



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

فرید مُر، 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 قطاعی 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 بی‌هنجرای مثبت و بالای Eu، و (۲) غنی‌شدگی در HREEs نسبت به LREES می‌باشد که به ترتیب سرنشی 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.

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 اسکارن‌های 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

مقدمه

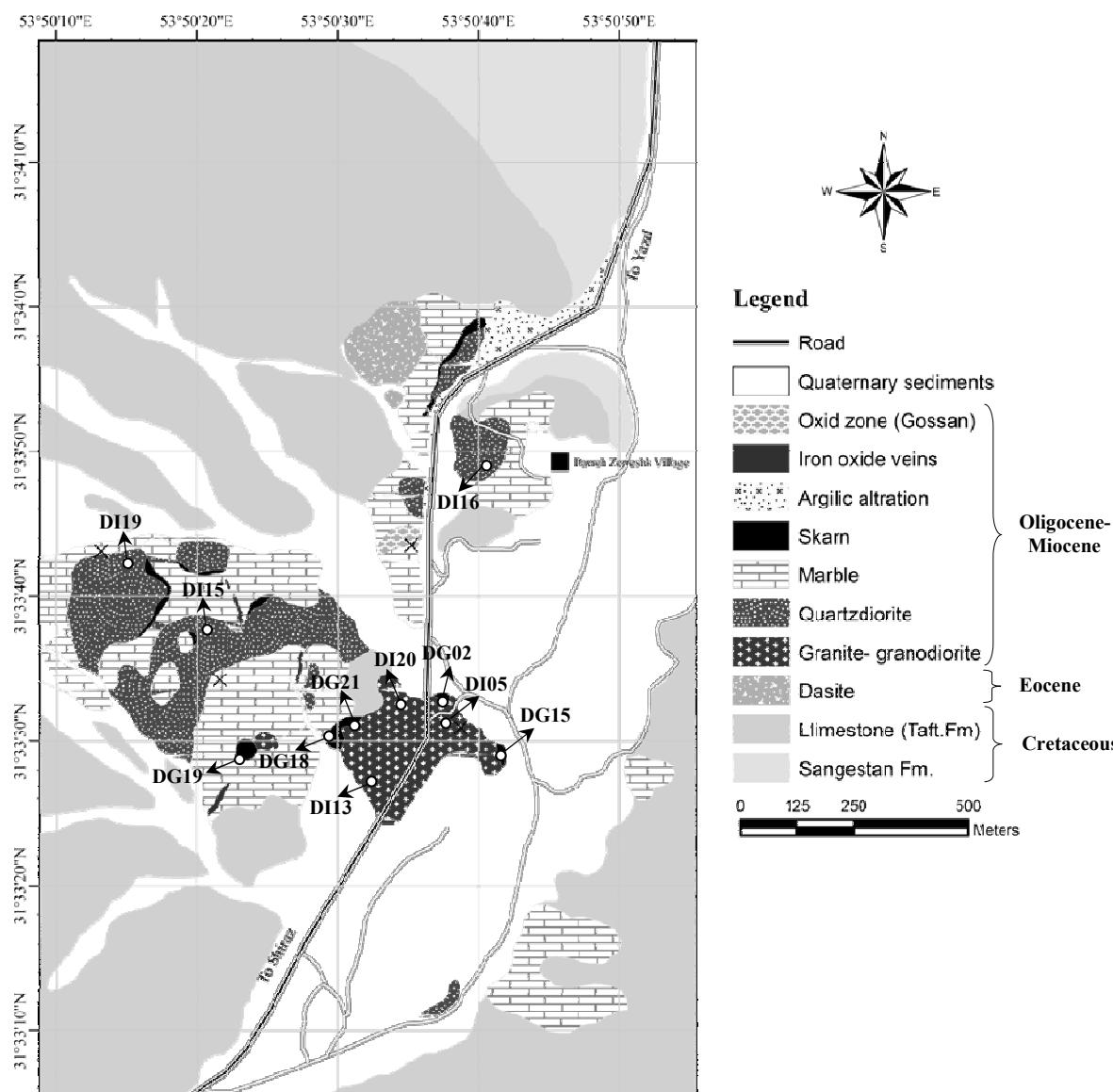
عناصر نادر خاکی به میزان گسترده‌ای و به عنوان ردياب‌های زمین شیمیایی در فرایند های زمین‌شناسی، به ویژه در سامانه‌های مagmaی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی‌های گسترده‌ای بر روی کانی‌های REE دار (نظیر آلانیت و مونازیت) و کانی‌های دیگری که به عنوان انباشتگر عناصر REE شناخته می‌شوند (نظیر تیتانیت، آپاتیت و زیرکن) انجام گرفته است ولی توجه کمتری به گارنت‌ها و بویژه گارنت‌های سامانه‌های اسکارنی شده است که اتفاقاً از سازه‌های 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 داشته‌اند [۴]. اسکارن دره زرشک، در جنوب غربی استان یزد و در گستره‌ی جغرافیایی $37^{\circ} 37' - 37^{\circ} 50'$ طول شرقی و $30^{\circ} 33' - 31^{\circ} 01'$ عرض شمالی و در کمربند تکتونوماگمایی ارومیه- دختر واقع شده است. کهن- ترین واحد سنگ‌شناختی منطقه، سازند آواری سنجستان به سن کرتاسه پیشین است که در زیر سنگ‌های آهکی سازند تفت به سن کرتاسه میانی تا بالای قرار دارد (شکل ۱).

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

زمین‌شناسی منطقه

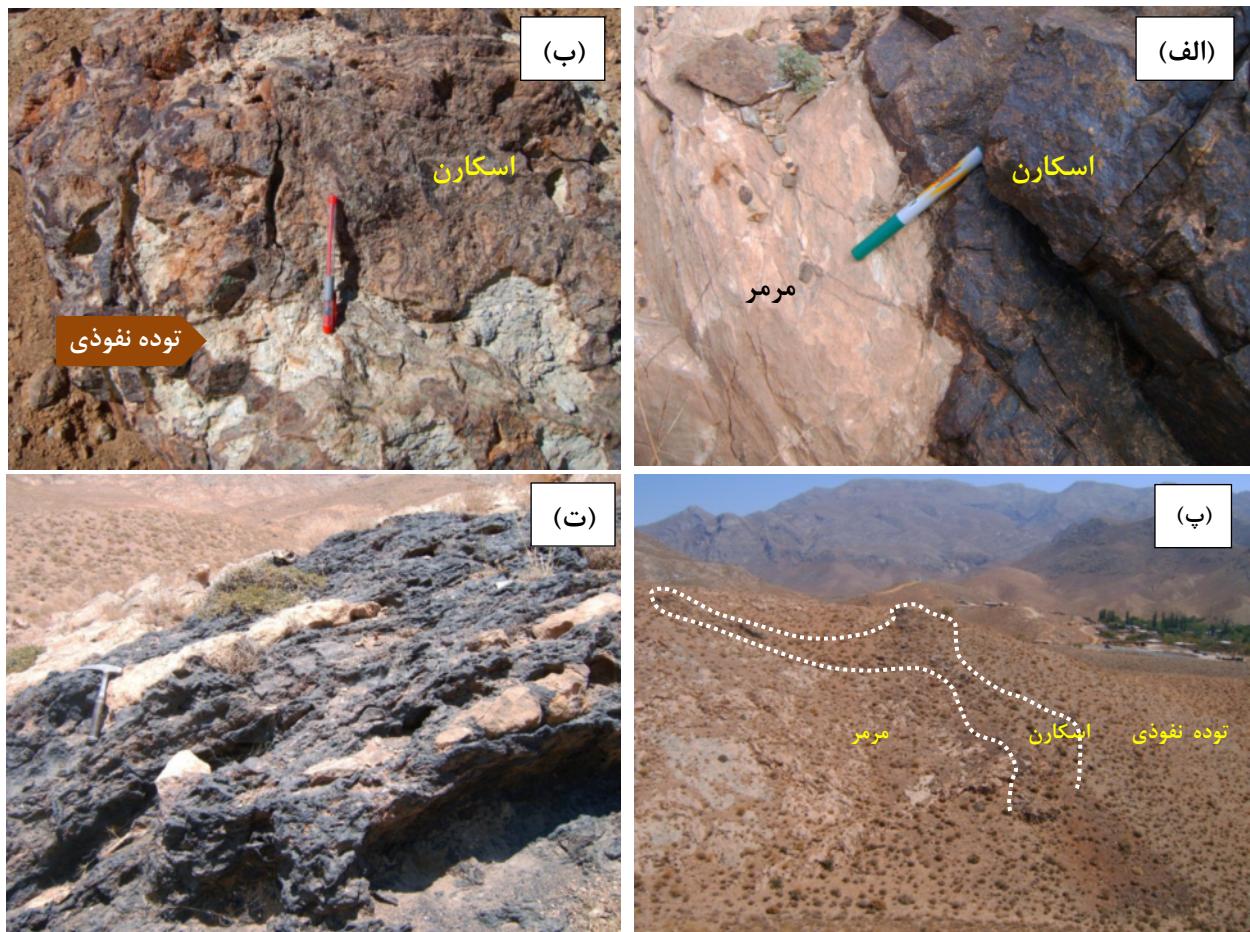
فعالیت‌های ماگمایی گستردگی در کمربند تکتونوماگمایی ارومیه- دختر منجر به تزریق تووده‌های نفوذی متعدد طی دوران سنوزوئیک در راستای این کمربند و در نتیجه در موارد زیادی مانند سونگون، مزرعه [۳]، دره‌ی زرشک و خوت [۴] سبب اسکارن زایی شده است. این منطقه به لحاظ زمین



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه دره‌ی زرشک و موقعیت اسکارن‌ها و نمونه‌ها روی آن.

صحرایی 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 کانسنسنگی 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 اسکارن 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 (به صورت خیلی محدود)، مرمر و سنگ آهک است (شکل ۲ پ). کانه‌زاویه‌ای آهن به صورت 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 آتشفشاری (Subvolcanic) در واحدهای رسوبی منطقه نفوذ کرده‌اند. نفوذ استوک پورفیری دره‌ی زرشک، که خود میزبان کانه‌زاویه مس پورفیری است، با ترکیب گرانیت- گرانوودیوریت- کوارتزدیوریت 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- سرسیتی (فیلیک)، آرژیلیک 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) همچوواری توده‌ی نفوذی، اسکارن و مرمر، (ت) رگه اکسید آهن (مگنتیت + هماتیت) در مرمر.

سنگنگاری اسکارن‌ها

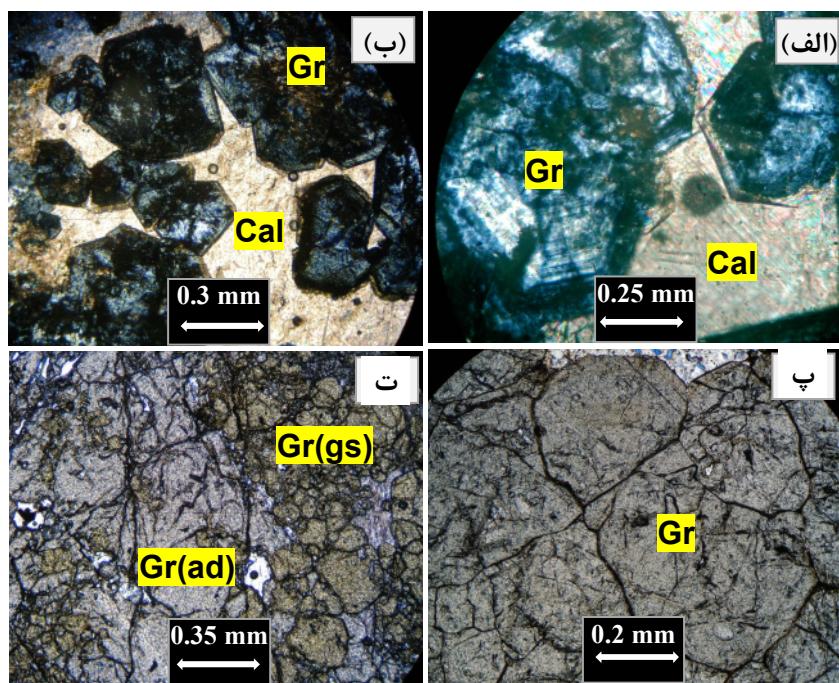
بر اساس بررسی‌های کانی‌شناختی و روابط پارازنزی، حداقل سه مرحله اصلی در پیدایش اسکارن‌های منطقه دره‌ی زرشک تشخیص داده شدند: (۱) مرحله دگرگونی هم شیمیایی-دو-دگرنهادی(Bimetasomatism): این مرحله همزمان با جای-گیری توده‌ی نفوذی در سنگ‌های کربناتی سازند تفت آغاز شده است. در این مرحله جریان گرمایی ناشی از توده 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-هدنبرگیت) با بافت‌های معرف اسکارن پیشرونده مانند بافت‌های دانه‌ای (شکل ۳ الف، ب)، موزائیکی (شکل ۳ پ) و توده‌ای (شکل ۳ ت) است.

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 ریزکاونده‌ی 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 ۱۲kv و 10nA بوده است. برای تعیین غلظت عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های گارنت، دانه‌های ریز گارنت 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 اندازه گیری شدند (جدول ۱).

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

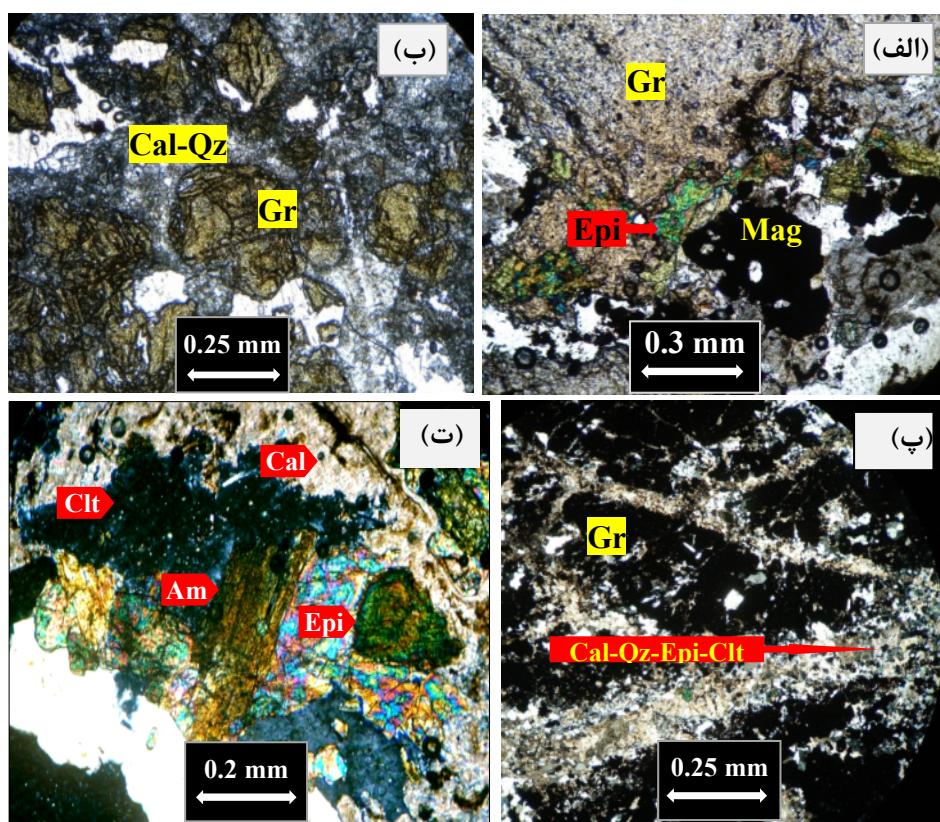
Sample no.:	DG02	DG15	DG18	DG19	DG21	DI20	DI19	DI16	DI15	DI13	DI05
Sample type	Garnet					Igneous					
La (ppm)	۲۱,۳	۰,۹	۰,۵	۰,۶	۹,۱	۳۲,۳	۲۲,۱	۱۸,۵	۲۶,۶	۲۲,۴	۲۰
Ce	۸۲,۸	۱۷,۶	۱,۲	۱,۵	۱۶,۸	۵۷,۹	۳۹,۸	۳۳,۱	۴۹,۱	۳۹,۴	۳۳,۶
Pr	۷,۹۳	۲,۱۷	۰,۳۴	۰,۳۷	۲	۶,۵۲	۴,۵۸	۳,۸۴	۵,۶۲	۴,۵۸	۴,۱۲
Nd	۱۷,۲	۸,۵	۲,۶	۳	۷,۵	۲۴,۶	۱۷,۶	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	۲,۳۳	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 ماقله 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). علایم اختصاری: Gr: گارنت، Cal: کلسیت، (gs): گارنت گراسولاری، (ad): گارنت آندرادیتی.

اسکارن دره‌ی زرشک در نمودار شکل ۵ آورده شده‌اند. بر اساس شواهد سنگ‌نگاری، نهشت کانه‌ها در اسکارن دره‌ی زرشک با شروع مرحله‌ی دگرسانی پسرونده آغاز شده است به‌طوری که مگنتیت به صورت 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 پسرونده 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 می‌شوند (شکل ۶ پ)، این نشان دهنده‌ی نهشت کانی‌های سولفیدی در مرحله‌ی دگرسانی پسرونده و نقش عوامل ساختاری در نهشت آن‌هاست. پس از اسکارن‌زایی و کانه‌زایی همزمان با آن، کانی‌سازی اکسیدی (هماتیت- گوتیت)، سولفیدی (کالکوسیت و دیژنیت) و کربناتی مس (مالاکیت- آزوئیت) نیز طی فرآیندهای برونزایی در اسکارن دره‌ی زرشک صورت گرفته است.

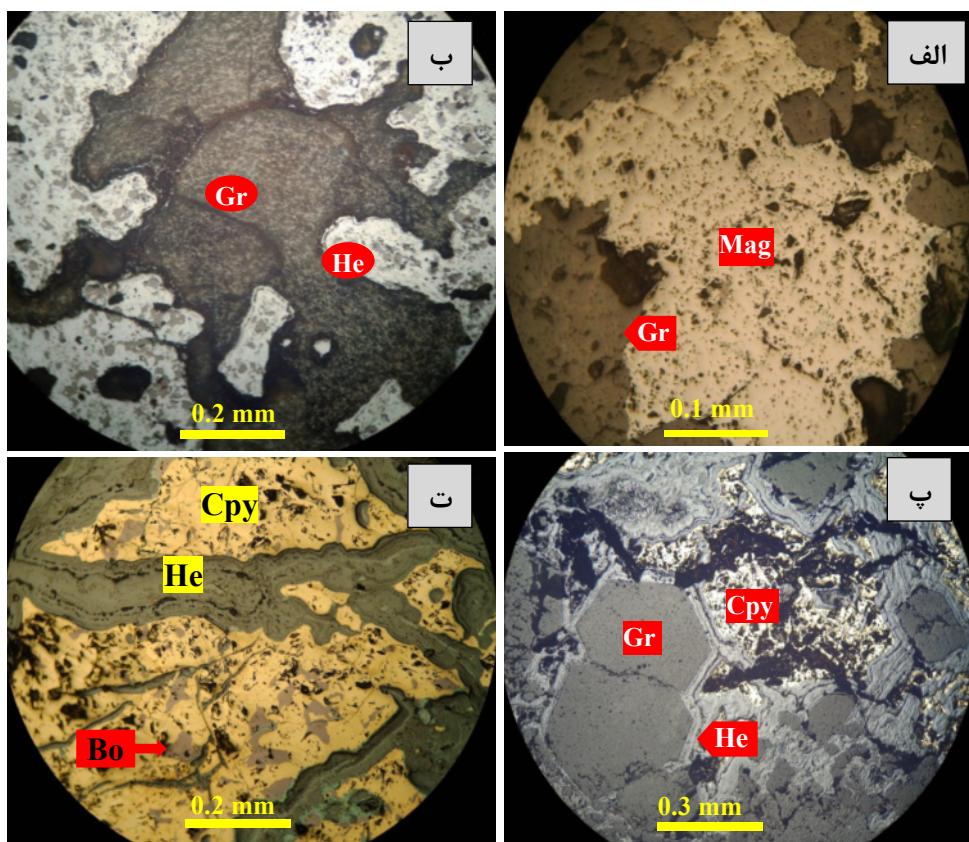
(۳) مرحله‌ی دگرسانی مخرب پسرونده: در این مرحله در اثر برهمکنش گرماب با مجموعه‌های کلسیمی- سیلیکاتی مرحله‌ی پیشرونده، حجم زیادی فازهای سیلیکاتی (کوارتز) و کلسیمی- سیلیکاتی آبدار (اپیدوت، ترمولیت- اکتینولیت) همراه با سولفیدها (پیریت، کالکوپیریت و بورنیت)، اکسیدها (مگنتیت و هماتیت) و کربنات‌ها پدید آمده‌اند. 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 پسرونده 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 شکافه‌ی پرکن اشاره کرد. طی مرحله‌ی دگرسانی پسرونده پسین بر اثر ورود شاره‌های 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 متتمرکز 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 کانی‌ای شناسایی شده در



شکل ۴ (الف) تشکیل مگنتیت و اپیدوت از راه جانشینی گارنٹ (PPL); (ب) خردشده‌گی و سیمانی شدن گارنٹ 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 پسروند (XPL); (د) عالیم اختصاری: Gr: گارنٹ، Mag: مگنتیت، Epi: اپیدوت، Cal: کلسیت، Qz: کوارتز، Clt: کلریت، Am: آمفیبول.

کانی‌ها	مرحله دگرگونی-بی متاسوماتیسم (I)	دگرسانی دگرنهادی و کانه زایی			مرحله دگرسانی بروزنزاد	
		مرحله پیشرونده (II)	مرحله پیشرونده			
			(III)	(IV) پسروند پیشین		
سلیکات‌ها	گارنٹ (گراندایت)					
	دیوپسید-هدنبریت					
	ترمولیت-اکتینولیت					
	اپیدوت					
	کلریت					
	کوارتز					
سولفید‌ها	پیریت					
	کالکوپیریت					
	بورنیت					
	کالکوسپیت					
	دیزئیت					
اکسید‌ها	مگنتیت					
	هماتیت					
	گونتیت					
کربنات‌ها	کلسیت					
	مالاکیت-آزوریت					

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



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

گراسولار نزدیکترند. منطقه‌بندی کانیایی (نوسانی یا قطاعی) که یکی از ویژگی‌های روشن گارنت‌ها در ذخایر اسکارن است و استفاده‌های زیادی در ارزیابی شرایط فیزیکوشیمیایی تکامل اسکارن‌ها دارد، و در گارنت‌های دره زرشک به فراوانی دیده می‌شود (شکل ۳ الف، ب).

بحث و بررسی

زمین شیمی عناصر کمیاب خاکی

بررسی الگوی عناصر کمیاب خاکی در گارنت‌ها کمک زیادی به شناخت فرایندهای شکل گرفته و تکامل شاره‌های دگرنهادی می‌کند [۱]. جانشینی REE در ساختار گارنت با استفاده از ساختار و شیمی بلوری آن کنترل می‌شود. گارنتهای 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 کاتیون‌های سه ظرفیتی (Al, Fe^{3+})

گارنت در بسیاری از مقاطع میکروسکوپی تنها کانی کلسیمی-سیلیکاتی تشکیل دهنده‌ی سنگ به شمار می‌آید و فضای بین بلورهای آن از کانی‌های غیر کلسیمی-سیلیکاتی مانند کوارتز یا کلسیت پر شده است (شکل ۳ الف، ب). بلورهای گارنت در مجموعه اسکارن‌های دره زرشک طیف وسیعی از شرایط بافتی و کانی‌شناختی را نشان می‌دهند (شکل ۳ الف، ب، پ، ت) و در اندازه‌های متفاوت بسیار ریز تا چند میلیمتر دیده می‌شوند. گارنت‌های نزدیک به همبrij توهدی نفوذی به رنگ سرخ قهوه‌ای تا تیره و درشت بلور هستند و ناهمسانگردی شدید، ماکل قطاعی و منطقه‌بندی هم مرکز از خود نشان می‌دهند (شکل ۳ الف، ب) که بیشتر ترکیب آندارادیتی دارند، ولی گارنت‌های ریز بلور نزدیک به همبrij مرمر، در نمونه‌های دستی به رنگ قهوه‌ای روشن و گاه سبز دیده می‌شوند، و دارای ناهمسانگردی متوسط و گاه همسانگرد هستند و به ترکیب

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

الگوی نمونه‌های گارنت وابسته به اسکارن درهی زرشک برداشت شده از زون‌های اسکارنی نزدیک به همبrijی توodehی نفوذی (گارنت‌های قهوه‌ای) و گارنت‌های نزدیک به همبrijی مرمر (گارنت‌های سبز تا سبز تیره) در شکل ۷ نشان داده شده. گارنت‌ها بر اساس مقادیر کندریت C1 [۸] بهنجر شده‌اند. چنانکه در شکل ۷ دیده می‌شود دو روند کاملاً متضاد در رفتار REE ها دیده می‌شوند: (۱) گارنت‌های با الگوی غنی شدگی در LREE و تهی شدگی در HREE و (۲) گارنت‌های با الگوی غنی شدگی در REE ها در شکل ۷ دیده می‌شود دو روند کاملاً بهنجر شده‌اند. نمونه‌های DG18 و DG19 (شکل ۷) که در نمونه‌ی LREE دستی به رنگ سبز دیده می‌شوند از اسکارن‌های دور از همبrijی توodeh و نزدیک به جبهه‌ی مرمر برداشت شده‌اند. این دو نمونه تهی شدگی در LREE و غنی شدگی 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 همبrijی توodehی نفوذی برداشت شده‌اند و رنگ قهوه‌ای تیره داشته و در مقاطع نازک نیز ویژگی آندرادیتی داشته‌اند، الگوی متفاوت غنی شدگی در LREE و تهی شدگی 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 شbahat روند REE ها ترکیب آندرادیتی دارند. از نظر بی‌هنجری Eu، گارنت‌های آندرادیتی بی‌هنجری مثبت و بالا (به ویژه نمونه‌ی DG02) و گارنت‌های گراسولاری این بی‌هنجری 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 همبrijی توodeh به یاری

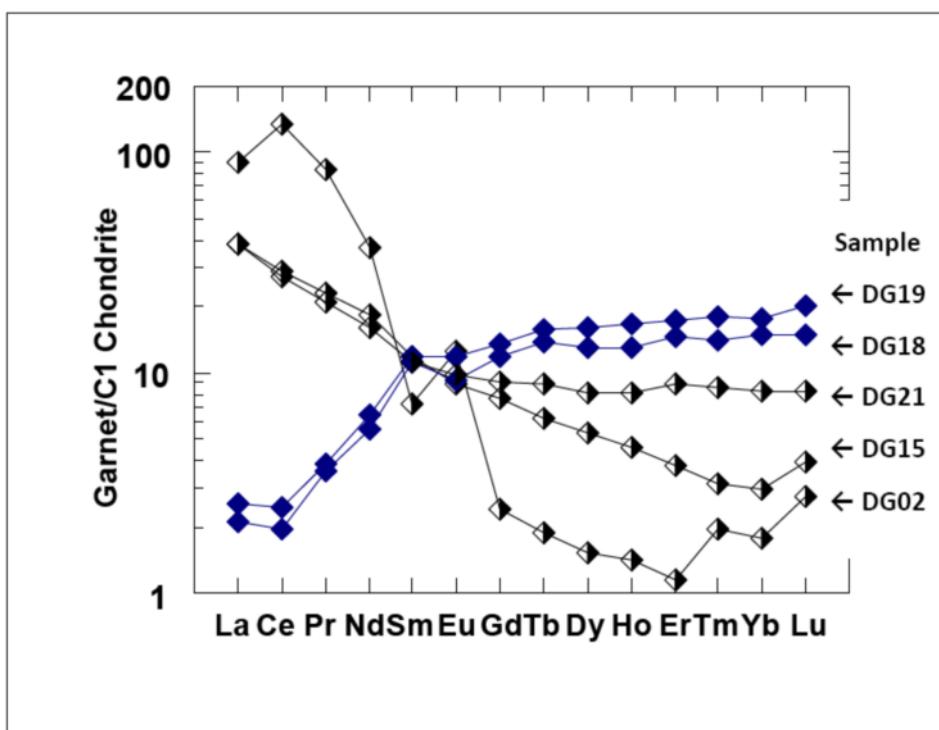
(Cr) با همارایی هشت وجهی و Zr بیشتر شامل Si با همارایی چهاروجهی است [۵]. عناصر جزئی و کمیاب خاکی نیز می‌توانند در ساختار بلوری گارنت‌ها حضور داشته باشند. بر اساس بررسی‌های بلور نگاری شیمیایی^۱ انجام شده روی گارنت، Ca²⁺ شعاع یونی مشابه با REE ها دارد، بنابراین، HRE ها به آسانی می‌توانند جانشین کاتیون Ca²⁺ در شبکه‌ی بلوری گارنت‌ها شوند [۶]. واکنش جانشینی گارنت گراندیت به صورت زیر است [۱]:



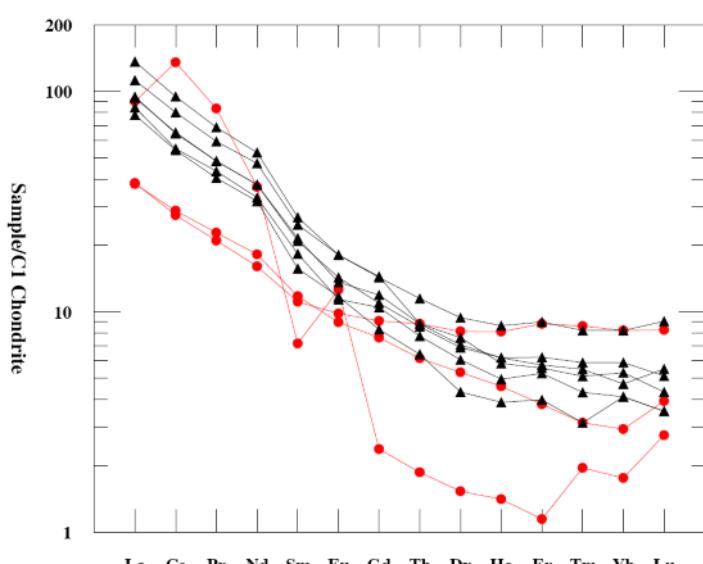
-
1. Chemicocrystallography
 2. Fractionation
 3. Diffusive
 4. Advective

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 مطالعه مشابهی که روی REE گارنت‌های اسکارن طلای کرون جول (CrownJewel) در ایالت واشینگتن امریکا 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 گارنت‌های آندرادیتی که پایین بوده بوجود آمده‌اند در حالی که گارنت‌های اسکارن در REE دارند، حاصل الگوی غنی شدگی از LREE نسبت به HREE دارند، در اثر فرایند شکنندگی (Fracturing) بالا رفته از شاره‌های با خاستگاه ماگمایی شکل گرفتند.

فرایند هیدروفکچرینگ (Hydrofracturing) و حرکت رو به بالا 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 شرایط شاره به سنگ دیواره بالا بوده از شاره‌های با خاستگاه ماگمایی (که طبیعتاً مقدار Fe بالای دارند) طی دگرنهادی نفوذی آندرادیتی دارند. مقایسه 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 REE‌ها در هر دو بالا و غنی شدگی عناصر کمیاب خاکی سبک (LREEs) نسبت به عناصر کمیاب خاکی سنگین (HREEs) مشاهده می‌شود (شکل ۷). بنابرین 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 همبrij توده در اثر برهمکنش طولانی مدت شاره‌های منفذی، با سنگ‌های میزبان



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

نوع آندرادیت-گراسولار هستند و تنها درصد کمیاسپسارتین 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 [۱۰, ۹] (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 میانبارهای 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 دوره‌ای 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]. شکل گیری سلول‌های

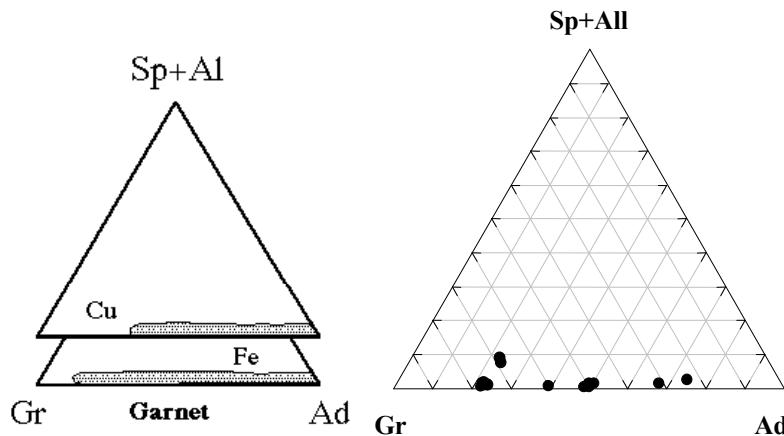
شیمی گارنت

شیمی گارنت‌ها در مجموعه‌ی اسکارنی با میکروسکوپ ریزپردازنه 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 نادگرسان 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 ($Mg_3Al_2Si_3O_{12}$), آلماندین ($Mn_3Al_2Si_3O_{12}$), اسپسارتین ($Fe^{2+}Al_2Si_3O_{12}$), اسپسارتین ($Fe^{2+}Al_2Si_3O_{12}$) و $[Ca_3(Fe^{3+}, Ti)_2Si_3O_{12}]$, آندرادیت ($Ca_3Al_2Si_3O_{12}$) و اواروویت ($Ca_3Cr_2Si_3O_{12}$). گونه‌ای آبدار نیز وجود دارد که هیدروگروسولار ($[Ca_3Al_2Si_2O_8(SiO_4)]_{1-m}(OH)_{4m}$) نامیده می‌شود. در واقع بیشتر گارنت‌ها سری‌های محلول جامدی از یک یا چند جزء پایانی هستند. براساس نمودار سه تایی گراسولار-آندرادیت-اسپسارتین-آلماندین (شکل ۱۴) که از طریق محاسبه اعضای پایانی به دست آمدند، گارنت‌های اسکارن دره‌ی زرشک در گستره‌ی گارنت‌های گراندایتی قرار می‌گیرند و از

5-.End member

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

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



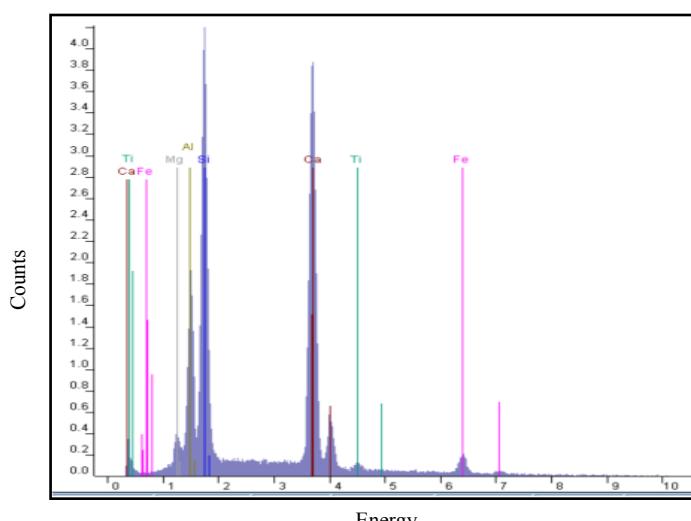
شکل ۹ نمودار توزیع ترکیب تجزیه‌های ریزکاونده‌ی الکترونی گارنت‌های اسکارن دره‌ی زرشک و مقایسه آن‌ها با ترکیب گارنت‌های انواع نهشته‌ای اسکارنی [۱۰، ۱۱]. عالیم اختصاری: Gr: گراسولار، Ad: آندرادیت، Sp: اسپسارتین، Al: آلماندن.

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					
	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		
نمونه	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		
SiO ₂	۲۴,۷۹	۲۴,۸	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	۰,۹	۲,۲۵	۲,۲۶	۲,۵۵	۲,۷۳		
Al ₂ O ₃	۱۵,۳۵	۱۵,۲۸	۱۵,۱۳	۱۵,۱۱	۱۵,۱	۱۴,۹۶	۱۵,۴۶	۱۵,۲۶	۱۵,۱۹	۱۵,۲	۶,۵۹	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	۲,۶۵	۰,۱۲	۰,۷۶	۰	۰,۰۷	۰,۰۲	۰,۶۱	۰,۰۷	۰,۱	۰,۵۹	۰,۵۵	۰,۱۱		
MgO	۳,۲۱	۳,۰۵	۳,۲۴	۳,۲۷	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	۹۳,۲۶	۹۶,۰۴	۹۶,۴۱	۹۷,۱۱	۹۶,۶	۹۶,۳۶	۹۶,۳۶		

تعداد کاتیون‌ها بر پایه ۱۲ اتم اکسیژن

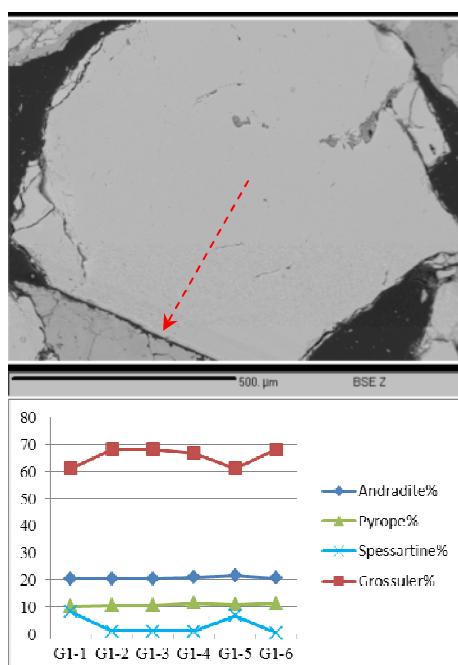
	Si	۲,۶۸	۲,۷۵	۲,۷۵	۲,۷۶	۲,۶۹	۲,۷۸	۲,۷۷	۲,۷۴	۲,۷۶	۲,۷۵	۲,۹۴	۲,۸۶	۲,۸۷	۲,۸۶	۲,۸۴	۲,۸۶
Ti	۰,۰۱	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۷	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۱۲	۰,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۵	۰,۱۶	
Al	۱,۳۹	۱,۴۲	۱,۱۵	۱,۳۹	۱,۳۷	۱,۳۹	۱,۴۴	۱,۴۵	۱,۴۴	۱,۴۴	۰,۶۴	۰,۹۶	۰,۹۹	۰,۹۷	۰,۹۴	۰,۹۴	
Fe ³⁺	۰,۲۸	۰,۳۱	۰,۳۱	۰,۳۲	۰,۳۰	۰,۳۱	۰,۳۰	۰,۳۱	۰,۳۰	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	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۰	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	۲,۰۴	۳,۰۰	۳,۰۰	۳,۰۱	۳,۰۱	
Sum	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۷۳	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	۷,۹۹	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	۴۹,۶۱	۴۹,۰۹	
Grossular%	۶۱,۱۳	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	۱۱,۰۷	۱۱,۰۴	۱۱,۰۸	۱۱,۴۷	۱,۰	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	



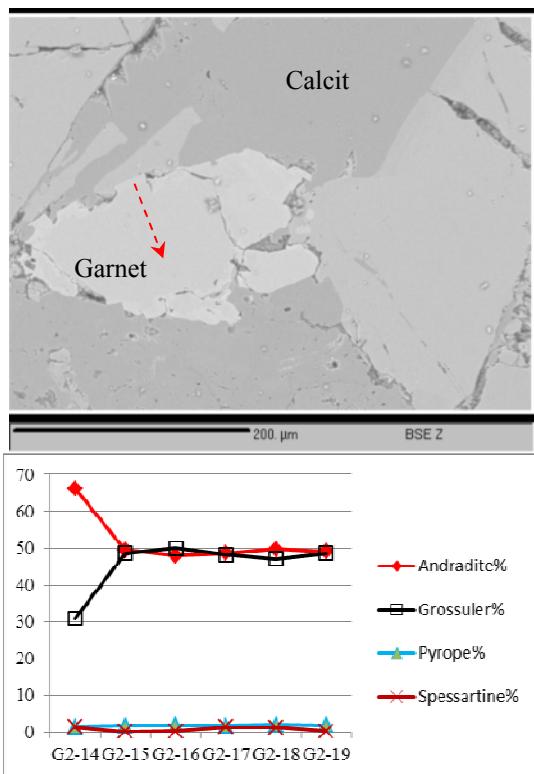
شکل ۱۰ تصویر طیف EDS کانی گارنت (مرکز کانی).

کانی گارنت است، به گونه‌ای که در حاشیه‌ی بلور درصد سازی 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 فیزیکو 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) ریزکاونده‌ی 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).

گارنت‌ها تهی‌شدگی عناصر HREE نسبت به عناصر LREE 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] Zaravandi 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 kristallstructure von granat", *Zeitschrift fur Kristallographie* 63 (1926) 157–158.

برداشت

اسکارن‌های دره‌ی زرشک از دیدگاه کانی‌شناسختی 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 مagma دارای درصد بالای 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

- [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., "Nomenculture of pyroxens. Subcommitee 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 سنج زایی اسکارن منطقه‌ی 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 Revive 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.