

بررسی تأثیر انتشار عناصر Fe، Mn، Mg و Ca بر رشد گارنت (منطقه دهنو، شمال باختری مشهد، ایران)

رامین صمدی^{۱*}، محمدولی ولی‌زاده^۲، حسن میرنژاد^۳، علی‌اکبر بهاری‌فر^۴، سید جمال شیخ‌ذکریایی^۵

^۱ دکتر، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
^۲ استاد، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۳ دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۴ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
^۵ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۱۱

چکیده

منطقه دهنو در شمال‌باختری شهر مشهد، در محدوده زون ساختاری بینالود و در امتداد خاوری سلسله جبال البرز قرار دارد. واحدهای اصلی سنگی موجود در ناحیه مورد مطالعه شامل واحد تونالیت (تا دیوریت و گرانودیوریت) دهنو، هورنفلس و شیت‌های اطراف آن هستند. دگرگونی ناحیه‌ای مولد شیت‌ها در تریاس به‌وقوع پیوسته و در ضمن دگرگونی در طی تریاس بالایی، توده‌های گرانیتوئیدی به این نوار دگرگونی تزریق شده‌اند و در طی جایگیری این توده در شیت‌های منطقه باریکه‌ای از هورنفلس در فاصله‌ای در حدود ۲۰۰ متری از مرز توده با شیت‌ها تشکیل شده است. واحدهای سنگی توده نفوذی دهنو، هورنفلس و شیت دارای گارنت به‌عنوان کانی فرعی هستند. در این مطالعه به بررسی تأثیر پدیده انتشار در توزیع عناصر Fe، Mn، Mg و Ca در این نوع گارنت پرداخته شد. بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی، به دلیل مقدار کم عنصر Ca در حاشیه گارنت، روند کاهش آهن از مرکز تا حاشیه، سرعت‌های انتشار بسیار کم این عناصر و اندازه بزرگ گارنت‌ها نشان می‌دهد که گارنت‌های موجود در توده آذرین دهنو به‌طور شاخصی تحت تأثیر پدیده انتشار عناصر قرار نگرفته‌اند و تغییرات عناصر در آنها تحت تأثیر تحولات ترکیب شیمیایی مذابی که از آن متبلور شده‌اند بوده است. علاوه بر این، روندهای نامنظم Fe و Mn و روندهای یکنواخت تر Ca و Mg از مرکز تا حاشیه گارنت در درون شیت و هورنفلس و همچنین دمای کم تبلور و زمان کوتاه رشد گارنت در این سنگ‌ها نشان می‌دهند که تأثیر پدیده انتشار در هنگام رشد این گارنت‌ها قابل چشم‌پوشی است.

کلیدواژه‌ها: انتشار، گارنت، تونالیت - دیوریت - گرانودیوریت، شیت، هورنفلس، دهنو.

*نویسنده مسئول: رامین صمدی

E-mail: rsamadi@hotmail.com

۱- پیش‌گفتار

در باختر دهنو، سنگ‌های آذرینی از نوع تونالیت (تا دیوریت و گرانودیوریت - DTG) به‌درون شیت‌های منطقه نفوذ نموده‌اند که در نتیجه آن هاله باریکی از هورنفلس در مرز این دو واحد سنگی و در پیرامون توده نفوذی تشکیل شده است. از ویژگی‌های این توده آذرین وجود بلورهایی از گارنت‌های درشت‌دانه (به ابعاد یک تا دو سانتی‌متر) در درون این سنگ‌ها است. صمدی (۱۳۸۷) به بررسی این گارنت‌ها بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی دقیق گارنت و سنگ میزبان و تلفیق آنها با برداشت‌های سنگ‌نگاری و صحرایی پرداخت. بر این اساس گارنت‌های درشت‌دانه موجود در توده آذرین که دارای ترکیب متفاوتی نسبت به گارنت موجود در سنگ‌های دگرگونی منطقه هستند، دارای ویژگی‌های گارنت‌های فنوکریستی بوده و بر اساس تقسیم‌بندی‌های ارائه شده توسط Kawabata & Takafuji (2005) از نوع گارنت فنوکریستی نوع I و حاصل تبلور از مذاب هستند (صمدی، ۱۳۸۷). مطالعه شیت و هورنفلس‌های منطقه نیز نشان داد که گارنت موجود در سنگ‌های دگرگونی منطقه با ترکیبی متفاوت و دارای ابعاد کم‌تر (در حدود یک تا دو و نیم میلی‌متر) است.

هدف این مطالعه بررسی نقش فرایند انتشار عناصر Fe، Mn، Mg و Ca در رشد و منطقه‌بندی گارنت موجود در توده نفوذی، هورنفلس و شیت‌های منطقه دهنو است. به این منظور از داده‌های آنالیز ریزپردازشی گارنت در این سه واحد سنگی و ترکیب شیمیایی سنگ میزبان آنها استفاده می‌شود و با ترسیم نیمرخ‌های ترکیب شیمیایی و مقایسه داده‌ها به بررسی تأثیر انتشار این عناصر بر رشد گارنت پرداخته شده است. این بررسی در نهایت به ارائه یک نظریه جامع در خصوص نحوه شکل‌گیری و رشد گارنت در سنگ‌های منطقه منجر شد.

گارنت‌ها یکی از مهم‌ترین گروه‌های کانی‌های ارتوسیلیکاتی با فرمول $\{X_3\}\{Y_2\}$ هستند. در این فرمول X، Y و Z کاتیون‌ها، {} نشانگر کنوردیناسیون هشت یا دودکاهدرال کاتیون‌ها، علامت [] بیانگر کنوردیناسیون شش یا اکتاهدرال، () کنوردیناسیون چهار یا تراهدرال و ϕ مشخص‌کننده جایگاه آنیونی است (Locock, 2008). گارنت‌ها در محدوده گسترده‌ای از محیط‌های زمین‌شناسی شامل سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی یافت می‌شوند، لذا مطالعه کانی‌شناسی و شیمی گارنت و چگونگی تشکیل و رشد آن همواره مدنظر پژوهشگران بوده است و راهکارهای کاربردی بسیاری نیز در این زمینه ارائه کرده‌اند. تشخیص سرعت سرد شدن در حین تبلور اغلب بر اساس منطقه‌بندی ترکیبی و ضرایب انتشار کاتیون‌ها در کانی‌هایی نظیر گارنت، امکان‌پذیر است. (Spear & Daniel 1998 & 1999) با بررسی تمرکز منگنز به بررسی فرایند زمان هسته‌زایی و تاریخچه رشد گارنت پرداخته و از منطقه‌بندی منگنز در درون گارنت به‌عنوان شاخصی برای بررسی زمان استفاده کرده‌اند. نامبردگان همچنین نشان دادند که منطقه‌بندی در همه عناصر Fe، Mn، Mg و Ca نمی‌تواند به‌طور همزمان در تعادل با هم باشد. در مدل‌های اولیه (مانند Hollister, 1966; Cygan & Lasaga, 1982) ناهمگنی فازهای جامد را مربوط به تهی‌شدگی مذاب از برخی ترکیبات در حین رشد بلورها دانسته و پدیده انتشار را در این مدل‌ها در نظر نگرفته بودند؛ اما Anderson & Buckley (1973) نشان دادند که انتقال ماده در کانی‌های طبیعی امکان‌پذیر است و به این ترتیب، پدیده رشد کانی‌ها بر اساس مدل‌های انتشاری نیز قابل توجیه شد (Loomis, 1978; Lepezin & Korolyuk, 1984; Foster (1981)). سرعت انتقال نسبی این عناصر را برای شیت‌های سیلیمانیت‌دار اندازه‌گیری نمود و دریافت که سرعت انتقال Ca نسبت به Fe، Mn و Mg بسیار کمتر است.

۲- زمین‌شناسی منطقه

منطقه دهنو در ۵ کیلومتری شمال‌باختری شهر مشهد (در بین طول جغرافیایی ۲۲' ۵۹" تا ۲۶' ۵۹" عرض و ۲۰' ۳۶" تا ۲۲' ۳۶" شمالی)، در محدوده زون ساختاری بینالود و در امتداد خاوری سلسله جبال البرز قرار دارد. واحدهای اصلی سنگی موجود در ناحیه مورد مطالعه به مساحت تقریباً دو کیلومتر مربع شامل واحد تونالیت (تا دیوریت و گرانودیوریت) دهنو و شیست‌های اطراف آن هستند (شکل ۱). واحد سنگی آذرین مورد مطالعه بخشی از برون‌زدهای ناپیوسته از توده‌های گرانیتیویدی مشهد محسوب می‌شود. بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی تشکیل این گرانیتیویدها عمدتاً به فازهای پس از کوهزایی (POG) نسبت داده شده‌اند (صمدی، ۱۳۸۷). (Mirnejad et al. (2013) و Samadi et al. (2014a) به طبقه‌بندی گرانیتیویدهای مشهد با توجه به اختلاف در ترکیب سنگ‌شناسی، بافت و سن نسبی آنها پرداخته‌اند. (Samadi et al. (2014a) با توجه به داده‌های ایزوتوپی موجود، عناصر اصلی و نیز کمیاب، توده نفوذی دهنو را از نوع گرانیتیویدهای نوع ۱ و حاصل تبلور از یک مذاب گرانیتیویدی با منشأ پوسته تحتانی معرفی نمودند. در مطالعه Karimpour et al. (2010) بر اساس روش اورانیم - سرب (زیرکن) بر روی توده نفوذی دهنو، سن ۲۱۵ ± (۴) میلیون سال به دست آمده است که با سن تریاس بالایی (نورین) تطابق دارد. دگرگونی ناحیه‌ای در تریاس به وقوع پیوسته و منجر به تشکیل گستره وسیعی از گارنت‌شیست‌ها شده و پلوتونیم همزمان با آن، موجب شده گرانیتیویدهای منطقه میلونیتی شوند (Alavi, 1991). بر اساس مطالعات صمدی (۱۳۹۲)، اختصاصات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه از خصوصیات یک شیار قاره‌ای حکایت می‌کند که در پرمین آغاز شده، پس از تشکیل گرابن‌های متعدد، رسوبات داخل آنها در نتیجه فروشینی و تعادل حرارتی بدون تغییر شکل و به صورت هم‌فشاری، دگرگونی ناحیه‌ای از نوع فشار پایین - دمای بالا را تحمل نموده است. در هنگام دگرگونی، توده‌های گرانیتیویدی به این نوار دگرگونی تزریق شده‌اند. بر اثر تزریق و جایگیری این توده در شیست‌های منطقه باریکه‌ای از هورنفلس به ضخامت ۲۰۰ متر تشکیل شده است.

۳- روش مطالعه

ترکیب شیمیایی گارنت‌های مورد مطالعه توسط مؤسسه مطالعه تحولات کره‌زمین، بخش علوم و فناوری زمین - دریا (IFREE) در کشور ژاپن از بخش‌های درونی به بیرونی، با استفاده از ریزپردازنده JEOL (مدل JXA-8800 (WDS) و JXA-8500F) با ولتاژ ۱۵ kV و ۱۵ nA مورد تجزیه نقطه‌ای قرار گرفت و سپس تصحیحات استاندارد بر روی داده‌ها انجام شد. همچنین تعدادی از نمونه‌های سنگ کل با استفاده از روش فلورسانس اسپکترومتری پرتو ایکس (XRF)، در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تجزیه شدند که نتایج تجزیه عناصر اصلی آنها در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است.

۴- سنگ‌نگاری

۴-۱. توده نفوذی دهنو

توده آذرین دهنو از نظر شیمی سنگ کل، دارای ترکیب تونالیت (تا دیوریت و گرانودیوریت) بوده و بر اساس مطالعات صمدی (۱۳۸۷) حاصل آرایش مذاب گوشته‌ای با پوسته تحتانی است. از لحاظ کانی‌شناسی از کوارتز (۲۰-۳۰٪)، فلدسپار (۴۵-۵۰٪)، آمفیبول (در حدود ۱۰٪) و نیز کانی‌های ثانوی و فرعی شامل گارنت، بیوتیت، مسکوویت، اپیدوت، کلریت، کلسیت و ایلمنیت با بافت گرانولار تشکیل شده است. گارنت یکی از کانی‌های فرعی موجود در توده نفوذی دهنو است. در نمونه دستی این کانی از نظر ابعاد به قطر یک تا دو سانتی‌متر می‌رسد ولی در نمونه‌های میکروسکوپی گارنت‌هایی با ابعاد کوچک‌تر نیز قابل مشاهده است. گارنت‌ها اغلب

۴-۲. هورنفلس

طی جایگیری مذاب توده نفوذی دهنو به درون شیست‌های منطقه، باریکه‌ای از هورنفلس در درون شیست‌ها و در اطراف توده نفوذی تشکیل شده است. کانی‌های تشکیل‌دهنده آن شامل کوارتز، فلدسپار، بیوتیت، مسکوویت، گارنت، آندالوزیت، کلریت، تورمالین، سیلیمانیت (فیبرولیت)، استارولیت و ایلمنیت هستند (صمدی، ۱۳۸۷). گارنت موجود در این سنگ‌ها نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل بوده و اندازه آنها (تقریباً یک تا یک و نیم میلی‌متر) در حدود یک‌دهم اندازه گارنت‌های موجود در توده آذرین و حتی اندکی کوچک‌تر از گارنت‌های موجود در شیست‌های مجاور است. ادخال‌هایی از کوارتز، میکا و ایلمنیت درون آنها وجود دارد و توسط فیبرولیت و بیوتیت احاطه شده‌اند. ترکیب شیمیایی آنها آلماندین (- اسپسارتین) است (جدول ۲) ولی در مقایسه با گارنت موجود در توده آذرین، میزان آلماندین آنها به مراتب غنی‌شدگی بیشتر و بر عکس، سایر اعضای نهایی تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۲). در این گارنت (شکل ۲-ب) میزان اسپسارتین و آلماندین از مرکز به سمت حاشیه دانه به ترتیب در حال کاهش و افزایش است و مقدار پیروپ و گروسولار تا حدودی کاهش نشان می‌دهد.

۴-۳. شیست

شیست‌های منطقه دهنو دارای بافت پورفایروبلاستیک با پورفایروبلاستیک‌هایی از جنس گارنت به صورت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل هستند. کانی‌های دیگر آنها شامل کوارتزهای بی‌شکل دانه‌ریز تا دانه متوسط، آلپیت، بیوتیت، مسکوویت، آندالوزیت، تورمالین، سریسیت، زیرکن و ایلمنیت هستند. وجود مسکوویت و بیوتیت در ایجاد شیستوزیته در این سنگ‌ها مؤثر بوده است (صمدی، ۱۳۸۷). گارنت‌ها در این سنگ‌ها دارای بافت «سایه فشاری» بوده و در برخی از مقاطع بیوتیت‌ها اطراف آنها را احاطه کرده‌اند. ادخال‌هایی از کوارتز، مسکوویت و بیوتیت در آنها دیده می‌شود. در مقایسه با گارنت موجود در توده آذرین بسیار ریزدانه‌تر (با قطر دو تا دو و نیم میلی‌متر) هستند و از نظر شیمیایی (جدول ۳)، ترکیب آنها به ترکیب گارنت موجود در هورنفلس شباهت بسیاری دارد، ولی با گارنت موجود در توده آذرین کاملاً متفاوت است (شکل ۲). میزان آلماندین در بخش‌های حاشیه دانه گارنت مورد مطالعه بیشتر از مرکز آن است ولی در مورد اسپسارتین و پیروپ تغییرات به روشنی و وضوح مشاهده نمی‌شود اما در مقایسه، روند تغییرات افزایش و کاهش پیروپ و اسپسارتین عکس هم است. گروسولار تغییراتی را نشان نمی‌دهد (شکل ۲-پ).

۵- بحث

نتایج پژوهش‌های اخیر دانشمندان نشان داده است که سرعت‌های نسبی انتشار به صورت $Mn > Fe > Mg > Ca$ بوده و انتشار عناصر $Mn > Fe > Mg$ و Mn در سیلیکات‌ها

آن تا حدودی ارتباط مستقیم دارد، به طوری که مثلاً میزان آهن در گارنت موجود در توده آذرین کمتر از آهن در گارنت درون شیست و هورنفلس است؛ همان گونه که میزان آهن در سنگ میزبان توده آذرین نیز نسبت به شیست کمتر است. در شکل ۳، تغییرات اکسید عناصر در شیست تا توده آذرین مقایسه شده‌اند (جدول ۴). تغییرات عناصر درون توده آذرین قابل بررسی است. همان گونه که مشاهده می‌شود، عناصر Ti، Mn و Fe در نمونه‌های DTG 1 نسبتاً اندکی (به ترتیب در حدود 0.3~، 0.01~ و 3~ wt%) بیشتر از نمونه‌های مربوط به بخش‌های مرکزی تر توده (نمونه DTG 2 و DTG 3) هستند؛ اما سدیم رفتار عکس نشان می‌دهد. سایر عناصر (Ca، Mg، K، Al) تغییرات مشخصی نشان نمی‌دهند.

از سویی دیگر، در بخش حاشیه‌ای و در فاصله مرزی دوپست متری توده آذرین با شیست‌ها این بررسی‌ها حاکی از کاهش بسیار اندک عناصر آلومینیم، کلسیم، پتاسیم، منیزیم و سدیم از طرف توده آذرین تا شیست‌ها است؛ اما به ناگهان، مقدار آهن و آلومینیم در نمونه شیست افزایش یافته، اما سایر عناصر کاهش نشان می‌دهند. در واقع میزان کلسیم، آهن، سیلیسیم و آلومینیم دارای شدیدترین تغییرات از توده آذرین تا شیست هستند که این تغییرات بیانگر تمایز شدید بین ترکیب شیمیایی این دو واحد سنگی است. این پدیده وجود پتانسیل گرادیان ژئوشیمیایی در ناحیه مرزی برای این عناصر را نشان می‌دهد. این گرادیان شیمیایی برای عناصر Mg، K، Ti و Mn کمترین شیب تغییرات را نشان می‌دهند.

۵-۲. بررسی شیمی گارنت

– **گارنت موجود در توده نفوذی دهنو:** به عقیده Carlson (2006) پدیده انتشار در دماهای پایین به طور قاعده‌دار به سرعت انتشار و ترکیب میزان گارنت بستگی دارد. به این ترتیب که در دماهای بالاتر پدیده انتشار تمام بلور را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب کاهش تمرکز Mg و افزایش مقدار Fe در مرکز بلور می‌شود. در منطقه دهنو نیز میزان Mg در مرکز گارنت‌ها کم و میزان Fe بیشتر است، اما با در نظر گرفتن پدیده سرد شدن توده آذرین و کاهش دما در هنگام رشد دانه‌های گارنت، مشاهده می‌شود که مقدار Mg به سمت حاشیه گارنت کاهش و مقدار Fe افزایش می‌یابد. این روند تغییرات عناصر از مرکز تا حاشیه گارنت‌های یادشده تنها بیانگر سرد شدن است. در این صورت این مسئله به خوبی آشکار می‌کند که بلورهای گارنت موجود در نمونه‌های آذرین به هنگام تشکیل و تبلور از مذاب، دچار تغییر در میزان عناصر خود شده‌اند.

– **گارنت موجود در شیست و هورنفلس:** همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود ترتیب میزان فراوانی نسبی عناصر در سنگ میزبان شیستی (Fe>>Mg>Ca>>Mn)، با گارنت موجود در این سنگ (Fe>>>Mn>Mg>Ca) اندکی متفاوت است. در حقیقت، در مورد فراوانی عنصر آهن سازگاری معقولی بین گارنت و سنگ میزبان وجود دارد ولی در مورد سایر عناصر سازگاری کمتری مشاهده می‌شود. به عبارتی دیگر، مقدار Fe بالاتر در سنگ میزبان موجب افزایش میزان فراوانی آهن (به ویژه در مقایسه با سه عنصر دیگر) در گارنت شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که مقادیر منیزیم و به ویژه کلسیم در مقطع مورد مطالعه گارنت درون هورنفلس و شیست نسبت به گارنت درون توده آذرین همچنان ثابت و بدون تغییر باقی مانده است و مقدار آن در شیست و هورنفلس در مقایسه با توده بسیار کمتر است؛ اما در مورد دو عنصر Fe و Mn که دارای فراوانی بیشتری هستند، روند تغییرات در طول مقطع گارنت به شدت نوسانی و نامنظم است (شکل ۴). شدت بی‌نظمی این عناصر را می‌توان به صورت Ca & Mg > Mn & Fe معرفی کرد.

۵-۳. بررسی پدیده انتشار در گارنت

به طور کلی، بررسی تغییرات اکسید عنصرهای Fe، Ca، Al، Mg و Mn از مرکز تا حاشیه گارنت سنگ‌های مورد مطالعه (از سمت توده آذرین به طرف هورنفلس و سپس شیست)، نشان می‌دهد که به غیر از عنصر Al که همانند Si روند تغییرات

بسیار سریع‌تر از Ca است. در حقیقت، منطقه‌بندی Fe، Mg و Mn بیانگر تعادل با سنگ میزبان است، در حالی که منطقه‌بندی Ca به وسیله پدیده انتقال انتشاری بین سنگ میزبان و بلور در حال رشد کنترل می‌شود (Spear & Daniel, 2001). (Spear & Daniel (2001) در این رابطه دو اصطلاح را ارائه نمودند: ۱) کنترل تعادلی (Equilibrium control) و ۲) کنترل انتقالی (Transport control). بر این اساس: الف) کنترل تعادلی به معنای تعادل شیمیایی است که در حاشیه همه فازها و در همه زمان‌ها برقرار می‌شود. به این ترتیب، در سنگی که در آن تعادل حاکم است، ترکیب حاشیه همه فازهای مشابه یکسان خواهد شد، اما وجود منطقه‌بندی در بلورها مانع تعادل بخش‌های داخلی تر بلورها می‌شود. باید توجه داشت که کنترل تعادلی ممکن است در مقیاس‌های گوناگون و برای عناصر مختلف اتفاق بیفتد، یعنی برخی عناصر ممکن است در اندازه یک نمونه دستی از خود تعادل نشان دهند و برخی دیگر صرفاً در مقیاس کوچک چند سانتی متری تعادل نشان دهند. جدای از مقیاس، در کنترل تعادلی، ترکیب فاز به وسیله روابط فازی P-T-X سیستم بیان می‌شود؛ ب) کنترل انتقالی به شرایطی مربوط است که گرادیان‌های قابل توجهی از ترکیب یک عنصر در حجم مورد نظر (سنگ میزبان) وجود داشته باشد؛ لذا ترکیب فاز در حال رشد (مثلاً گارنت) تا حدودی توسط شار عناصر کنترل می‌شود. بر اساس پیشنهاد Carlson (2006) یون‌های کوچک‌تر (مثل Mg)، در مقایسه با یون‌های بزرگ‌تر (مثل Ca)، کمتر تحت تأثیر تغییر ترکیب شیمیایی قرار می‌گیرند. این روند را می‌توان به صورت افزایش شعاع یونی $Mg < Fe < Mn < Ca$ نمایش داد و بر اساس آن، ارزش K که همان پارامتر نرخ انتشار است، کاهش می‌یابد؛ یعنی مقدار Mg که کمترین حساسیت را نسبت به تغییر ترکیب شیمیایی از خود نشان می‌دهد، دارای بیشترین نرخ انتشار است. مطالعات Korolyuk & Lepezin (2008) نشان می‌دهد که ضرایب انتشار برای عناصر آهن، منگنز، منیزیم و کلسیم به صورت $D_{Ca} > D_{Mg} > D_{Fe} > D_{Mn}$ بوده و به تغییرات شرایط دما و فشار بستگی دارد و در واقع با افزایش فشار، ضریب انتشار این عناصر کاهش و با افزایش دما، ضریب انتشارشان افزایش می‌یابد.

طبق نتایج به دست آمده توسط صمدی (۱۳۸۷) و Samadi et al. (2014b) مشخص شد که گارنت‌های موجود در توده آذرین دهنو فنوکریست و از نظر فرایندهای تشکیل، از گارنت‌های موجود در شیست‌ها و هورنفلس‌ها متمایز هستند، بنابراین در این قسمت به بررسی شیمی گارنت و سنگ میزبان آن و سپس تأثیر پدیده انتشار بر تشکیل یا رشد گارنت در درون شیست‌ها و هورنفلس‌ها و نیز توده نفوذی دهنو پرداخته می‌شود.

۵-۱. بررسی شیمی سنگ میزبان

مطالعات صمدی (۱۳۸۷) گویای حضور کانی گارنت در توده نفوذی دهنو است. همان‌طور که اشاره شد این سنگ‌ها از نوع گرانیتوئیدهای نوع I با منشأ آلابیش مذاب گوشته‌ای با پوسته تحتانی بوده و خاستگاه مذاب آنها با سنگ‌های متاپلیتی منطقه (شیست‌ها) بی‌ارتباط است (صمدی، ۱۳۸۷، ۱۳۹۲؛ Samadi et al., 2014a). بنابراین به منظور بررسی بهتر چگونگی رشد گارنت‌ها و تأثیرگذاری پدیده انتشار بر آنها طی فرایند جایگیری توده نفوذی به درون شیست‌ها، روند تغییرات اکسید عناصر Fe، Mn، Mg و Ca در سنگ کل میزان آنها در یک نمونه از شیست مجاور توده آذرین و ۷ نمونه از توده در بخش‌های مجاور شیست‌ها تا فاصله ۳۷۰۰ متری بررسی شد (جدول ۴). نمونه‌برداری از شیست و توده آذرین در بخش‌های مجاور شیست (در امتداد جنوب‌خاوری) در فاصله ۲۰۰ متری (نمونه‌های مربوط به DTG 1 با فواصل نمونه‌برداری ۲۰ متری)، در فاصله ۳۲۰۰ متری (نمونه‌های مربوط به DTG 2، با فواصل نمونه‌برداری ۲۰ متری) و نیز در فاصله ۳۷۰۰ متری (نمونه‌های مربوط به DTG 3، با فواصل نمونه‌برداری ۲۰ متری) انجام پذیرفته است. به طور کلی، با مقایسه نتایج حاصل از بررسی ترکیب گارنت و سنگ میزبان آن (شکل‌های ۳ و ۴)، مشاهده می‌شود که تغییرات عناصر Fe، Mn، Mg و Ca در گارنت با سنگ میزبان

گارنت) تنها تا حدودی توسط جریان عنصر کلسیم کنترل می‌شود؛ اما بررسی‌ها نشان می‌دهند که چنین فرضی در مورد گارنت‌های موجود در سنگ‌های آذرین دهنو با توجه به دلایل گوناگون غیر قابل قبول است، زیرا: (۱) میزان Ca در مرکز بلورهای گارنت سنگ‌های آذرین دهنو به مراتب بیشتر از مقدار آن در سرتاسر دانه گارنت درون شیست و هورنفلس است؛ (۲) همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات میزان Ca در گارنت‌های مذکور، از مرکز تا حاشیه، یک روند کاهشی دارد. پس از مرکز تا حاشیه، هیچ شباهتی بین گارنت‌های درون توده آذرین و گارنت موجود در شیست و هورنفلس از نظر شیمیایی وجود ندارد. لذا بر پایه بررسی پدیده انتشار عناصر، فرضیه سقوط دانه گارنت از شیست به درون مذاب گرانیتویدی و سپس رشد آن در مذاب مذکور، در مورد گارنت‌های منطقه دهنو مردود است.

با توجه به ضریب انتشار بالاتر آهن در گارنت، فراوانی غالب گارنت‌ها در بخش‌های حاشیه توده آذرین و نیز وجود گرادیان شیمیایی آهن از سمت توده به طرف شیست، می‌بایست میزان این عنصر حداقل در حاشیه گارنت‌های توده آذرین اندکی افزایش نشان می‌داد، در حالی که این چنین نیست و با توجه به شکل ۴، میزان آهن گارنت در توده گرانیتویدی به‌ویژه در بخش‌های حاشیه‌ای بسیار کمتر از آهن در بخش حاشیه گارنت در شیست است؛ لذا تأثیر پدیده انتشار در گارنت درون توده آذرین بسیار ناچیز بوده است. همچنین، اگر پدیده انتشار بر روی این گارنت‌ها تأثیر شاخصی گذاشته باشد بایستی باعث همگن شدن نسبی آنها شده و با توجه به ضرایب انتشار، ترکیب آنها از لحاظ تمام عناصر تعدیل می‌شد؛ اما مشاهده می‌شود که مثلاً عنصر آهن که دارای ضریب انتشار نسبتاً بالایی است، همچنان ناهمگن باقی‌مانده و در طول فاصله هسته تا حاشیه گارنت، دارای روند کاهشی است. در حقیقت، با توجه به ضرایب و سرعت انتشار که به صورت $D_{Mn} > D_{Fe} > D_{Ca}$ است؛ اگر انتشار در هنگام رشد این گارنت‌ها تأثیری داشت، آنگاه باید Fe و Mn به دلیل سرعت انتشار بالاتر، در طول مقطع گارنت توزیع یکنواخت و همگن‌تری داشته و در مقابل Ca و Mg به دلیل انتشار کندتر روندهای نامنظم‌تری را نشان می‌دادند.

دما به‌عنوان یک عامل مؤثر، می‌تواند موجب افزایش ضریب انتشار شود (Korolyuk & Lepezin, 2008). بر اساس مطالعات صمدی و همکاران (۱۳۹۱-الف) بر روی سنگ‌های دگرگونی منطقه دهنو، فشار و دمای به‌دست آمده برای پدیده دگرگونی و تشکیل هورنفلس (550°C , $4/3\text{ kbar}$) در شرایط تعادلی پایین‌تری نسبت به گارنت شیست (569°C , $5/3\text{ kbar}$) قرار دارد. از سوی دیگر مطالعه صمدی و همکاران (۱۳۹۱-ب) و Samadi et al. (2014a) بر روی شیمی گارنت و سنگ‌های آذرین میزان آنها بیانگر تشکیل آنها در دمای حدود 800 تا 950 درجه سانتی‌گراد و فشار $6/4$ تا 12 کیلوبار است. بنابراین در بررسی گارنت‌های حاشیه توده آذرین، می‌توان گفت که با توجه به اینکه مذاب در بخش‌های حاشیه‌ای خود به دلیل دمای بالاتر، دارای بیشترین تبادل دما با شیست‌های سردتر مجاور بوده، لذا پدیده انتشار در این بخش‌ها می‌تواند با شدت بیشتری روی بدهد؛ اما با توجه به اینکه سرعت سرد شدن مذاب در این بخش‌ها تقریباً بیشتر از سایر قسمت‌های توده نفوذی است، لذا فرصت رویداد پدیده انتشار بسیار محدود شده است و به این ترتیب مشاهده می‌شود که Fe با بالاترین نرخ انتشار و نیز Ca با کمترین نرخ انتشار در بخش‌های حاشیه گارنت‌ها که در دمای کمتری (نسبت به بخش‌های مرکزی) متبلور شده‌اند، کمتر است. در واقع، بر خلاف مطالعات تجربی (Korolyuk & Lepezin, 2008) که در آن میزان دما در مدت انتشار، هر بار ثابت در نظر گرفته شده و سپس مقدار ضریب انتشار مربوط به آن دما محاسبه شده است، در اینجا برای هر لحظه از افت دمای توده نفوذی گرانیتویدی دهنو، باید به کاهش مقادیر ضریب انتشار عناصر طی کاهش دما و تبلور نیز توجه داشت؛ بنابراین تغییرات کلسیم، از مرکز تا حاشیه، در این گارنت‌ها تحت تأثیر شاخص پدیده انتشار قرار نگرفته است، بلکه متأثر از تغییرات ترکیب خود مذاب بوده است.

آن ثابت است، سایر عناصر با توجه به نوع گارنت موجود در سنگ دچار تغییراتی شده‌اند (شکل ۴). همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در مقیاس مشابه میزان تغییرات عناصر در نمونه گارنت موجود در نمونه‌های آذرین، در بخش‌های حاشیه‌ای و مرکزی‌تر، نسبت به نمونه‌های گارنت موجود در هورنفلس و شیست تقریباً بسیار ثابت و یکنواخت‌تر به نظر می‌رسد (به‌ویژه در مورد عناصر Fe و Mn). ترتیب فراوانی این عناصر هم در گارنت $(\text{Fe} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Mn})$ و هم در ترکیب سنگ کل توده گرانیتویدی میزان آن $(\text{Fe} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Mn})$ بسیار مشابه است.

تغییرات شیمیایی گارنت را به‌طور خلاصه می‌توان این‌گونه بیان نمود که: (۱) میزان فراوانی عناصر در گارنت موجود در توده آذرین به‌صورت $\text{Fe} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Mn}$ است ولی در گارنت موجود در شیست و هورنفلس مشابه یکدیگر و به‌صورت $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Mg} > \text{Ca}$ است (علامت > بیانگر شدت و افزونی در فراوانی عنصر است)؛ (۲) میزان آهن در گارنت موجود در هورنفلس و شیست نسبت به گارنت موجود در توده نفوذی منطقه به‌مراتب بیشتر است؛ اما الگوی آن از مرکز تا حاشیه گارنت موجود در هورنفلس و شیست بسیار نامنظم و نوسانی بوده، در حالی که در توده آذرین دارای شیب ثابت و ملایمی است؛ (۳) مقدار منیزیم از مرکز تا حاشیه گارنت موجود در توده آذرین افزایش یافته است، اما Mg در گارنت موجود در شیست و هورنفلس مقدار بسیار کمتری را داشته و تغییرات آن از مرکز تا حاشیه محدود و نامشخص‌تر بوده و منطقه‌بندی و روند تغییرات خاصی را نشان نمی‌دهد؛ (۴) مقدار Ca گارنت‌ها نیز رفتار ژئوشیمیایی همانند Mg دارد با این تفاوت که در توده آذرین تغییرات آنها از مرکز تا حاشیه عکس تغییرات یکدیگر است. همچنین میزان فراوانی Ca در گارنت درون توده آذرین بیشتر از Mg است ولی در شیست و هورنفلس مقدار Mg از Ca بیشتر است؛ (۵) رفتار و الگوی ژئوشیمیایی Mn نیز با Fe قابل مقایسه است. منگنز در گارنت موجود در شیست و هورنفلس الگوی مشابهی داشته و مانند آهن دارای رفتار به‌شدت نامنظم و نوسانی است و از روند و الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند؛ در حالی که در گارنت موجود در توده آذرین رفتار آن دارای یک شیب ثابت و ملایم است با این تفاوت که با کاهش میزان آهن به سمت حاشیه بلور مقدار منگنز روند افزایشی دارد.

با توجه به شکل ۳، در مورد سنگ میزان گارنت‌ها، شیب زیاد تغییرات کلسیم از سمت نمونه‌های آذرین به‌طرف شیست‌ها، بر اساس ذوب بخشی رسوبات، تبدلات شدید شیمیایی طی متاسوماتیسم و در نتیجه پدیده انتشار چندان منطقی به‌نظر نمی‌رسد. همچنین اگر پدیده انتشار تأثیرگذار بود، قاعدتاً آهن به دلیل سرعت انتشار بالاتر در مقایسه با منیزیم و منگنز شیب تغییرات نسبتاً کمتری را نشان می‌داد؛ اما این چنین نیست، بنابراین می‌توان گفت شرایط محیطی تشکیل گارنت در درون شیست و هورنفلس از شرایط محیطی که در آن گارنت در درون مذاب گرانیتویدی تشکیل و رشد یافته متمایز است. از این رو، تغییرات عناصر از سمت مرکز تا حاشیه توده آذرین و میزان عناصر در شیست مجاور بیانگر نبود ارتباط شیمیایی شاخصی بین این دو واحد سنگی است و نشان می‌دهد که مذاب گرانیتویدی دهنو تحت تأثیر آرایش با این سنگ‌ها قرار نگرفته است.

یکی از حالت‌های ممکن که شاید بتواند پدیده انتشار درون این گارنت‌ها را توجیه نماید این است که فرض شود دانه گارنت از شیست‌ها به‌درون مذاب سرشار از کلسیم گرانیتویدی فرو افتاده است و سپس با توجه به این که میزان کلسیم شیست‌ها نسبت به سنگ‌های آذرین کمتر است، لذا یک گرادیان شیمیایی از نظر میزان کلسیم از مذاب مذکور به‌سمت شیست ایجاد و در نتیجه پدیده انتشار، میزان Ca در بخش‌های حاشیه گارنت‌های مذکور افزایش یافته است. قاعدتاً با توجه به (Spear & Daniel, 2001)، عناصر Fe, Mn و Mg به‌صورت کنترل تعادلی، ولی Ca تا حدودی طی کنترل انتقالی تغییر می‌یابد، یعنی اگر گرادیان‌های قابل توجهی از ترکیب کلسیم در حجم مورد نظر وجود داشته باشد، ترکیب فاز در حال رشد (مثلاً

انتشار انتقالی نشده است؛ ۲) علی‌رغم سرعت انتشار بالای عنصر آهن، مقدار آهن از مرکز تا حاشیه گارنت روند کاهشی دارد؛ ۳) فرصت کوتاه برای تبلور گارنت‌ها و در نتیجه کاهش سریع دما، امکان رویداد انتشار عناصر در گارنت را کاهش داده است؛ و ۴) با توجه به سرعت‌های انتشار بسیار کم چهار عنصر Mn ، Fe ، Mg و Ca ، در مقایسه با سرعت رشد و ابعاد بزرگ گارنت‌ها، آنها به‌طور شاخص تحت تأثیر پدیده انتشار رشد نیافته‌اند.

علاوه بر این، گارنت‌های درون شیست و هورنفلس نیز فاقد شواهد پدیده انتشار هستند؛ زیرا: ۱) با توجه به سرعت انتشار بالاتر Fe و Mn ، این عناصر باید در گارنت‌ها توزیع یکنواخت و همگن‌تری داشته و در مقابل Mg و Ca به‌دلیل انتشار کندتر روندهای نامنظم‌تری را نشان می‌دادند، اما این چنین نیست؛ چنانچه پدیده انتشار در هنگام رشد گارنت‌ها اثر گذاشته بود، باید مقادیر عناصر مورد بحث در گارنت درون هورنفلس حداقل در حد واسط مقادیر این عناصر در گارنت موجود در شیست و توده آذرین قرار می‌گرفت، به‌ویژه در مورد آهن که دارای سرعت انتشار بالاتری است، در حالی که این چنین نیست؛ ۳) علاوه بر این، دما و فشار تشکیل هورنفلس و شیست و سرعت‌های انتشار به‌دست آمده برای عناصر در این دماها $550^{\circ}C/4.3kbar$ برای هورنفلس و $569^{\circ}C/5.3kbar$ برای شیست) بسیار کم هستند به‌طوری‌که در چنین شرایطی پدیده انتشار درون یک گارنت با قطر دو میلی‌متر تنها در طی زمان بسیار طولانی (حدود یک تا سه میلیارد سال) می‌تواند انجام‌پذیر باشد که در آن دمای تشکیل گارنت نیز در حد مطلوب حفظ شده باشد. بنابراین، با توجه به نبود شرایط مذکور در هنگام تبلور این گارنت‌ها، پدیده انتشار بر رشد آنها تأثیر شاخصی نداشته است.

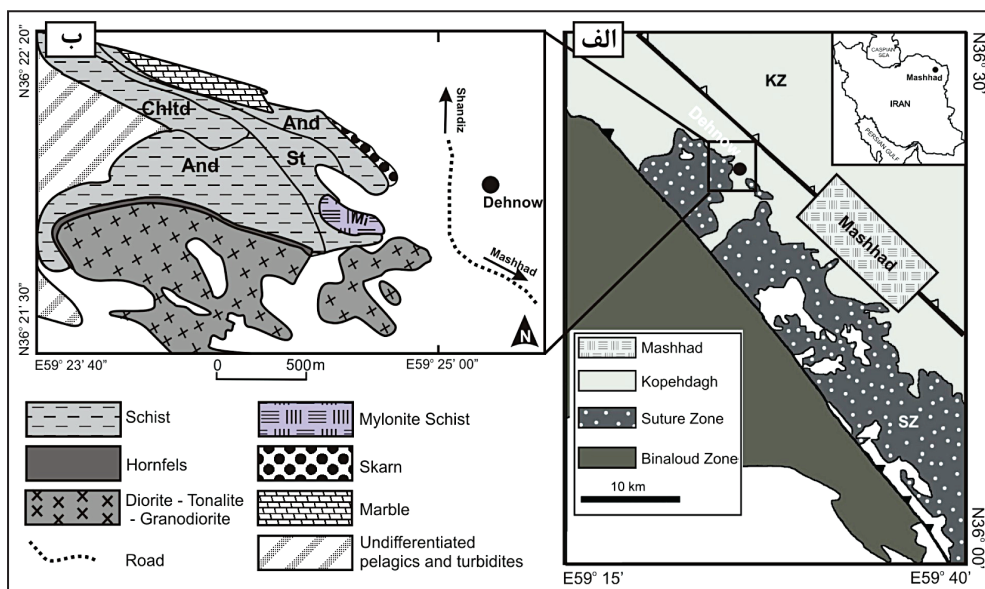
سپاسگزاری

از همکاری ارزنده دکتر هیروشی کاواباتا در مؤسسه مطالعه تحولات کره زمین، بخش علوم و فناوری زمین - دریا در کشور ژاپن، برای انجام تجزیه‌های ژئوشیمیایی این تحقیق قدردانی می‌شود.

از سویی دیگر با توجه به ابعاد نسبتاً بزرگ گارنت در توده آذرین، ماهیت فنوکریستی و در نتیجه تقدم تشکیل آنها، نمی‌توان پدیده انتشار را به عنوان عاملی برای بیان تغییرات عناصر در این گارنت‌ها معرفی کرد. (Korolyuk & Lepezin, 2008) مقادیر مربوط به فشار و دماهای مختلف و تأثیر آنها بر روی ضریب انتشار را به صورت جدولی ارائه کرده‌اند. بر اساس مطالعات تجربی و آزمایشگاهی (Korolyuk & Lepezin, 2008)، فرایند همگن شدن یک‌دانه گارنت با قطر دو میلی‌متر که از لحاظ توزیع عناصر ناهمگن است، در دمای $500^{\circ}C$ درجه سانتی‌گراد، برای عنصر Mn در حدود 1×10^9 سال، برای عنصر Fe در حدود $1/5 \times 10^9$ سال، برای Mg در حدود 2×10^9 سال و برای Ca در حدود 3×10^9 سال طول خواهد کشید. در دمای بالاتر، در حدود $650^{\circ}C$ درجه سانتی‌گراد، این فرایند برای Mn ، Fe ، Mg و Ca به ترتیب در حدود 1×10^7 ، 5×10^7 ، 1×10^8 و $1/5 \times 10^8$ سال خواهد بود. از آنجایی‌که فشار تأثیر اندکی بر روی ضریب انتشار دارد، لذا می‌توان از مقدار فشار در دگرگونی‌های مجاورتی و ناحیه‌ای چشم‌پوشی نمود. البته باید توجه داشت که ضرایب انتشار گارنت‌های طبیعی بیشتر از مقادیر به‌دست آمده در مطالعات تجربی است (Korolyuk & Lepezin, 2008). مقادیر سرعت‌های انتشار بسیار کم و فرایند همگن‌سازی گارنتی با ضخامت دو میلی‌متر در شرایط دمایی مشابه ($500^{\circ}C$ درجه سانتی‌گراد) در حدود یک تا سه میلیارد سال به‌طول می‌انجامد (Korolyuk & Lepezin, 2008). بنابراین با توجه به سرعت‌های کم انتشار به‌دست آمده برای عناصر مذکور توسط Korolyuk & Lepezin (2008) و اندازه بزرگ گارنت در توده گرانیتویدی منطقه، این پدیده تأثیری شاخص بر ترکیب و رشد گارنت‌ها نداشته است.

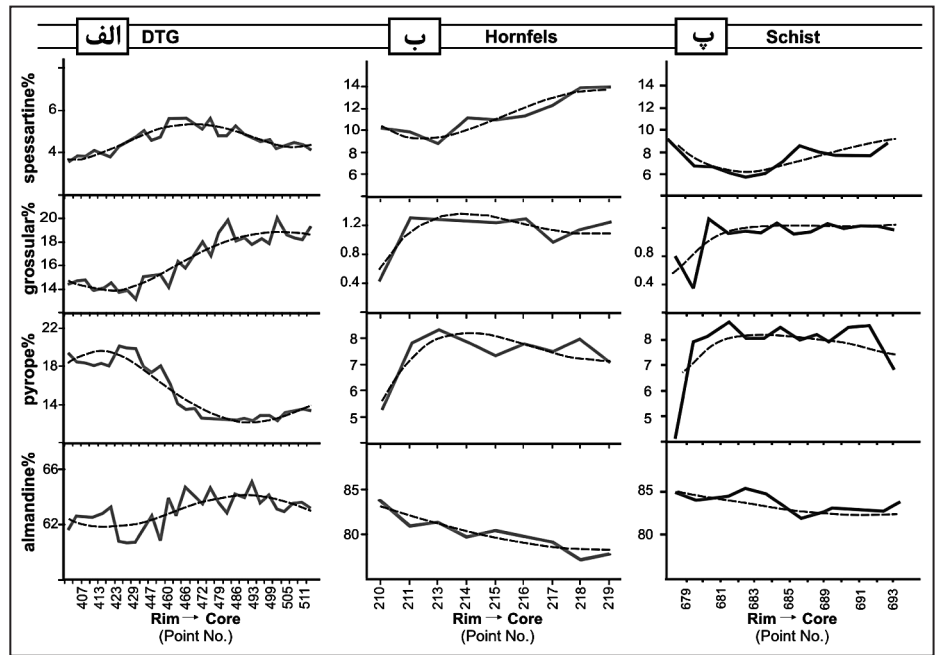
۶- نتیجه‌گیری

مطالعه گارنت موجود در توده نفوذی دهنو نشان می‌دهد که این گارنت‌ها تحت تأثیر پدیده انتشار عناصر به‌صورت شاخص قرار نگرفته‌اند و تغییرات عناصر در آنها تحت تأثیر تغییرات ترکیب شیمیایی مذابی که از آن متبلور شده‌اند بوده است. دلایل آن عبارت‌اند از: ۱) مقدار عنصر Ca در حاشیه گارنت کم است بنابراین این عنصر دچار

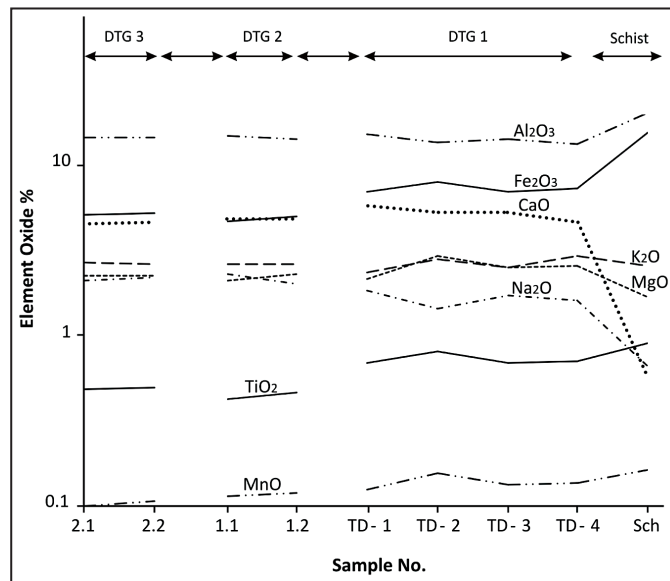


شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی الف) محدوده‌های ساختاری اصلی در شمال‌خاوری ایران (پس از Alavi, 1991)؛ ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (اقتباس از صمدی، ۱۳۹۲) [Chltd=chloritoid; St=Staurolite; And=Andalusite; BZ=Binaloud Zone; SZ=Suture Zone; KZ=Kopehdagh Zone].

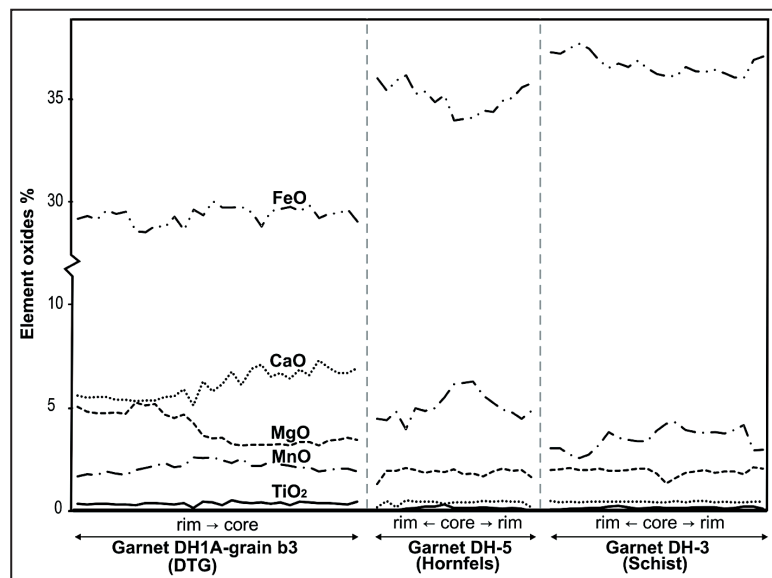
شکل ۲- تغییرات اعضای نهایی از حاشیه تا مرکز گارنت. شعاع و طول نیمرخ گارنت مورد تجزیه در سه واحد سنگی منطقه شامل الف) توده نفوذی گرانیتویدی دهنو؛ ب) هورنفلس و پ) شیست؛ به ترتیب در حدود ۱، ۱ و ۱ میلی‌متر است (داده‌ها برگرفته از جدول‌های ۱، ۲ و ۳).



شکل ۳- نمودار مقایسه تغییرات عناصر در سنگ کل، محور عمودی نمودار دارای مقیاس لگاریتمی است.



شکل ۴- مقایسه روند تغییرات اکسید عنصرهای Fe، Al، Ca، Mg و Mn در گارنت موجود در توده گرانیتویدی دهنو، هورنفلس و شیست.



جدول ۴- درصد وزنی عناصر اصلی در سنگ کل توده نفوذی دهنو (DTG). نمونه‌های TD-4 تا نمونه TD-1 به ترتیب از بخش‌های مجاور شیست‌ها تا فاصله ۲۰۰ متری توده به سمت جنوب‌خاوری و نمونه‌های 1.1 و 1.2 در همین امتداد و در فاصله ۳۲۰۰ متری و نمونه‌های 2.1 و 2.2 در فاصله ۳۷۰۰ متری برداشت شده‌اند. نمونه Sch مربوط به شیست‌های منطقه است.

Location	N36° 21.862» E059° 24.609»	N36° 21»46.9» E059° 24»48.1»		N36° 20» 02.7» E059° 25» 0.1»		N36° 19» 48.2» E059° 25» 11.1»		
Rock type	Schist	DTG 1		DTG 2		DTG 3		
Sample no.	Sch	TD- 4	TD- 3	TD- 1	1.2	1.1	2.2	2.1
(wt%)								
SiO ₂	52.28	65.37	64.18	63.12	66.60	66.25	65.98	66.50
Al ₂ O ₃	20.56	13.21	14.25	15.18	14.32	15.02	14.74	14.54
TiO ₂	0.90	0.72	0.69	0.69	0.46	0.43	0.50	0.49
Fe ₂ O ₃ (total)	15.57	7.37	7.07	7.07	4.98	4.68	5.21	5.09
MnO	0.16	0.14	0.13	0.13	0.12	0.11	0.11	0.10
MgO	1.69	2.56	2.52	2.14	2.29	2.12	2.28	2.28
CaO	0.59	4.61	5.29	5.86	4.80	4.81	4.62	4.52
Na ₂ O	0.66	1.62	1.71	1.85	2.03	2.29	2.22	2.09
K ₂ O	2.58	2.93	2.54	2.35	2.62	2.65	2.63	2.71
P ₂ O ₅	0.09	0.21	0.23	0.23	0.16	0.16	0.16	0.14
LOI	4.09	1.15	1.19	1.22	1.09	1.25	0.96	1.08
Total	95.08	98.72	98.61	98.61	99.47	99.77	99.41	99.54
K ₂ O+Na ₂ O	3.24	4.54	4.26	4.20	4.65	4.94	4.85	4.81
(ppm)								
Cl	177	188	192	164	103	88	166	166
S	nd*	nd	nd	45	43	121	nd	nd
Ba	463	509	518	475	625	605	513	619
Co	27	9	9	13	24	33	29	31
Cr	116	nd	nd	8	6	nd	3	4
Cu	13	1		15	32	42	60	17
Ni	47	2	2	3	nd	4	18	40
Pb	27	21	31	23	52	65	68	51
Rb	138	82	83	86	132	126	150	151
Sr	207	335	441	486	727	687	734	734
V	127	65	71	76	115	99	117	110
W	nd	1	4	5	nd	nd	nd	nd
Y	26	18	19	21	28	31	31	27
Zr	166	140	153	172	226	196	236	241
Zn	133	99	91	106	139	142	119	139
Nb	nd	nd	nd	nd	31	27	23	22
U	5	nd	nd	1	nd	nd	5	nd
Th	nd	nd	nd	nd	4	10	14	7

*nd= not determined

کتابنگاری

- صمدی، ر.، ۱۳۸۷- بررسی منشأ مگاکریست‌های گارنت موجود در تونالیت دهنو (شمال غرب مشهد)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۷۹ صفحه.
- صمدی، ر.، ۱۳۹۲- شیمی و خاستگاه گارنت در گرانیتوئیدها و سنگ‌های دگرگونی جنوب مشهد (خواجهرمراد، خلیج و دهنو)، رساله دکتری پترولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ۳۶۴ صفحه.
- صمدی، ر.، ولی‌زاده، م. و.، میرزاد، ح. و کاواباتا، ه.، ۱۳۹۱، الف- زمین‌دماسنجی و زمین فشارسنجی سنگ‌های دگرگونی منطقه دهنو (شمال‌باختر مشهد)، فصلنامه علوم زمین، شماره ۲۱ (۸۴)، صفحه ۳-۱۴.
- صمدی، ر.، میرزاد، ح.، شیردشت‌زاده، ن. و کاواباتا، ه.، ۱۳۹۱، ب- کاربرد شیمی گارنت در ترمودینامیکی تونالیت دهنو (شمال غرب مشهد)، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۲۰ (۲)، صفحه ۲۵۳-۲۶۴.

References

- Alavi, M., 1991- Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin 103: 983-992.
- Anderson, D. & Buckley, G., 1973- Zoning in garnets - diffusion models. Contributions to Mineralogy and Petrology 40: 87-104.
- Carlson, W. D., 2006- Rates of Fe, Mg, Mn, and Ca diffusion in garnet. American Mineralogist 91: 1-11.
- Cygan, R. T. & Lasaga, A. C., 1982- Crystal growth and the formation of chemical zoning in garnets. Contributions to Mineralogy and Petrology 79(2): 187-200.
- Foster, C. T., 1981- A thermodynamic model of mineral segregations in the lower sillimanite zone near Rangeley, Maine. American Mineralogist 66: 260-277.
- Hollister, L. S., 1966- Garnet zoning, An interpretation based on the Rayleigh fractionation model. Science 154: 1647-1651.
- Karimpour, M. H., Stern, C. R. & Farmer, L., 2010- Zircon U-Pb geochronology, Sr-Nd isotope analyses, and petrogenetic study of the Dehnow diorite and Kuhsangi granodiorite (Paleo-Tethys), NE Iran. Journal of Asian Earth Science 37: 384-393.
- Kawabata, H. & Takafuji, N., 2005- Origin of garnet crystals in calcalkaline volcanic rocks from the Setouchi volcanic belt, Japan. Mineralogical Magazine 69: 951-971.
- Korolyuk, V. N. & Lepezin, G. G., 2008- Analysis of experimental data on the diffusion coefficients of Fe, Mn, Mg, and Ca in garnets. Russian Geology and Geophysics 49: 557-569.
- Lepezin, G. G. & Korolyuk, V. N., 1984- Dinamika rosta zonal'nykh granatov v divariantnykh paragenezisakh. Geologiya i geofizika 12: 116-126.
- Locock, A. J., 2008- An Excel spreadsheet to recast analyses of garnet into end member components, and a synopsis of the crystal chemistry of natural silicate garnets. Computers and Geosciences 34(12): 769-1780.
- Loomis, T. P., 1978- Multicomponent diffusion in garnet: I. Formulation of isothermal models. American Journal of Science 278: 1099-1118.
- Mirnejad, H., Lalonde, A. E., Obeid, M. & Hassanzadeh, J., 2013- Geochemistry and petrogenesis of Mashhad granitoids: an insight into the geodynamic history of the Paleo-Tethys in Northeast of Iran. Lithos 170-171: 105-116.
- Samadi, R., Gazel, E., Mirnejad, H., Kawabata, H., Baharifar, A. A. & Sheikh-Zakaraiee, S. J., 2014^a- Paleo-Tethys subduction in the center of the Alpine-Himalayan orogenic system in the Triassic: evidence from geochemistry of I-type granitoids from Dehnow pluton, NE Iran. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie (Abhandlungen) 271(3): 285-306.
- Samadi, R., Mirnejad, H., Kawabata, H., Valizadeh, M. V., Harris, C. & Gazel, E., 2014^b- Magmatic garnet in the Triassic (215 Ma) Dehnow pluton of NE Iran and its petrogenetic significance. International Geology Review 56(5): 596-621.
- Spear, F. S. & Daniel, C. G., 1998- 3 dimensional imaging of garnet porphyroblast sizes and chemical zoning. Nucleation and growth history in the garnet zone. Geological Materials Research 1: 1-43.
- Spear, F. S. & Daniel, C. G., 1999- Diffusive transport and garnet growth, Harpswell Neck, Maine, USA. Geological Society of America Abstracts with Programs 31:168.
- Spear, F. S. & Daniel, C. G., 2001- Diffusion control of garnet growth, Harpswell Neck, Maine, USA. Journal of metamorphic Geology 19: 179-195.

Study of Fe, Mn, Mg and Ca Diffusion Effect on Garnet Growth (Dehnow Area, NW Mashhad, Iran)

R. Samadi ^{1*}, M. V. Valizadeh ², H. Mirnejad ³, A. A. Baharifar ⁴ & S. J. Sheikh Zakariaee ⁵

¹ Ph.D., Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Geology, Payame Noor University, I.R. of Iran

⁵ Assistant Professor, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2012 February 19

Accepted: 2012 December 31

Abstract

The Dehnow area is located in the northwest of Mashhad city and in the structural zone of Binalood, along the east Alborz range. The major rock units in the study area include tonalite (to diorite and granodiorite), hornfels and surrounding schist. The regional metamorphism that produced the schists occurred in Triassic, while the granitoids intruded in them during Upper Triassic, a thin layer of hornfels (~ 200m) has occurred in the intrusion, and schists contact. The Dehnow plutonic rocks, hornfels and schist contain garnet as an accessory mineral. In this work, diffusion effect of Fe, Mn, Mg and Ca in the garnet was studied. According to the geochemical data, low content of Ca in the garnet rim, falling trend of Fe from core to rim, low diffusion rates of these elements and the large size of garnets indicate that the garnets within tonalite are not distinctly affected by diffusion of these elements, but their elemental variation is resulted mostly by the chemical evolution of the melt from which they crystallized. In addition, erratic trends of Fe and Mn and the constant Ca and Mg trends from core to rim of garnets within the schist and hornfels, and also the low temperature of crystallization and the short time of garnets growth in these rocks show that diffusion effects on these garnets growth is negligible.

Keywords: Diffusion, Garnet, Tonalite - Diorite - Granodiorite, Schist, Hornfels, Dehnow

For Persian Version see pages 37 to 46

*Corresponding author: R. Samadi; E-mail: rsamadi@hotmail.com