

Mineral chemistry of garnets in the Kaleybar alkaline igneous intrusion, NW Iran

N. Ashrafi^{1*}, A. Ameri¹, A. Jahangiri¹, N. Hasebe², G. N. Eby³

1- Dept. of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Iran

2- Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, Japan

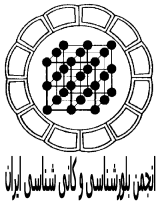
3- Dept. of Environmental, Earth, & Atmospheric Sciences, University of Massachusetts, Lowell, USA

(Received: 18/10/2008, in revised form: 14/3/2009)

Abstract: The Kaleybar alkaline igneous intrusion contains fine- to coarse-grained, anhedral to euhedral brown garnets. Most of the garnets are zoned. Generally, they occur in foid-bearing leucocratic rocks and the phenocrysts typically have analcime inclusions. According to mineral chemistry, the garnets of Kaleybar are Ti-andradites and melanites. The chemical zoning is characterized by a decrease in mole percent grossular, almandine, and spessartine and an increase in andradite from core to rim. On the basis of the present data, it can be concluded that the garnets in the Kaleybar intrusion are in the primary igneous phase that formed during the late magmatic stage and Ti-Si exchange in the tetrahedral site is the main substitution.

Keywords: *igneous garnet, mineral chemistry, foid syenite, Kaleybar.*

*Corresponding author, Tel.: +98 (0411) 2300691, Fax: +98 (0443) 6266999, E-mail: nasser.ashrafi@gmail.com



شیمی گارنت‌های توده آذرین قلیایی کلیبر، شمال غرب ایران

ناصر اشرفی^{۱*}، علی عامری^۱، احمد جهانگیری^۱، نوریکو هسب^۲، نلسون ایبی^۳

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- انستیتو فناوری زیست محیطی و طبیعی، دانشگاه کاناوا، ژاپن

۳- دپارتمان علوم زیست محیطی، زمین و جو، دانشگاه ماساچوست لول، آمریکا

(دریافت مقاله: ۸۷/۷/۲۷، نسخه نهایی: ۸۷/۱۲/۲۴)

چکیده: گارنت‌های توده آذرین کلیبر به صورت ریز بلور تا درشت بلور، بی‌شکل تا شکل‌دار، با منطقه‌بندی مشخص و گاه بدون منطقه‌بندی، همسانگرد و گاه با حاشیه ناهمسانگرد مشاهده می‌شوند. این گارنت‌ها غالباً در نمونه‌های به رنگ روشن فوئیددار دیده شده و معمولاً آنالسیم به عنوان مهمترین کانی مهمان در انواع درشت بلور حضور دارد. بر اساس شیمی کانی‌ها، گارنت‌های کلیبر را می‌توان Ti-آندرادیت و ملانیت نامید؛ منطقه‌بندی شیمیایی قابل توجه در آن‌ها بدین صورت است که معمولاً از هسته به حاشیه، کاهش درصد مولی گروسولار، آلماندین و اسپسارتین و افزایش درصد مولی آندرادیت وجود دارد. بر اساس داده‌های موجود، به نظر می‌رسد که [علل-های] گارنت‌های توده کلیبر به صورت فاز آذرین اولیه و در مراحل آخر تبلور ماگمایی تشکیل شده و جانشینی Ti-Si در نماهای چهار وجهی مهمترین جانشینی برای گارنت‌های مورد بررسی باشد.

واژه‌های کلیدی: گارنت آذرین، شیمی کانی، فوئید سینیت، کلیبر.

مقدمه

گارنت‌های غنی از Ti در گستره گسترده‌ای از دما و فشار تشکیل می‌شوند از این رو می‌توان آن‌ها را در طیف گسترده‌ای از پاراژنرها (به صورت آذرین اولیه، دوتیریک و گرمایی تا دگرگونی درجه پایین و حتی دمای بالا) مشاهده کرد. در سنگ‌های قلیایی بیشتر گارنت‌های غنی از Ti به صورت بین دانه‌ای یا دانه‌های بی‌شکل در زمینه یافت می‌شوند و به نظر می‌رسد بازتابی از واکنش‌های پیچیده مراحل پایانی (دگرنهادی) کانی‌های مافیک تشکیل شده اولیه با شاره‌های مراحل آخر باشند [۳]. برخی از پژوهشگران تشکیل گارنت‌های با منطقه‌بندی خیلی مشخص را به طور کلی به عنوان نتیجه فرایندهای پسین ماگمایی (post magmatic) در نظر گرفته‌اند [۴]. توده آذرین قلیایی کلیبر با ترکیب غالب سینیت نفلین‌دار دارای گارنت‌های قهوه‌ای تیره تا سیاه رنگی است که بر اساس

گارنت آذرین بیشتر در پگماتیت‌ها و دایک‌های آپلیتی یافت می‌شود. با این وجود، چنین گارنت‌هایی از برخی گرانیوتوئیدهای پرآلومینوس فلیسک تا خیلی فلیسک ($\text{SiO}_2 \geq 70\%$) نیز گزارش شده است [۱، ۲]. کمیابی گارنت-های تیتانیوم‌دار، رخدادهای غیرمعمول آنها و در بر داشتن کاتیونی که معمولاً در گارنت‌های دیگر حضور ندارد؛ منجر به بررسی شیمی کانی، الگوهای منطقه‌بندی، شرایط پایداری کانی و نحوه جانشینی Ti، Al و Fe^{3+} در ساختار بلوری آن‌ها شده است. گارنت‌های غنی از Ti در طیف گسترده‌ای از سنگ‌های آذرین قلیایی شامل نفلین‌سینیت‌ها، آنکارامیت‌ها، ایژولیت-ملتیزیت‌ها، فنولیت‌ها، تراکیت‌ها، سینیت‌ها، لامپروفیرها و کربناتیت‌ها یافت می‌شوند [۳]. بنا بر بررسی‌های انجام شده،

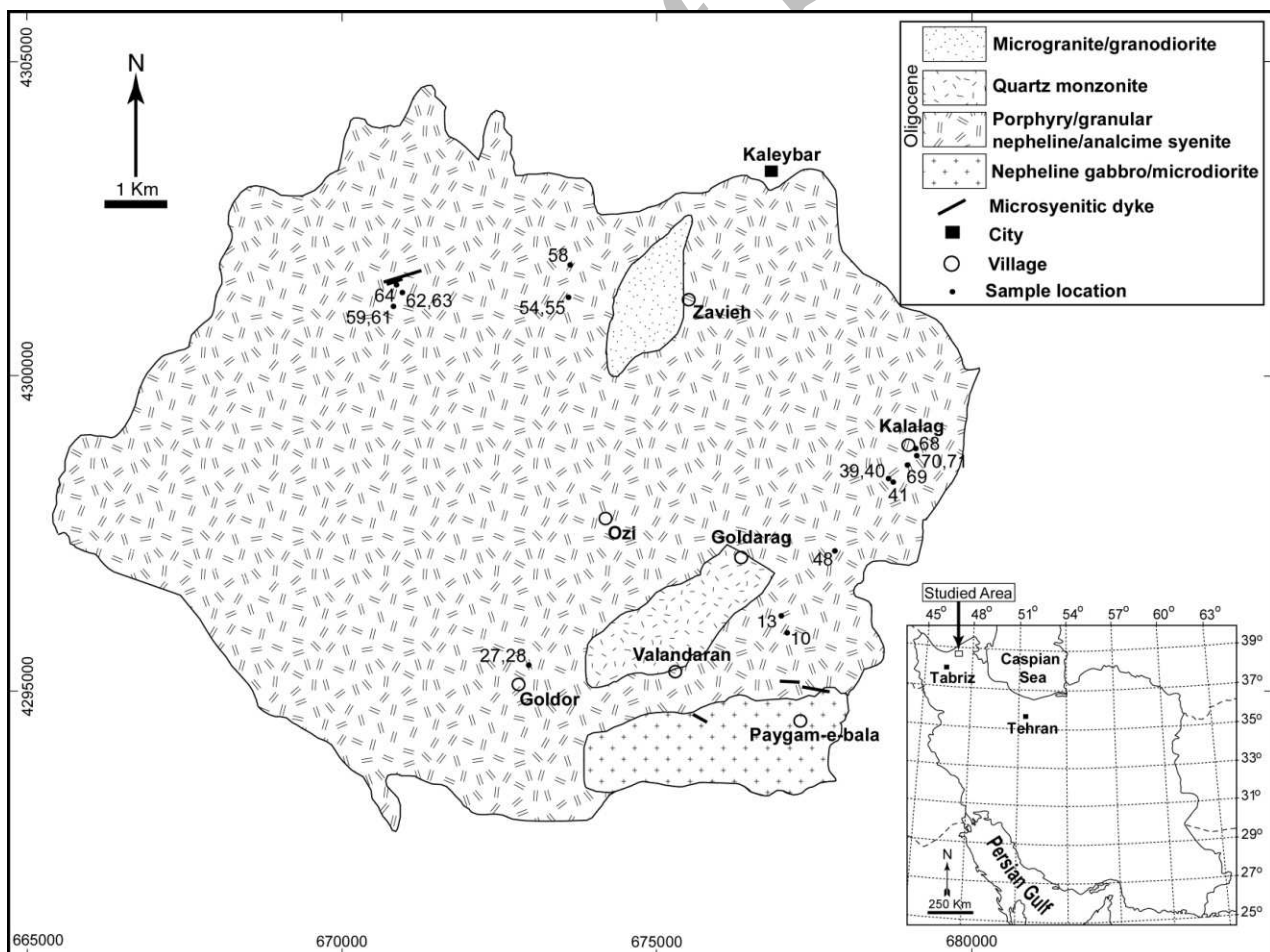
* نویسنده مسئول، تلفن: ۲۳۰۰۶۹۱ (۰۴۱۱) ۹۸+، نامبر: ۶۲۶۶۹۹۹ (۰۴۴۳) ۹۸+، پست الکترونیکی: nasser.ashrafi@gmail.com

هستند. دایک‌ها و رگه‌های وابسته به این توده غالباً دارای ترکیب نفلین سینیت و سینیت هستند. بافت سنگ‌های سینیتی پورفیروئید ولی بافت سنگ‌های بازیک اغلب دانه‌ای است. برخوردگاه این توده در شمال و غرب با شیست و ماسه سنگ‌های کرتاسه فوقانی و در بخش جنوبی با آتشفشانی‌های کرتاسه بالا مجاور است و دگرگونی مجاورتی جالب توجهی دور تا دور توده را فرا گرفته است به نحوی که سنگ‌های مجاور به کوارتزیت، مرمر و هورنفلس‌های بیوتیت-آلبیت‌دار تبدیل شده‌اند. علی‌رغم برخوردگاه توده نفلین سینیتی کلیبر با آهک‌های کرتاسه، اسکارن‌های با ارزش اقتصادی ایجاد نشده است و تنها آثاری از مالاکیت همراه با ایلمنیت و کانسنگ‌های آهن به چشم می‌خورد [۵].

ویژگی‌های میکروسکوپی جزء گارنت‌های غنی از Ti محسوب می‌شوند. این مقاله علاوه بر شیمی گارنت‌های کلیبر، به ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی میکروسکوپی آن‌ها نیز می‌پردازد.

زمین‌شناسی

توده آذرین قلیایی کلیبر در نزدیکی شهرستان کلیبر قرار دارد و از طریق جاده تبریز-اهر-کلیبر می‌توان به آن دسترسی پیدا کرد. توده آذرین قلیایی نیمه آتشفشانی تا درونی کلیبر از تنوع سنگی نسبت به توده‌های فوئید سینیتی الیگوسن دیگر در شمال غرب ایران (توده‌های بزقوش و رزگاه) برخوردار است (شکل ۱). در این توده بر اساس رده‌بندی مدی به ترتیب فراوانی، سینیت نفلین‌دار، مونزونیت کوارتزار، دیوریت/گابرو نفلین‌دار، مونزوسینیت و کلینوپیروکسنیت قابل شناسایی



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی توده آذرین کلیبر، اقتباس شده و ساده شده از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ کلیبر و ورزقان که در آن موقعیت نمونه‌های گارنت‌دار مشخص شده است.

روش بررسی

در این بررسی نمونه‌های سنگی از بخش‌های مختلف توده کلبیر برداشت شدند، سپس مقاطع نازک آماده شده از آن‌ها با میکروسکوپ قطبشی مورد بررسی قرار گرفته و نمونه‌های گارنت‌دار مشخص شدند. بخشی از تجزیه‌های نقطه‌ای در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران- که در نمودارها با علامت مربع و در جدول تجزیه‌ها با پسوند ir مشخص شده‌اند- با ریزکاونده الکترونی Cameca، مدل SX100(WDS) با ولتاژ شتابدهنده 15kV و شدت جریان 15nA؛ و بخشی دیگر با ریزکاونده الکترونی JEOL، مدل JXA-8800R با ولتاژ شتابدهنده 20kV و شدت جریان 20nA در دانشگاه کاناواوا ژاپن - که با علامت دایره در نمودارها و با پسوند jp در جدول آنالیزها مشخص شده‌اند- صورت گرفت. نتایج آنالیزها در نرم افزارهای Minpet 2.02 و Excel مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر آهن ۲ و ۳ به روش [۶] محاسبه شدند.

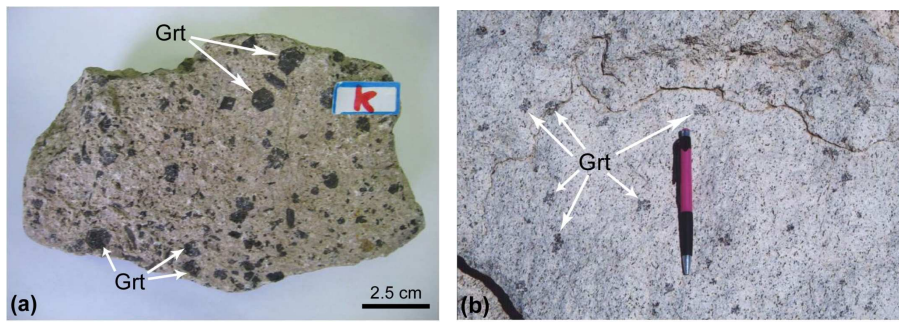
سنگ شناختی

در توده آذرین قلیایی کلبیر، بر خلاف توده‌های آذرین قلیایی دیگر شمال غرب ایران (بیوتیت نفلین سینیت بزقوش و سودولوسیت سینیت رزگاه)، کانی گارنت به عنوان مهمترین کانی عارضه‌ای یا فرعی حضور دارد. در جدول (۱) مشخصات جغرافیایی و سنگ‌شناختی نمونه‌های گارنت‌دار مورد بررسی از

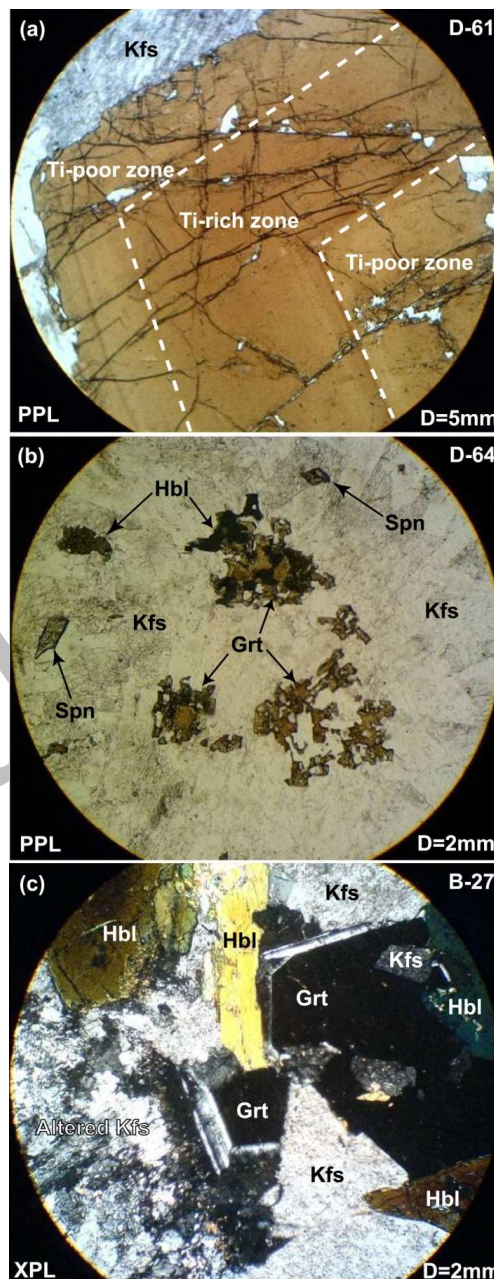
توده کلبیر ارائه شده است. در این توده بنابر بررسی‌های سنگ شناختی، گارنت به طور کلی در سنگ‌های فوئیددار (شامل نفلین و یا آنالسیم) مشاهده می‌شود. در نمونه‌های جدا شده (به رنگ روشن) بویژه دایک‌ها (D۲۸، D۵۹) گاه تا ۱۰ درصد حجمی سنگ می‌رسد که در این موارد بهتر است سنگ، گارنت فوئید سینیت نامیده شود (شکل ۲). بنا بر رده‌بندی‌های مدی و شیمیایی ترکیب سنگی نمونه‌های گارنت‌دار مورد بررسی، به ترتیب عبارتند از سینیت نفلین و یا آنالسیم‌دار و نفلین سینیت. بنابر بررسی‌های میکروسکوپی، این گارنت‌ها ویژگی‌های نوع ملانیت (تیتانیوم آندرادیت) را نشان می‌دهند؛ منطقه-بندی نوری در گارنت‌های درشت مشخص تر بوده بدین صورت که در حالت بدون آنالیزور، زون‌های به رنگ قهوه‌ای روشن و تیره قابل رویت هستند (شکل ۳a). در نمونه‌های مورد بررسی، گارنت‌ها به صورت کاملاً شکل‌دار تا بی‌شکل، دندریتی (شکل ۳b) و گاه رگچه مانند یافت می‌شوند. که معمولاً همسانگرد بوده؛ گرچه گاهی در برخی نمونه‌ها (B۲۷) در بخش حاشیه‌ای ویژگی ناهمسانگردی نشان می‌دهند (شکل ۳c). اندازه گارنت‌ها گاه تا ۱/۵ سانتی متر نیز می‌رسد؛ بلورهای درشت اغلب دارای نفوذیه‌های آنالسیم و قلیایی فلدسپار هستند، با این وجود گاهی نفوذی‌هایی از هورنبلند و تیتانیت (اسفن) نیز در آنها یافت می‌شوند.

جدول ۱ موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های سنگ‌نگاری نمونه‌های گارنت‌دار مورد بررسی از توده نفوذی کلبیر. CG: درشت دانه؛ FG: ریز دانه؛ MG: میان دانه؛ PFG: پورفیری با زمینه دانه‌ای ریزدانه. علائم اختصاری کانی‌ها از [۱۷] می‌باشد (به استثنای Opq: کانی‌های کدر).

نمونه	کانی‌های تشکیل دهنده	بافت	ارتفاع (متر)	مختصات جغرافیایی (UTM)
۱۰B	Kfs+Ne+Pl+Cpx+Hbl+Sdl+Anl+Grt+Bt+Opq+Ap	PFG	۱۷۸۴	۴۲۹۵۹۳۲ ۶۷۷۰۸۱ S ۳۸
۱۳B	Kfs+Sdl+Anl+Ne+Grt+Bt+Hbl+Pl+Ccn+Opq+Spn+Ap+Zrn	MG	۱۷۷۵	۴۲۹۶۱۸۶ ۶۷۶۹۸۶ S ۳۸
۲۷B	Kfs+Hbl+Pl±Ne+Cpx+Anl+Grt+Bt+Opq+Spn+Ap	MG	۲۰۱۳	۴۲۹۵۴۰۹ ۶۷۲۹۵۵ S ۳۸
۲۸D	Kfs+Grt±Ne+Hbl+Bt+Pl+Opq+Zrn+Ap+Spn	PFG		
۳۹D	Kfs+Pl+Cpx+Opq+Bt±Grt+Ap+Zrn	PFG	۱۲۵۳	۴۲۹۸۳۶۷ ۶۷۸۶۸۹ S ۳۸
۴۰D	Kfs+Pl+Cpx+Bt+Grt+Opq+Spn+Ap	PFG		
۴۱B	Kfs+Pl+Ne+Cpx+Hbl+Bt+Grt+Anl+Opq+Spn+Ap	MG	۱۲۴۴	۴۲۹۸۳۱۷ ۶۷۸۷۷۰ S ۳۸
۴۸B	Kfs±Ne+Pl+Cpx+Bt+Opq+Spn+Ap+Grt+Zr	PFG	۱۴۴۴	۴۲۹۷۲۱۳ ۶۷۷۸۲۷ S ۳۸
۵۴B	Kfs+Pl+Hbl+Ne+Grt+Bt+Anl+Cpx+Opq+Spn+Ap	CG	۱۶۶۳	۴۳۰۱۲۵۲ ۶۷۳۵۹۵ S ۳۸
۵۵D	Kfs+Ne+Grt+Spn+Hbl+Bt+Pl+Opq+Ap+Zrn	CG		
۵۸B	Kfs+Pl+Hbl±Ne+Grt+Cpx±Anl+Opq+Bt+Spn+Ap	MG		
۵۹D	Kfs+Grt+Pl+Hbl±Cpx±Anl±Ne+Opq+Spn+Ap+Zrn	MG	۲۱۱۵	۴۳۰۱۱۰۲ ۶۷۰۸۲۲ S ۳۸
۶۱D	Kfs+Ne+Grt+Ntr+Hbl+Pl+Opq	MG		
۶۲B	Kfs+Ne+Pl+Grt+Hbl+Opq+Spn+Ap+Zrn	CG	۲۱۰۰	۴۳۰۱۳۲۷ ۶۷۰۹۵۷ S ۳۸
۶۳B	Kfs+Pl+Ne+Hbl+Grt+Bt±Anl+Cpx+Opq+Spn+Ap+Zrn	MG		
۶۴D	Kfs+Pl+Hbl+Grt+Ne+Cpx+Anl+Sdl+Spn+Opq+Bt+Ap	FG	۲۰۸۸	۴۳۰۱۴۴۰ ۶۷۰۸۶۸ S ۳۸



شکل ۲ گارنت (ملانیت) (a) به صورت شکل‌دار؛ و (b) به صورت لکه‌ای در نمونه‌های ماکروسکوپی از توده آذرین کلیبر.



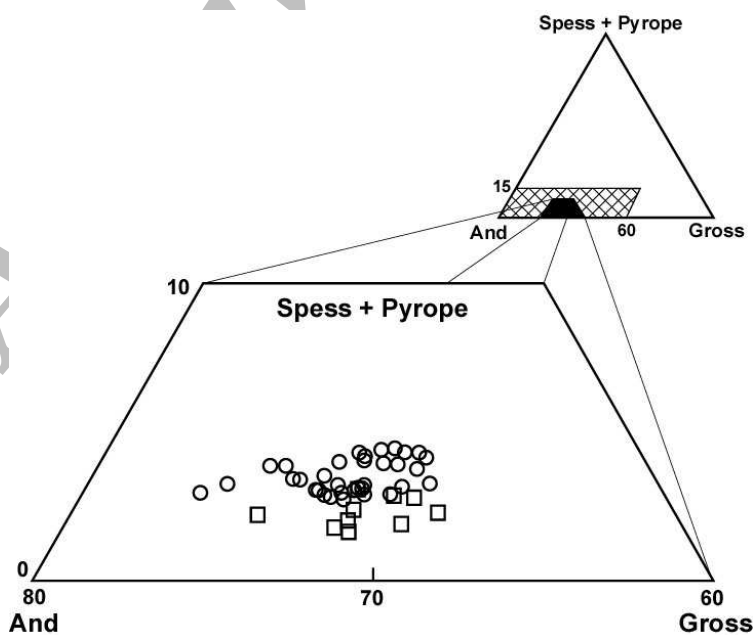
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از کانی گارنت (ملانیت) در نمونه‌های توده آذرین کلیبر؛ (a) گارنت شکل‌دار درشت با منطقه‌بندی شیمیایی؛ (b) گارنت بی‌شکل (دندریتی)؛ (c) گارنت با حاشیه ناهمسانگرد همراه با فلدسپار قلیایی دگرسان شده و هورنبلند.

شیمی کانی

چنانکه در نمودار (شکل ۴) مشاهده می‌شود گارنت‌های مورد بررسی بر پایه درصد مولی اعضای نهایی در گستره گارنت‌های غنی از تیتانیوم قرار می‌گیرند. تشخیص گارنت‌های غنی از Ti سری گراسولار-آندرادایت (ملانیت، اواروویت، شورلومیت و آندرادایت غنی از Ti) از یکدیگر بخاطر عدم وجود توافق در موقعیت و والانس Fe و Ti در نماهای بلوری آنها مشکل و بحث انگیز بوده است [۷]. طبق [۷] گارنت با درصد وزنی TiO_2 بین ۱۵-۳، ملانیت، کمتر از ۳، Ti-آندرادایت، و بیش از ۱۵، شورلومیت در نظر گرفته شده است. بر این اساس، ترکیب گارنت‌های مورد بررسی از Ti-آندرادایت تا ملانیت در تغییر است (جدول‌های ۲، ۳، ۴)؛ بدین صورت که بخش‌های مرکزی و به بیان بهتر زون‌های با رنگ تیره در گارنت‌های کلیبر با TiO_2 معمولاً بین ۳-۵ را بر این اساس می‌توان ملانیت نامید. با این وجود، [۸] گارنت‌های تا ۱ واحد فرمولی Ti در ۲۴ اکسیژن را ملانیت نامیده‌اند. بر اساس نتایج تجزیه‌های انجام شده، اعضای نهایی گارنت‌های کلیبر به ترتیب فراوانی درصد مولی آنها شامل آندرادایت (۶۳/۴۰-۷۲/۰۴)، گروسولار (۲۲/۹۵-۳۰/۰۳)، آلماندین (۱/۷۶-۵/۱۳)، اسپسارتین (۲/۹۲-

۱/۴۸)، پیروپ (کمتر از ۱/۳۲) و اواروویت (کمتر از ۰/۱۸) است.

منطقه‌بندی گارنت‌های کلیبر غالباً به دو صورت مشاهده می‌شوند: (۱) با منطقه بندی ساده، دارای بخش مرکزی تیره و بخش حاشیه‌ای روشن؛ (۲) با منطقه بندی پیچیده (نوسانی)، که از مرکز به حاشیه زون‌های اصلی به صورت بخش‌های تیره (۱)، روشن (۱)، تیره (۲)، و روشن (۲) قابل مشاهده‌اند. در گارنت‌های با منطقه بندی ساده، بخش مرکزی (هسته) غنی از Mn و Ti و به سمت حاشیه این عناصر نسبتاً تهی می‌شوند (شکل ۵). همچنین در این نوع گارنت‌ها از مرکز به حاشیه درصد مولی اعضای نهایی چون آلماندین، گروسولار و اسپسارتین کاهش و آندرادایت نسبتاً افزایش نشان می‌دهد. گرچه تغییرات در میزان پیروپ قابل ملاحظه نیست با این وجود یک روند کاهشی نیز برای آن قابل تصور است. در گارنت‌های با منطقه‌بندی نوسانی در برخی عناصر مانند Ti و TSi (سیلیسیم چهار وجهی) از هسته به حاشیه روندهای کاهشی به صورت کلی مشاهده می‌شود (شکل ۶). با این وجود، در عناصر دیگر مانند Ca، Mg و Fe تغییرات نوسانی قابل ملاحظه است.



شکل ۴ ترکیب گارنت‌های مورد بررسی در نمودار (Spess + Pyrope) - And - Gross؛ گستره گارنت‌های غنی از Ti با هاشور مشخص شده است [۱۷].

جدول ۳ نتایج تجزیه ریز گمانه‌های از حاشیه و مرکز گارنت دارای منطقه‌بندی کلیبر.

	Core			Rim		
Sample	۱-jp-۶۳۲	۲-jp-۶۳۲	۳-jp-۶۳۲	۴-jp-۶۳۲	۵-jp-۶۳۲	۶-jp-۶۳۲
SiO ₂	۳۶,۳۵	۳۶,۲۱	۳۵,۲۵	۳۵,۵۱	۳۵,۷۱	۳۵,۴۹
TiO ₂	۱,۷۹	۱,۸۸	۳,۵۶	۳,۶۸	۳,۶۳	۳,۵۵
Al ₂ O ₃	۴,۹۱	۵,۰۹	۵,۵۰	۵,۵۶	۵,۷۳	۵,۷۴
FeO	۲۱,۳۶	۲۱,۰۵	۱۹,۹۴	۱۹,۴۲	۱۹,۳۱	۱۹,۴۰
MnO	۱,۰۰	۱,۰۶	۱,۲۳	۱,۳۱	۱,۲۹	۱,۲۲
MgO	۰,۱۷	۰,۱۹	۰,۲۸	۰,۳۴	۰,۲۹	۰,۳۰
CaO	۳۳,۴۴	۳۳,۳۴	۳۳,۰۵	۳۲,۸۹	۳۲,۸۸	۳۲,۸۲
Na ₂ O	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۱۳	۰,۱۰	۰,۰۸
Total	۹۹,۱۲	۹۸,۹۲	۹۸,۹۱	۹۸,۸۴	۹۹,۴۹	۹۸,۵۷

کاتیون در واحد فرمولی بر اساس ۱۲ اکسیژن

Si	۲,۹۶	۲,۹۵	۲,۸۸	۲,۹۰	۲,۹۰	۲,۹۰
Ti	۰,۱۱	۰,۱۲	۰,۲۲	۰,۲۳	۰,۲۲	۰,۲۲
^{IV} Al	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۱۲	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۰۹
^{VI} Al	۰,۴۳	۰,۴۴	۰,۴۱	۰,۴۴	۰,۴۳	۰,۴۶
Fe ²⁺	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۹	۰,۱۲	۰,۱۴	۰,۱۳
Fe ³⁺	۱,۳۹	۱,۳۸	۱,۲۷	۱,۲۱	۱,۲۲	۱,۲۰
Mn	۰,۰۷	۰,۰۷	۰,۰۹	۰,۰۹	۰,۰۹	۰,۰۸
Mg	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴
Ca	۲,۹۲	۲,۹۱	۲,۸۹	۲,۸۸	۲,۸۸	۲,۸۸
Total	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰

درصد مولی اعضای نهایی

Alm	۲,۰۸	۱,۹۷	۲,۸۴	۳,۷۷	۴,۴۴	۳,۸۷
And	۷۲,۰۴	۷۱,۲۰	۶۷,۰۳	۶۴,۶۱	۶۵,۱۳	۶۳,۴۴
Gross	۲۲,۹۶	۲۳,۷۰	۲۶,۲۹	۲۷,۴۰	۲۸,۰۹	۲۸,۱۳
Pyrope	۰,۶۷	۰,۷۵	۱,۱۰	۱,۳۲	۱,۱۷	۱,۲۸
Spess	۲,۲۵	۲,۳۹	۲,۷۵	۲,۹۰	۲,۸۴	۲,۶۸

جدول ۴ نتایج تجزیه ریز گمانه معرف از هسته (مرکز) گارنت کلیبر.

Sample	۱-ir-۶۳	۲-ir-۶۳	۳-ir-۶۳	۴-ir-۶۳	۵-ir-۶۳
SiO ₂	۳۴,۲۱	۳۴,۷۹	۳۴,۸۴	۳۴,۸۴	۳۴,۸۰
TiO ₂	۴,۳۸	۳,۵۸	۳,۳۵	۲,۶۲	۳,۷۲
Al ₂ O ₃	۵,۱۴	۵,۳۴	۵,۸۰	۵,۰۹	۵,۳۵
Cr ₂ O ₃	n.d.	۰,۰۲	۰,۰۲	n.d.	n.d.
Fe ₂ O ₃	۲۲,۰۲	۲۱,۳۷	۲۱,۳۰	۲۲,۸۸	۲۲,۰۸
MnO	۰,۹۷	۱,۲۰	۱,۲۱	۰,۹۱	۱,۲۸
MgO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CaO	۳۲,۷۳	۳۲,۹۰	۳۲,۲۲	۳۲,۸۴	۳۲,۳۶
Total	۹۹,۴۵	۹۹,۲۰	۹۹,۷۳	۹۹,۱۸	۹۹,۵۹

کاتیون در واحد فرمولی بر اساس ۱۲ اکسیژن

Si	۲,۸۵	۲,۹۰	۲,۸۸	۲,۹۰	۲,۸۹
Ti	۰,۲۷	۰,۲۲	۰,۲۱	۰,۱۶	۰,۲۳
^{IV} Al	۰,۱۵	۰,۱۱	۰,۱۱	۰,۱۰	۰,۱۱
^{VI} Al	۰,۳۶	۰,۴۲	۰,۴۴	۰,۴۰	۰,۴۲
Fe ²⁺	۰,۱۴	۰,۱۰	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۱۵
Fe ³⁺	۱,۲۴	۱,۲۴	۱,۲۶	۱,۳۶	۱,۲۳
Mn	۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۰۸	۰,۰۶	۰,۰۹
Mg	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Ca	۲,۹۲	۲,۹۳	۲,۹۴	۲,۹۳	۲,۸۸
Total	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰

درصد مولی اعضای نهایی

Alm	۴,۳۶	۳,۳۲	۲,۰۳	۲,۳۹	۴,۹۴
And	۶۶,۴۱	۶۵,۷۲	۶۵,۹۴	۷۰,۵۷	۶۵,۴۵
Gross	۲۷,۰۴	۲۸,۲۰	۲۹,۲۱	۲۴,۹۶	۲۶,۷۲
Pyrope	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Spess	۲,۱۹	۲,۷۰	۲,۷۴	۲,۰۹	۲,۸۹

جدول ۲ نتایج تجزیه ریز گمانه‌های از حاشیه گارنت کلیبر.

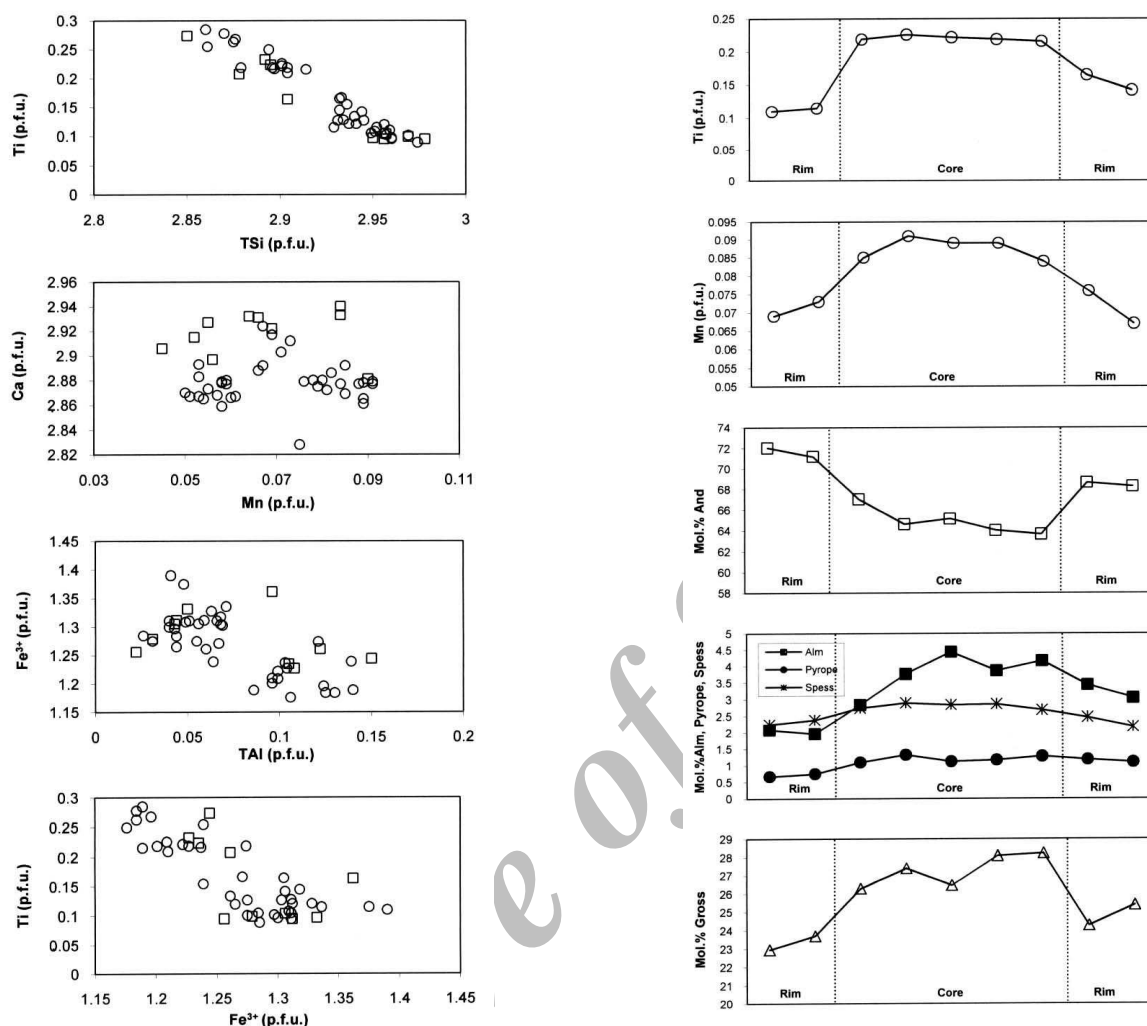
Sample	۱-ir-۵۸	۲-ir-۵۸	۳-ir-۵۸	۴-ir-۵۸	۵-ir-۵۸	۱-jp-۵۸	۲-jp-۵۸	۳-jp-۵۸	۴-jp-۵۸	۵-jp-۵۸
SiO ₂	۳۵,۷۷	۳۵,۹۰	۳۵,۶۳	۳۶,۰۲	۳۶,۰۵	۳۶,۲۴	۳۶,۳۰	۳۶,۳۴	۳۶,۵۷	۳۵,۸۱
TiO ₂	۱,۶۷	۱,۵۷	۱,۵۳	۱,۵۳	۱,۶۰	۲,۵۴	۲,۱۱	۲,۰۹	۱,۹۷	۲,۰۷
Al ₂ O ₃	۵,۸۶	۵,۸۹	۵,۹۴	۶,۱۱	۶,۰۰	۶,۰۶	۵,۹۱	۶,۰۶	۶,۱۰	۶,۰۰
Cr ₂ O ₃	n.d.	۰,۰۶	۰,۰۴	n.d.	۰,۰۲	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
FeO	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	۲,۰۱۰	۲,۰۹۰	۲,۰۴۸	۲,۰۲۰	۲,۰۵۰
Fe ₂ O ₃	۲۲,۷۸	۲۲,۸۶	۲۲,۶۰	۲۱,۴۴	۲۲,۰۵	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
MnO	۰,۶۵	۰,۷۴	۰,۸۰	۰,۹۵	۰,۷۹	۰,۸۴	۰,۸۱	۰,۸۳	۰,۷۸	۰,۸۶
MgO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	۰,۲۸	۰,۲۸	۰,۳۰	۰,۲۶	۰,۲۸
CaO	۳۲,۸۱	۳۳,۱۲	۳۲,۶۰	۳۳,۰۹	۳۳,۱۸	۳۳,۱۶	۳۳,۱۸	۳۳,۰۳	۳۳,۴۰	۳۲,۶۸
Na ₂ O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۵
Total	۹۹,۵۴	۱۰۰,۱۴	۹۹,۱۵	۹۹,۱۳	۹۹,۶۹	۹۹,۲۹	۹۹,۵۷	۹۹,۱۸	۹۹,۳۴	۹۸,۲۵

کاتیون در واحد فرمولی بر اساس ۱۲ اکسیژن

Si	۲,۹۶	۲,۹۵	۲,۹۶	۲,۹۸	۲,۹۷	۲,۹۴	۲,۹۳	۲,۹۵	۲,۹۶	۲,۹۳
Ti	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۱۶	۰,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۲	۰,۱۳
^{IV} Al	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۷
^{VI} Al	۰,۵۳	۰,۵۲	۰,۵۴	۰,۵۷	۰,۵۵	۰,۵۱	۰,۵۰	۰,۵۲	۰,۵۴	۰,۵۱
Fe ²⁺	۰,۱۱	۰,۰۸	۰,۱۰	۰,۰۸	۰,۰۹	۰,۱۲	۰,۱۰	۰,۱۱	۰,۱۰	۰,۱۰
Fe ³⁺	۱,۳۱	۱,۳۳	۱,۳۱	۱,۲۶	۱,۲۸	۱,۲۴	۱,۲۱	۱,۲۸	۱,۲۷	۱,۳۰
Mn	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۵	۰,۰۶
Mg	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۳
Ca	۲,۹۱	۲,۹۲	۲,۹۰	۲,۹۳	۲,۹۳	۲,۸۸	۲,۸۷	۲,۸۷	۲,۸۹	۲,۸۷
Total	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰

درصد مولی اعضای نهایی

Alm	۳,۶۴	۲,۶۷	۳,۲۵	۲,۸۳	۳,۹۷	۳,۳۱	۳,۶۸	۳,۲۶	۳,۱۹
And	۶۷,۳۹	۶۸,۲۳	۶۷,۳۹	۶۵,۲۸	۶۶,۲۷	۶۴,۹۵	۶۷,۷۳	۶۶,۲۱	۶۵,۸۳
Gross	۲۷,۴۸	۲۷,۲۲	۲۷,۲۶	۳۰,۰۳	۲۹,۰۲	۲۸,۱۳	۲۶,۰۵	۲۷,۰۹	۲۸,۱۶
Pyrope	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۱,۰۹	۱,۱۰	۱,۱۸	۱,۰۲
Spess	۱,۴۸	۱,۶۹	۱,۸۵	۲,۱۶	۱,۸۰	۱,۸۶	۱,۸۱	۱,۸۵	۱,۷۴



شکل ۶ نمودارهای دوتایی برای بررسی برخی جانشینی‌های عنصری مهم در گارنت‌های کلیبر.

اختصاص Ti, Al و Fe به نماهای مربوطه وجود ندارد. بر اساس طیف Mossbauer [۱۱] جانشینی در نمای ترجیحی چهار وجهی در گارنت‌های نوع ملانیت را به صورت $Al \geq Fe^{3+}$ Ti > در نظر گرفتند و پیشنهاد کردند که Fe^{2+} نیز در این نما حضور دارد. [۱۲] تبادل $Si^{4+}-Ti^{4+}$ را روش متداول برای جانشینی Ti در ساختار گارنت در نظر گرفته‌اند. چنانکه در نمودارهای (شکل ۷) مشاهده می‌شود همبستگی منفی شدید بین زوج عنصر Si-Ti با ضریب همبستگی ۰/۹۶- وجود دارد. این همبستگی منفی می‌تواند بیانگر تبادل کاتیونی مورد اشاره [۱۲] باشد. ولی همبستگی‌های فرعی (مثل Al-Fe و Ti-Fe) ممکن است بیانگر زوج‌های جانشینی باشند و یا نباشند [۷]. همبستگی قابل توجهی بین Ca-Mn وجود ندارد بنابراین به

شکل ۵ الگوهای منطقه‌بندی شیمیایی برخی عناصر و اعضای نهایی گارنت‌ها در گارنت‌های با منطقه‌بندی ساده (نمونه B۶۳) که از حاشیه به حاشیه ترسیم شده‌اند.

بنا بر بررسی‌های پژوهشگران، تفاوت‌های رنگی در زون‌های ملانیت گارنت‌ها به تمرکز Ti نسبت داده شده است. زون‌های تیره رنگ دارای غلظت بالای Ti و زون‌های روشن رنگ با تمرکز پایین Ti مشخص می‌شوند [۷، ۹، ۱۰]. برای گارنت‌های منطقه‌بندی شده کلیبر نیز این ویژگی صادق است. در ارتباط با ماهیت و خاستگاه منطقه‌بندی شیمیایی در گارنت‌های ملانیت-شورلومیت که توسط پژوهشگران [۸، ۹، ۱۱ - ۱۴] زیادی مورد بررسی قرار گرفته است هیچ اجماع نظری بدست نیامده است. عدم وجود توافق در این بررسی‌ها شاید بخاطر تنوع پارائزهای ملانیت-شورلومیت باشد [۱].

عنصر سنجی و تعیین محل کاتیون‌ها در گارنت‌های نوع ملانیت به خاطر عدم قطعیت در والانس و موقعیت Fe و Ti در ساختار گارنت مشکل بوده و تقریباً روش استاندارد برای

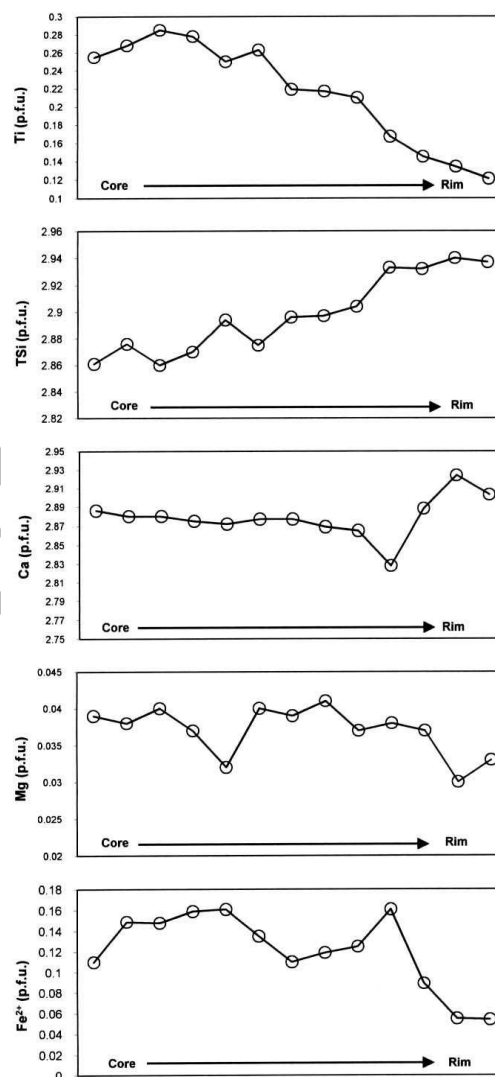
برخی شباهت‌ها بین آنهاست (شکل ۸). گرچه از لحاظ میزان Mg، گارنت‌های کلیبر غنی‌شدگی نسبی نشان می‌دهند.

بر اساس شواهد میکروسکوپی، به نظر می‌رسد که شکل‌های درختواری و رگچه‌ای نتیجه رشد بین دانه‌های گارنت‌ها در سنگ‌های کلیبر باشد. بلورهای درشت گارنت، که گاه به صورت لکه‌ای مشاهده می‌شوند (شکل ۲b)، در واقع گارنت‌های بافت غربالی هستند که سطوح بلوری مشخصی تشکیل نداده‌اند. در این حالت گاهی فلدسپارهای قلیایی با گارنت‌ها حالت هم‌رشدی نشان می‌دهند. با این وجود، به نظر می‌رسد بلورهای درشت گارنت در جایکه بلورهای شکلدار آنالسیم از تمرکز بالایی برخوردار بوده‌اند به صورت مناسبی رشد کرده و دارای سطوح بلوری مشخصی هستند (شکل ۲a).

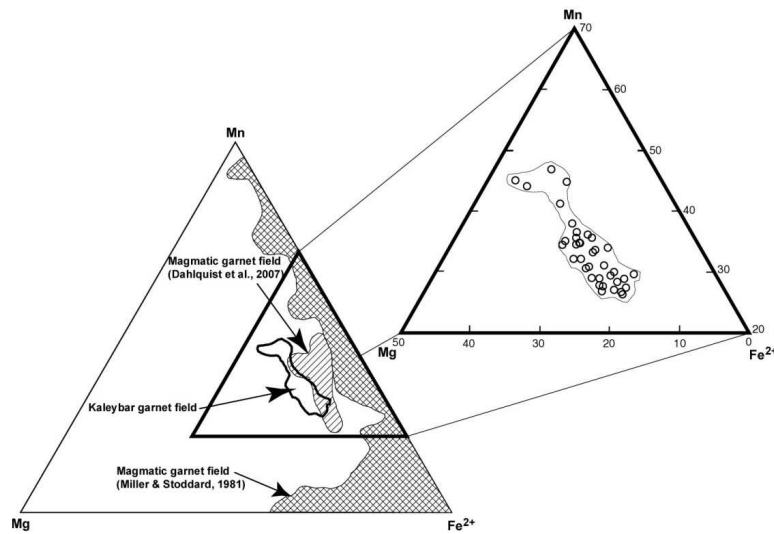
نظر می‌رسد که جانشینی آنها در گارنت‌های مورد بررسی مهم نبوده است.

بحث و بررسی

به عقیده [۱] گارنت‌های غنی از Ti در سنگ‌های آذرین قلیایی اشباع بدون شک اولیه هستند. گارنت‌های کلیبر فاقد حاشیه واکنشی بوده و در سنگ‌هایی که یافت می‌شوند هیچ نوع برونبوم یا کانی دیرگداز باقیمانده‌ای در آنها مشاهده نمی‌شود؛ این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که حداقل فنوکریست‌های شکلدار گارنت با منطقه‌بندی بسیار مشخص بوسیله فازهای آبگون اولیه تشکیل شده‌اند. مقایسه ترکیب گارنت‌های مورد بررسی در منطقه کلیبر از لحاظ مقادیر Mn، Fe²⁺ و Mg با گارنت‌های ماگمایی از توده‌های گرانیتوئیدی [۲، ۱۵] حاکی از وجود



شکل ۷ الگوهای منطقه‌بندی شیمیایی برخی عناصر مهم در گارنت‌های با منطقه‌بندی نوسانی (نمونه B63) که از هسته به حاشیه ترسیم شده‌اند.



شکل ۸ ترکیب گارنت‌های کلیبر در نمودار مثلثی $Mn-Mg-Fe^{2+}$ [۲].

نظر گارنت سنگ‌های فوئیددار کلیبر با سنگ‌های آتشفشانی آنالسیم‌دار کروزنست (Crowsnest) در آلبرتای کانادا [۷] قابل مقایسه هستند.

برداشت

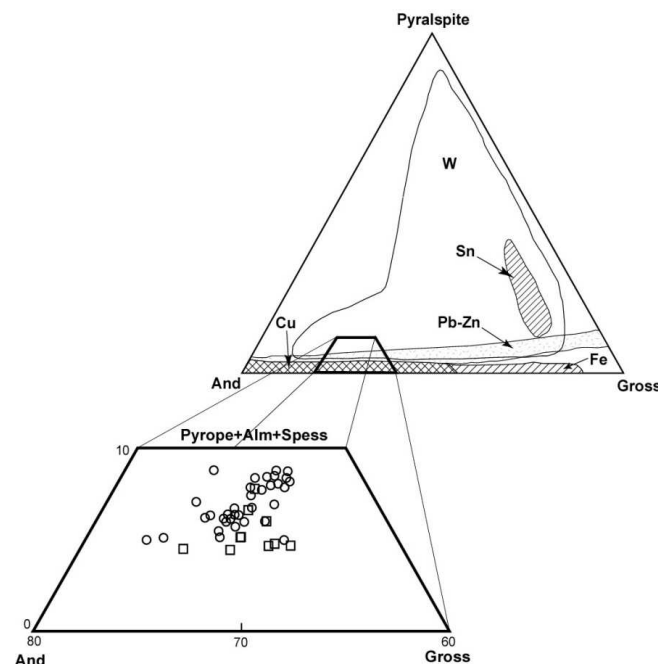
بر اساس شیمی کانی، گارنت‌های توده آذرین کلیبر در حد Ti -آندرادیت و ملانیت بوده و اعضای نهایی آن‌ها به ترتیب فراوانی درصد مولی آن‌ها شامل آندرادیت، گروسولار، آلماندین، اسپسارتین، پیروپ و اواروویت است. در گارنت‌های مورد بررسی از بین جاننشینی‌های عنصری $Al-Fe$ ، $Ti-Fe$ و $Ti-Si$ ، جاننشینی اخیر مهم‌ترین بوده که در آن به نظر می‌رسد Ti اساساً در نمای چهار وجهی، بجای Si ، وارد شده است. گارنت‌های منطقه‌بندی شده کلیبر معمولاً با زون حاشیه‌ای تهی شده از Ti و غنی شده از آندرادیت مشخص می‌شوند. با توجه به ویژگی‌های کانی‌شناسی، بافتی و شیمیایی به نظر می‌رسد گارنت‌های کلیبر از تبلور ماکما حاصل شده و در آخرین مراحل تبلور تشکیل شده‌اند.

قدردانی

این مقاله برداشتی است از نتایج طرح پژوهشی رساله دکتری نویسنده اول که از سوی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز حمایت مالی شده است؛ لذا نویسندگان بدینوسیله نهایت سپاس و قدردانی خود را از معاونت‌های مذکور ابراز می‌دارند. همچنین نویسندگان از داوران محترم مجله، بخاطر نظرها و پیشنهادهای سازنده‌شان، سپاس گزارند.

تبلور گارنت غنی از Ti به نظر می‌رسد که در ماگماهای نسبتاً بی‌آب و غنی از Ti نسبت به کانی‌هایی چون آمفیبول یا بیوتیت مساعد باشد [۳]؛ این ویژگی‌ها معمولاً در ماگماهای اشباع شده از سیلیس و قلیایی بهتر قابل حصول‌اند؛ اینکه چرا بین سه توده فوئید سینیتی بزقوش، رزگه و کلیبر تنها مورد اخیر دارای گارنت‌های غنی از Ti است شاید با پارائزهای کانیایی قابل توضیح باشد. بین کانی‌های مافیک، کانی‌های تیتانیت و هورنبلند از فراوانی نسبی قابل ملاحظه‌ای در توده فوئید سینیتی کلیبر برخلاف توده‌های فوئید سینیتی رزگه و بزقوش برخوردارند؛ این در حالی است که کانی‌های مافیکی چون کلینوپیروکسن، بیوتیت و الیوین در توده‌های اخیر از فراوانی نسبی قابل توجهی برخوردارند. احتمالاً غنی از Ti بودن ماگمای سازنده فوئید سینیت کلیبر، که با تبلور مقادیر بالای تیتانیت در آن مشخص می‌شود، نقش مهمی را در تشکیل گارنت‌های غنی از Ti توده کلیبر داشته است. مقدار تیتانیت در این توده‌گاه تا ۳ درصد حجمی سنگ نیز می‌رسد (B_{27} ، D_{59} ، B_{62}). با این وجود، فراهم شدن شرایط تبلور چنین گارنت‌هایی به در دسترس بودن سازنده‌هایی چون Ca بستگی دارد.

فعالیت خیلی بالای SiO_2 در طول تشکیل گرمایی گارنت‌های مجموعه‌های اسکارنی [۱۶] منجر به مقادیر خیلی پایین TiO_2 این گارنت‌هاست. مقایسه ترکیب گارنت‌های یاد شده با گارنت‌های سنگ‌هایی که به نظر می‌رسد فعالیت SiO_2 در طول تشکیل آن‌ها بالا نبوده است نشان از شباهت گارنت‌های اخیر به گارنت اسکارن‌های آهن، سرب-روی و مس‌دار و عدم شباهت آن‌ها به انواع اسکارن‌های قلع‌دار است (شکل ۹). از این



شکل ۹ ترکیب گارنت‌های مورد بررسی در نمودار And - Gross - (Pyrope + Alm + Spess) برای مقایسه با گارنت‌های اسکارنی [۱۵].

مراجع

stoichiometric criteria”, Mineralogical Magazine 51 (1987) 431-437.

[7] Dingwell D.B., Brearley M., “Mineral chemistry of igneous melanite garnets from analcite-bearing volcanic rocks, Alberta, Canada”, Contribution to Mineralogy and Petrology 90 (1985) 29-35.

[8] Howie R.A., Woolley A.R., “The role of titanium and the effect of TiO_2 on the cell-size, refractive index and specific gravity in the andradite-melanite-schorlomite series”, Mineralogical Magazine 36 (1968) 775-790.

[9] Gomes C.B., “Electron microprobe analysis of zoned melanites”, American Mineralogist 54 (1969) 1654-1661.

[10] Pearce T.H., “The analcite-bearing volcanic rocks of the Crowsnest Formation, Alberta”, Canadian Journal of Earth Science 7 (1970) 46-66.

[11] Huggins F.E., Virgo D., Huckenholz H.G., “Titanium-containing silicate garnets. I. The distribution of Al, Fe^{3+} , and Ti^{4+} between octahedral and tetrahedral sites”, American Mineralogist 62 (1977a) 475-490.

[12] Huggins F.E., Virgo D., Huckenholz H.G., “Titanium-containing silicate garnets. II. The

[1] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., “An Introduction to the Rock Forming Minerals”, Second Longman Editions. Longman, London (1992) p. 696.

[2] Dahlquist J.A., Galindo C., Pankhurst R.J., Rapela C.W., Alasino P.H., Saavedra J., Fanning C.M., “Magmatic evolution of the Peñón Rosado granite: Petrogenesis of garnet-bearing granitoids”, Lithos 95 (2007) 177-207.

[3] Gwalani L.G., Rock N.M.S., Ramasamy R., Griffin B.J., Mulai B.P., “Complexly zoned Ti-rich melanite-schorlomite garnets from Ambadungar carbonatite-alkalic complex, Deccan Igneous Province, Gujarat State, Western India”, Journal of Asian Earth Sciences 18 (2000) 163-176.

[4] Laverne C., “Unusual occurrence of aegirine-augite, fassaite and melanite in oceanic basalts (DSDP Hole 504B)”, Lithos 20 (1987) 135-151.

[۵] باباخانی ع، امینی آذر ر، “گزارش عملیات اکتشافی بر روی توده نفلین سینیتی کلیبر به عنوان ماده اولیه تولید آلومینا، شیشه، سرامیک و سنگ‌های تزئینی و نما، سازمان زمین-شناسی کشور، شرکت توسعه علوم زمین (۱۳۶۷)، ۷۵ صفحه.

[6] Droop G.T.R., “A general equation for estimating Fe^{3+} in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using

an example from the Old Woman Piute Range, California", *Journal of Geology* 89 (1981) 233–246.

[16] Einaudi M.T., Burt D.M., "Introduction terminology, classification and composition of skarn deposits", *Economic Geology* 77 (1982) 745-754.

[17] Kretz R., "Symbols for rock-forming minerals", *American Mineralogist* 68 (1983) 277–279.

crystal chemistry of melanites and schorlomites", *American Mineralogist* 62 (1977 b) 646-665.

[13] Isaacs T., "Titanium substituted in andradites", *Chemical Geology* 3 (1968) 219-222.

[14] Schwartz K.B., Nolet D.A., Burns R.G., "Mossbauer spectroscopy and crystal chemistry of natural Ti- Fe garnets", *American Mineralogist* 65 (1980) 142-153.

[15] Miller C.F., Stoddard E.F., "The role of manganese in the paragenesis of magmatic garnet:

Archive of SID