Geosciences Press (1992) 185.
- [7] Lottermoser B. G., "Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes". Ore Geology Review 7 (1992) 25-41.
- [8] Sun S. S., McDonough W. F., "Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes", In: Saunders AD, Norry MJ (eds) Magmatism in the ocean basins, Geological Society London Special Publication 42(1989) 313-345.
- [9] Einaudi M. T., Burt D. M., "Introduction-Terminology, Classification, and Composition of Skarn Deposits", Economic geology 77 (1982) 745-754.
- [10] Meinert L. D., "Skarns and skarn deposits", Geoscience Canada 19 (1992) 145-162.