

بررسی تغییر ترکیب الیوین‌های باقیمانده از سنگ‌های الترابازیک در طول فرآیند سرپانتینیزاسیون؛ مثالی از پریدوتیت‌های شمال غرب پیرانشهر - شمال غرب ایران

مریم یزدانی^۱، معصومه آهنگری^{۲*}، احمد جهانگیری^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

(دریافت مقاله: ۹۲/۳/۱، نسخه نهایی: ۹۲/۵/۹)

چکیده: الیوین یکی از کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ‌های الترابازیک مجموعه افیولیتی پیرانشهر است. این کانی به صورت بی-شکل در این سنگ‌ها ظاهر شده و دارای شکستگی‌های فراوان بوده و از حاشیه و محل شکستگی‌ها به سرپانتین تبدیل شده است. همچنین در برخی موارد کانی‌های سرپانتین روی الیوین نیز تشکیل شده‌اند. تصاویر BSE تهیه شده از کانی الیوین و نیز بررسی‌های شیمی کانی انجام گرفته روی این کانی، بیانگر تشکیل الیوین‌های غنی از آهن در حاشیه الیوین‌های اولیه است. مقدار عضو انتهایی فورستريت در الیوین‌های ثانویه در مقایسه با الیوین‌های اولیه پایین بوده و از ۸۵/۶ تا ۸۷/۷ در تغییر است. الیوین‌های غنی از آهن در ارتباط با فرآیند سرپانتینی شدن الیوین‌های اولیه تشکیل شده‌اند. تشکیل سرپانتین‌های غنی از منیزیم و عدم حضور منیتیت در فراورده‌های حاصل از سرپانتینی شدن الیوین، منجر به افزایش غلظت عنصر Fe در ترکیب شاره‌ی حاصل از فرآیند سرپانتینیزاسیون شده است. شاره‌ی یاد شده، باعث تبدیل الیوین‌های غنی از منیزیم به الیوین‌های غنی از آهن از حاشیه شده است.

واژه‌های کلیدی: الیوین غنی از آهن؛ سرپانتینی شدن؛ سنگ‌های الترابازیک؛ پیرانشهر.

مقدمه

گِراد، یک پیامد غیر قابل اجتناب طی فرآیند جریان گوشته‌ی آستوسفری است. حضور آب (به عنوان خاستگاه هیدروژن) در این شرایط می‌تواند باعث افزایش چشمگیری در دگرشکلی پلاستیک کانی الیوین شده [۷، ۶] و به دنبال آن منجر به افزایش انتشار داخلی Fe-Mg در ساختار کانی الیوین شود [۸]. در این حالت مناطق غنی از عنصر آهن به صورت نوارهای باریکی در کانی الیوین تشکیل می‌شوند. مثالی از رده‌بندی نوار الیوین‌های غنی از آهن توسط [۲] گزارش شده است.

شیمی و سازوکار تشکیل الیوین‌های حاصل دگرگونی گرمایی توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده است [۹-۱۲].

الیوین‌های غنی از Mg از کانی‌های شاخص سنگ‌های الترامافیک و مافیک هستند. این کانی عضو اصلی تشکیل دهنده‌ی دونیت‌ها بوده و به عنوان یکی از اعضای مهم تشکیل دهنده‌ی سنگ‌های پریدوتیتی به حساب می‌آید. ترکیب این کانی در سنگ‌های الترامافیک می‌تواند تا حدی تحت تأثیر فرآیندهای ثانویه همچون دگرگونی گرمایی [۱]، دگرشکلی [۲] و سرپانتینی شدن [۴، ۳] قرار گرفته و تغییر یابد. برخی از پژوهشگران همچون [۵] بر این باورند که دگرشکلی بلوری-پلاستیکی کانی الیوین در دماهای بالا (> ۱۰۰۰ درجه سانتی-

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۳۴۸۴۱۱۵، نمابر: ۰۳۳۵۶۰۲۷-۰۴۱۱، پست الکترونیکی: ahangari@tabrizu.ac.ir

این تغییرات، تصاویر (Back Scattered Electron) BSE Images و تجزیه‌های نقطه‌ای متعددی از کانی‌های الیون-های اولیه، الیون‌های ثانویه و نیز سرپانتین‌های تشکیل شده در ارتباط با کانی الیون در دانشگاه پتسدام آلمان تهیه شد و سپس با استفاده از داده‌های یاد شده چگونگی تشکیل الیون-های ثانویه و ارتباط آن با پدیده‌ی سرپانتینی شدن کانی الیون مورد بررسی قرار گرفته است.

زمین‌شناسی عمومی منطقه

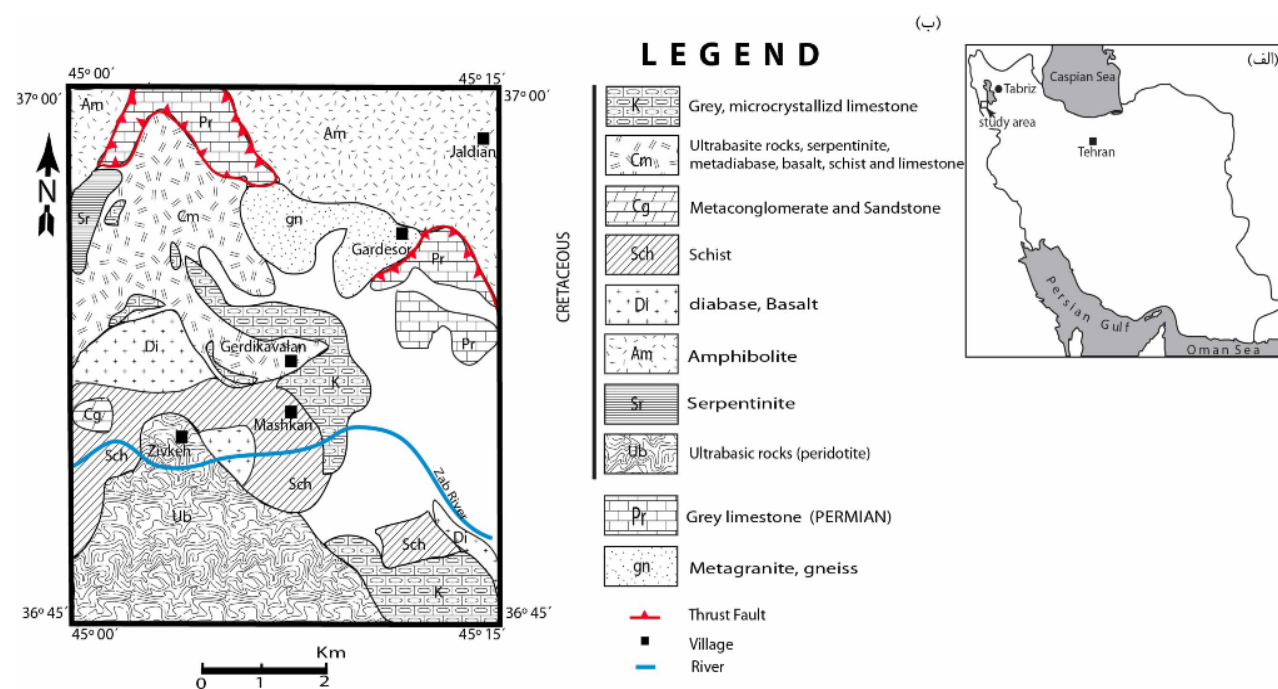
منطقه‌ی مورد بررسی در شمال غرب شهرستان پیرانشهر در استان آذربایجان غربی و بین مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 45'$ تا $37^{\circ} 00'$ عرض شمالی و $45^{\circ} 00'$ تا $45^{\circ} 15'$ طول شرقی واقع شده است (شکل ۱ الف و ب). ترکیب سنگ‌شناسی منطقه بسیار متنوع بوده و شامل انواع سنگ‌های آذرین، دگرگون و رسوبی است. مجموعه افیولیتی شمال غرب پیرانشهر گسترده‌ای نسبتاً گسترده را در منطقه‌ی مورد بررسی به خود اختصاص داده است. این واحد به شدت در هم آمیخته بوده به طوری که امکان جدا کردن واحدهای مختلف در آن وجود ندارد. از نظر سنگ‌شناسی این مجموعه شامل توده‌های آذرین الترابازی و بازی، سنگ‌های دگرگون و رسوب‌های مناطق عمیق است.

به عقیده‌ی [۱۳،۱] و بر اساس تجزیه‌های شیمیایی و بررسی‌های بافتی انجام گرفته توسط ایشان، تشکیل الیون‌های دگرگونی در نتیجه‌ی واکنش کانی‌های منیتیت، آواروایت (Ni_3Fe) و سرپانتین است (بر اساس واکنش: سرپانتین + آواروایت + منیتیت = الیون + H_2O). الیون‌های دگرگون معمولاً از عضو انتهایی فایالیت غنی بوده و یا روی الیون‌های اولیه رشد کرده و یا الیون‌های اولیه را احاطه کرده‌اند.

تشکیل الیون‌های ثانویه در ارتباط با پدیده‌ی سرپانتینی شدن، توسط پژوهشگران مختلف، چندان مورد بررسی قرار نگرفته است و تنها موارد معدودی از این مورد گزارش شده است [۴،۳]. در این مقاله الیون‌های ثانویه‌ای را که در حاشیه‌ی الیون‌های اولیه و باقیمانده از سنگ اولیه تشکیل شده‌اند گزارش شده و سعی در شناخت چگونگی تشکیل این الیون‌ها و ارتباط آن‌ها با پدیده‌ی سرپانتینی شدن الیون‌های اولیه داریم.

روش کار

در این پژوهش به منظور بررسی چگونگی تشکیل الیون‌های ثانویه، بررسی‌های سنگ‌نگاری گسترده‌ای روی سنگ‌های الترامافیک منطقه پیرانشهر صورت گرفت. برای شناخت بهتر



شکل ۱ (الف) موقعیت منطقه‌ی مورد بررسی در نقشه‌ی ایران. (ب) نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی. اقتباس از [۱۴].

شده و خاموشی موجی از خود نشان می‌دهد. همچنین این کانی به صورت انکلوژیون در داخل دیگر کانی‌ها بویژه ارتوپروکسن نیز قابل مشاهده است (شکل ۲ الف، ب، ت و ج). این کانی بیشتر از حاشیه و محل شکستگی‌ها به سرپانتین تبدیل شده است (شکل ۲ الف و ب). فرآیند سرپانتینی شدن الیوین در پریدوتیت‌های پیرانشهر به دو صورت است. در برخی موارد کانی منیتیت به همراه سرپانتین در حاشیه و محل شکستگی‌ها تشکیل شده است. اما بسیاری از بلورهای الیوین همراه با فرآیند سرپانتینی شدن از حاشیه به الیوین‌های ثانویه با میزان آهن فراوان تبدیل شده‌اند. این تبدیل حتی در الیوین‌هایی که به صورت انکلوژیون در داخل دیگر کانی‌ها نیز قرار گرفته‌اند، نیز قابل مشاهده است (شکل ۲ ت و ج). در فرآیند اخیر، کانی منیتیت در فراورده‌های حاصل از سرپانتینی شدن مشاهده نشده است. تشکیل الیوین‌های غنی از آهن در حاشیه و محل شکستگی‌های الیوین‌های اولیه، داشتن مرز نامنظم و همراهی با سرپانتین (به عنوان کانی ثانویه) می‌تواند به عنوان شاهی مبنی بر ثانویه بودن الیوین‌های غنی از آهن باشد.

برای جدا کردن الیوین‌های اولیه و ثانویه تصاویر BSE تهیه شده است. در این تصاویر الیوین‌های غنی از آهن در مقایسه با الیوین‌های اولیه دارای رنگ بازتابی روشن‌ترند (شکل ۲ ت، ث و ج). مرز بین این دو الیوین بسیار مشخص بوده و تغییرات ترکیبی مشاهده شده ناگهانی است.

بر اساس بررسی‌های سنگ نگاری و بافتی لیزاردیت، کریزوتیل و به مقدار کمتر آنتیگوریت، کانی‌های احتمالی گروه سرپانتین را در این سنگ‌ها تشکیل می‌دهند. آنتیگوریت‌های تشکیل شده از الیوین به صورت سوزن‌های بلند با بافت بادبزنی و یا پر مانند بوده (شکل ۲ پ) و در برخی موارد بلورهای الیوین را در جهت‌های مختلف قطع کرده‌اند.

شیمی کانی

بررسی‌های شیمی کانی، بر مبنای تجزیه کانی‌های الیوین‌های اولیه، الیوین‌های ثانویه و کانی سرپانتین به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی JEOL, JXA-8200 با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵KV، شدت جریان ۲۰nA و قطر جریان ۲ میکرومتر در دانشگاه پتسدام آلمان صورت گرفته است. خلاصه‌ای از نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای این کانی‌ها در جدول‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده است. تمامی آهن موجود در ترکیب کانی‌های بررسی شده به صورت Fe^{2+} در نظر گرفته شده‌اند.

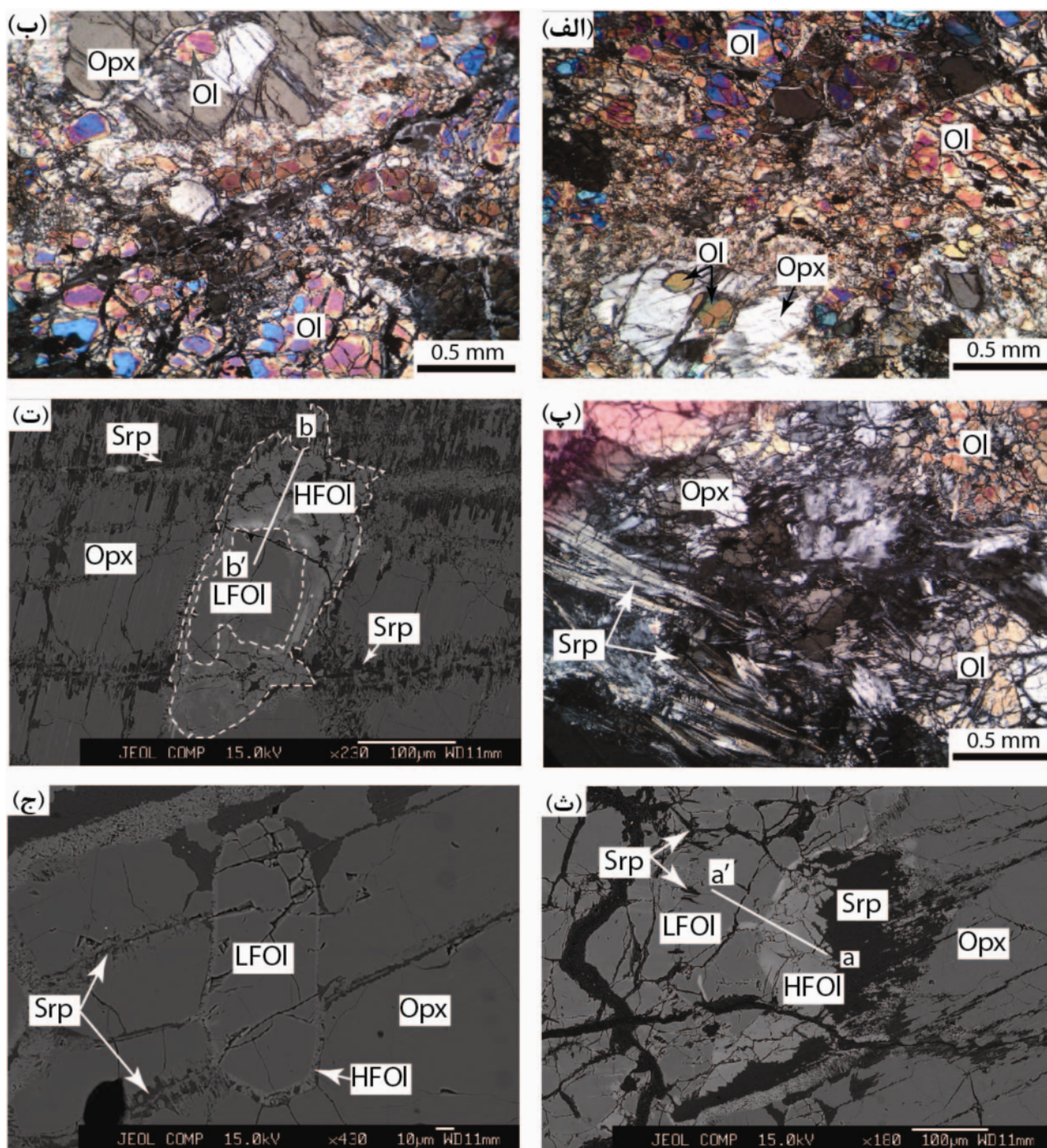
مجموعه‌ی سنگ‌های الترابازیک، فراوان‌ترین و پایین‌ترین واحد افیولیتی بوده و بر اساس بررسی‌های صحرایی سه گروه مهم پریدوتیت در منطقه پیرانشهر قابل شناسایی هستند. (۱) پریدوتیت‌های کمتر سرپانتینی شده که بیشتر شامل ورلیت-دونیت-هارزبورژیت و لرزولیت است. در این مجموعه شواهد میلونیتی قابل مشاهده نیست. (۲) پریدوتیت‌هایی که تقریباً به طور کامل تبدیل به سرپانتینیت شده‌اند. این مجموعه به شدت دگرشکل شده و شواهد میلونیتی در آن‌ها قابل مشاهده‌اند. (۳) پریدوتیت‌های کمتر سرپانتینی شده که در بخش مرکزی و شرق مجموعه افیولیت شمال غرب پیرانشهر گسترده شده است. علاوه بر موارد یاد شده، کلینوپروکسنیت با گستردگی فراوان نیز در این منطقه مشاهده شده است. بررسی شیمی کانی سنگ‌های الترابازی در مجموعه افیولیتی پیرانشهر بیانگر این است که این سنگ‌ها دارای ویژگی‌های گوشته‌ای بوده و باقیمانده‌ی ذوب هستند.

بخش بازی مجموعه افیولیتی شامل بازالت، الیوین گابرو و گابروی زمین‌ساختی است. ساخت میلونیتی به خوبی در این مجموعه قابل مشاهده است. رسوبهای نواحی عمیق شامل چرت‌ها، آهک‌های پلاژیک با تبلور دوباره به آهک میکروکریستالین هستند. در برخی مناطق سنگ‌های رسوبی دگرگون شده به همراه آمفیبولیت‌ها نیز قابل مشاهده‌اند. سن مجموعه‌ی افیولیتی پیرانشهر کرتاسه بالایی است [۱۴].

سنگ‌شناسی

سنگ‌های الترابازی رخنمون یافته در منطقه‌ی پیرانشهر درجه‌های مختلفی از سرپانتینی شدن را از خود نشان داده و در نمونه‌ی دستی بیشتر به رنگ تیره دیده می‌شوند. بر اساس مقدار مدال کانی‌های اولیه (الیوین، ارتوپروکسن و کلینوپروکسن)، سنگ‌های الترابازی مورد بررسی بیشتر از نوع هارزبورژیت هستند. ساخت‌های برگواره‌ای میلونیتی در این سنگ‌ها معمول است. ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌های فرابازی منطقه‌ی پیرانشهر شامل کانی‌های الیوین، ارتوپروکسن، اسپینل و به مقدار بسیار کم کلینوپروکسن (کمتر از ۲٪ مدال کانی‌ها) به عنوان کانی‌های اولیه و کانی‌های گروه سرپانتین، آمفیبول، تالک و منیتیت به عنوان کانی‌های حاصل از سرپانتینی شدن هستند.

الیوین کانی اصلی تشکیل دهنده‌ی سنگ‌های فرابازی بوده و به صورت بی‌شکل ظاهر شده و دارای شکستگی‌های فراوان است. الیوین موجود در این سنگ‌ها در برخی موارد دگرشکل



شکل ۲ (الف) و (ب): کانی الیوین با شکستگی‌های فراوان و حضور الیوین به صورت درونگیر در داخل ارتوپیروکسن. (پ): کانی‌های سرپانتین که در حاشیه الیوین تشکیل شده‌اند. (ت): تصویر BSE تهیه شده از الیوین که به صورت درونگیر در داخل ارتوپیروکسن قرار گرفته است. در این تصویر الیوین‌های غنی از آهن دارای رنگ بازتابی روشن‌تر در مقایسه با الیوین‌های فقیر از آهن هستند. (ث): تصویر BSE از الیوین‌های غنی از آهن که در حاشیه الیوین‌های اولیه تشکیل شده‌اند. سرپانتین در حاشیه و محل شکستگی‌های کانی‌های الیوین و ارتوپیروکسن تشکیل شده است. همچنین بلورهای ریزی از کانی سرپانتین روی کانی الیوین نیز قابل مشاهده‌اند. (ج): تصویر BSE از الیوین درونگیر در درون کانی ارتوپیروکسن. در حاشیه الیوین‌های اولیه حاشیه باریکی از الیوین‌های غنی از آهن به همراه سرپانتین تشکیل شده است. تصاویر میکروسکوپی در نور XPL تهیه شده‌اند. Ol: الیوین، Opx: ارتوپیروکسن، Srp: سرپانتین، HFOI: الیوین‌های غنی از آهن، LFOI: الیوین‌های فقیر از آهن.

الیوین‌های اولیه

فرمول ساختاری کانی الیوین بر اساس ۴ اتم اکسیژن و ۳ کاتیون محاسبه شده است. نتایج معرف حاصل از تجزیه این کانی در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. الیوین‌های باقیمانده از سنگ اولیه حاوی مقدار بالایی از عضو انتهایی فورستريت ($\text{Fo}_{90.37-90.89}$) هستند. ترکیب تمامی نقاط تجزیه شده یکنواخت بوده و تغییرات اندکی را نسبت به یکدیگر از خود نشان می‌دهند. مقادیر عناصر Si، Fe و Mg موجود در ساختار کانی الیوین به ترتیب برابر با $0.983 - 0.955$ ، $0.193 - 0.185$ و $1.886 - 1.842$ اتم در واحد فرمولی است. مقدار اکسیدهای CaO ($0.39 - 0.06 \text{ wt\%}$)، MnO ($0.159 - 0.104 \text{ wt\%}$)، Cr_2O_3 ($0.31 > \text{wt\%}$) و TiO_2 ($0.17 > \text{wt\%}$) موجود در ترکیب کانی الیوین پایین است.

الیوین‌های ثانویه

مقدار آهن الیوین‌های ثانویه در مقایسه با مقدار آهن الیوین‌های اولیه بالا بوده ($0.293 \text{ apfu} - 0.250$) و مقدار منیزیم الیوین‌های ثانویه در مقایسه با الیوین‌های اولیه کمتر است ($1.788 \text{ apfu} - 1.748$). میزان دیگر عناصر همچون Si مشابه با الیوین‌های اولیه است. مقدار این عنصر در ترکیب الیوین‌های ثانویه برابر با $0.985 - 0.971$ اتم در واحد فرمولی است. مقدار عضو انتهایی فورستريت در ترکیب الیوین‌های ثانویه از 85.6 تا 87.7 در تغییر است. مقدار اکسیدهای CaO ($0.23 \text{ wt\%}$)، TiO_2 ($0.06 \text{ wt\%}$) و MnO ($0.26 \text{ wt\%} - 0.14$)، Cr_2O_3 ($0.04 \text{ wt\%}$) موجود در ترکیب الیوین‌های ثانویه همچون الیوین‌های اولیه بوده و پایین است. نتایج معرف حاصل از تجزیه‌ی نقطه‌ای الیوین‌های ثانویه در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱ نتایج حاصل از تجزیه‌ی نقطه‌ای کانی‌های الیوین فقیر از آهن (الیوین‌های اولیه).

	۷۳	۷۴	۷۵	۷۶	۱۷۹	۱۸۰	۱۸۱	۱۸۲	۱۸۳
SiO ₂	۴۰.۴۲	۳۸.۹۰	۴۰.۵۳	۴۰.۷۳	۴۰.۷۶	۴۰.۳۸	۴۰.۲۸	۴۰.۴۸	۴۰.۵۹
TiO ₂	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱
Al ₂ O ₃	۰.۰۱	۰.۰۹	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰
Cr ₂ O ₃	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۲
FeO	۹.۷۵	۹.۵۷	۹.۴۷	۹.۴۰	۹.۳۵	۹.۱۳	۹.۳۵	۹.۲۵	۹.۲۷
MnO	۰.۱۲	۰.۱۳	۰.۱۳	۰.۱۴	۰.۱۲	۰.۱۱	۰.۱۲	۰.۱۲	۰.۱۰
MgO	۵۱.۳۰	۵۱.۵۳	۵۱.۴۲	۵۱.۴۱	۵۱.۲۵	۵۱.۱۰	۵۰.۹۴	۵۰.۹۳	۵۱.۲۴
CaO	۰.۰۲	۰.۰۴	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۱
Na ₂ O	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۱
K ₂ O	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۱
Total	۱۰۱.۶۵	۱۰۰.۲۸	۱۰۱.۵۹	۱۰۱.۷۰	۱۰۱.۵۲	۱۰۰.۷۵	۱۰۰.۷۴	۱۰۰.۸۴	۱۰۱.۲۵
Formula based on 4 O									
Si	۰.۹۷۶	۰.۹۵۵	۰.۹۷۸	۰.۹۸۱	۰.۹۸۳	۰.۹۸۱	۰.۹۸۰	۰.۹۸۳	۰.۹۸۱
Ti	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
Al	۰.۰۰۰	۰.۰۰۳	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
Cr	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
Fe ²⁺	۰.۱۹۷	۰.۱۹۶	۰.۱۹۱	۰.۱۸۹	۰.۱۸۸	۰.۱۸۵	۰.۱۹۰	۰.۱۸۸	۰.۱۸۷
Mn	۰.۰۰۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۳	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲
Mg	۱.۸۴۷	۱.۸۸۶	۱.۸۵۰	۱.۸۴۶	۱.۸۴۲	۱.۸۵۰	۱.۸۴۷	۱.۸۴۳	۱.۸۴۷
Ca	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
Na	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱
K	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
Total	۳.۰۲۴	۳.۰۴۴	۳.۰۲۳	۳.۰۱۹	۳.۰۱۷	۳.۰۱۹	۳.۰۲۱	۳.۰۱۸	۳.۰۱۹
Mg(Mg+Fe)	۰.۹۰۴	۰.۹۰۶	۰.۹۰۶	۰.۹۰۷	۰.۹۰۷	۰.۹۰۹	۰.۹۰۷	۰.۹۰۸	۰.۹۰۸
Fo%	۹۰.۳۷	۹۰.۵۷	۹۰.۶۴	۹۰.۷۰	۹۰.۷۲	۹۰.۸۹	۹۰.۶۷	۹۰.۷۶	۹۰.۷۹

جدول ۲ نتایج حاصل از تجزیه ی نقطه ای الیومین های غنی از آهن (الیومین های ثانویه)

	۵۲	۵۶	۵۷	۵۸	۶۰	۶۲	۶۵	۱۷۵	۱۷۶	۱۷۷
SiO ₂	۴۰٫۱۹	۴۰٫۰۵	۳۹٫۹۷	۳۹٫۹۱	۴۰٫۰۵	۴۰٫۳۹	۳۹٫۵۵	۳۹٫۸۵	۴۰٫۰۳	۴۰٫۰۱
TiO ₂	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰
Al ₂ O ₃	۰٫۰۱	۰٫۰۹	۰٫۴۲	۰٫۰۲	۰٫۱۲	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۱۴	۰٫۰۰
Cr ₂ O ₃	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۰٫۰۲
FeO	۱۲٫۳۷	۱۲٫۴۹	۱۲٫۳۴	۱۳٫۲۵	۱۲٫۴۱	۱۲٫۵۲	۱۴٫۲۱	۱۲٫۲۱	۱۲٫۲۸	۱۲٫۸۰
MnO	۰٫۱۴	۰٫۲۳	۰٫۲۰	۰٫۲۵	۰٫۲۲	۰٫۲۰	۰٫۲۶	۰٫۲۰	۰٫۲۱	۰٫۲۴
MgO	۴۸٫۸۴	۴۹٫۰۲	۴۸٫۰۱	۴۸٫۲۸	۴۸٫۹۱	۴۸٫۶۸	۴۷٫۵۶	۴۸٫۸۹	۴۸٫۵۹	۴۸٫۵۷
CaO	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰
Na ₂ O	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
K ₂ O	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Total	۱۰۱٫۶۸	۱۰۱٫۹۷	۱۰۱٫۰۲	۱۰۱٫۷۶	۱۰۱٫۷۷	۱۰۱٫۵۸	۱۰۱٫۷۰	۱۰۱٫۲۱	۱۰۱٫۳۲	۱۰۱٫۶۴
Formula based on 4 O										
Si	۰٫۹۸۱	۰٫۹۷۶	۰٫۹۸۲	۰٫۹۷۸	۰٫۹۷۸	۰٫۹۸۵	۰٫۹۷۵	۰٫۹۷۸	۰٫۹۸۱	۰٫۹۸۰
Ti	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Al	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۲	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۰
Cr	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰
Fe ²⁺	۰٫۲۵۳	۰٫۲۵۵	۰٫۲۵۳	۰٫۲۷۲	۰٫۲۵۳	۰٫۲۵۵	۰٫۲۹۳	۰٫۲۵۰	۰٫۲۵۱	۰٫۲۶۲
Mn	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۵
Mg	۱٫۷۷۸	۱٫۷۸۱	۱٫۷۵۸	۱٫۷۶۴	۱٫۷۸۰	۱٫۷۶۹	۱٫۷۴۸	۱٫۷۸۸	۱٫۷۷۴	۱٫۷۷۳
Ca	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Na	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
K	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Total	۳٫۰۱۹	۳٫۰۲۲	۳٫۰۱۱	۳٫۰۲۲	۳٫۰۲۰	۳٫۰۱۵	۳٫۰۲۵	۳٫۰۲۲	۳٫۰۱۷	۳٫۰۲۰
Mg/(Mg+Fe)	۰٫۸۷۶	۰٫۸۷۵	۰٫۸۷۴	۰٫۸۶۷	۰٫۸۷۵	۰٫۸۷۴	۰٫۸۵۶	۰٫۸۷۷	۰٫۸۷۶	۰٫۸۷۱
Fo%	۸۷٫۵۶	۸۷٫۴۹	۸۷٫۴۰	۸۶٫۶۶	۸۷٫۵۴	۸۷٫۳۹	۸۵٫۶۴	۸۷٫۷۱	۸۷٫۵۹	۸۷٫۱۲

سرپانتین

۱۹۱۷-۱۸۷۵، ۲۶۰۸-۲۵۹۵، ۲۸۰-۲۱۹ و ۰۱۶۷-۰۱۵۹ اتم در واحد فرمولی. همچنین میزان Cr₂O₃ موجود در ترکیب سرپانتین های تشکیل شده در حاشیه الیومین ها (wt%) (۰/۷۷-۰/۸۰۸) در مقایسه با سرپانتین هایی که الیومین ها را قطع کرده اند (تا ۰/۱۹ wt%) بسیار بالاست. بالا بودن عناصر Cr و Al در ترکیب سرپانتین های موجود در حاشیه الیومین ها می تواند تأثیر کانی ارتوپروکسن در تشکیل این سرپانتین ها را نشان دهد [۱۵]. عدد منیزیم ($Mg\# = Mg/(Mg+Fe)$) برای سرپانتین هایی که الیومین را قطع کرده اند (۰/۹۵۰ apfu - ۰/۹۴۰) در مقایسه با سرپانتین های تشکیل شده در حاشیه الیومین ها (۰/۹۳۹-۰/۹۴۲ apfu) بالاتر است.

بحث و بررسی

در این بخش تغییرات ترکیبی کانی الیومین های اولیه و ثانویه و روش تشکیل الیومین های غنی از آهن مورد بررسی قرار گرفته اند.

فرمول ساختاری کانی های گروه سرپانتین بر اساس ۷ اتم اکسیژن و ۵ کاتیون محاسبه شده است. برای بررسی های شیمی کانی های گروه سرپانتین، سرپانتین های تشکیل شده در حاشیه کانی الیومین (لیزاردیت) و سرپانتین های سوزنی (آنتیگوریت) که کانی الیومین را قطع کرده اند با میکروسکوپ الکترونی تجزیه شده است. نتایج حاصل از تجزیه این دو گروه به تفکیک در جدول ۳ نشان داده شده اند. ترکیب این دو گروه تفاوت های زیادی از خود نشان می دهند. در مقایسه با سرپانتین های تشکیل شده در حاشیه الیومین ها، سرپانتین هایی که کانی الیومین را قطع کرده اند دارای مقادیر بالاتری از Si (۱۹۸۹-۱۹۶۴ apfu) و Mg (۲۷۵۴-۲۷۱۳ apfu) بوده و نسبت به میزان عناصر Al (۱۳۴-۰/۰۷۹ apfu) و Fe (۱۵۳-۰/۱۴۴ apfu) موجود در ترکیب آن ها پایین است. میزان عناصر Si، Mg، Al و Fe موجود در ترکیب سرپانتین های تشکیل شده در حاشیه الیومین ها به ترتیب برابرند با

جدول ۳ نتایج حاصل از تجزیه‌ی نقطه‌ای کانی‌های سرپانتین تشکیل شده در ارتباط با کانی الیون

	سرپانتین‌های تشکیل شده در حاشیه الیون (لیزادیت)			سرپانتین‌های تشکیل شده بر روی الیون (آنتیگوریت)		
	۱۷۲	۱۷۳	۱۷۴	۱۸۴	۱۸۵	۱۸۶
SiO ₂	۳۹/۲۵	۴۰/۰۲	۴۰/۶۱	۴۲/۴۵	۴۱/۴۹	۴۲/۰۵
TiO ₂	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰
Al ₂ O ₃	۴۹/۷	۴۶/۲	۳/۹۴	۱/۴۴	۲/۰۱	۲/۴۴
FeO	۴/۰۴	۴/۰۱	۴/۲۳	۳/۶۸	۳/۷۸	۳/۹۳
MnO	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱
MgO	۳۶/۶۲	۳۶/۸۴	۳۶/۸۷	۳۹/۴۳	۳۸/۶۷	۳۸/۹۶
CaO	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۴۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱
Na ₂ O	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵
K ₂ O	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲
Cr ₂ O ₃	۰/۸۰	۰/۷۷	۰/۸۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰
Total	۸۶/۰۷	۸۶/۶۴	۸۷/۰۷	۸۷/۱۱	۸۶/۰۴	۸۷/۴۶
Oxygens 7 Formula on the basis of						
Si	۱/۸۷۵	۱/۸۹۶	۱/۹۱۷	۱/۹۸۹	۱/۹۷۰	۱/۹۶۴
Ti	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
Al	۰/۲۸۰	۰/۲۵۸	۰/۲۱۹	۰/۰۷۹	۰/۱۱۳	۰/۱۳۴
Fe ²⁺	۰/۱۶۱	۰/۱۵۹	۰/۱۶۷	۰/۱۴۴	۰/۱۵۰	۰/۱۵۳
Mn	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰
Mg	۲/۶۰۸	۲/۶۰۲	۲/۵۹۵	۲/۷۵۴	۲/۷۳۷	۲/۷۱۳
Ca	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۲۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
Na	۰/۰۱۲	۰/۰۱۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴
K	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
Cr	۰/۰۳۰	۰/۰۲۹	۰/۰۳۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
Total	۴/۹۷۹	۴/۹۷۰	۴/۹۶۴	۴/۹۷۳	۴/۹۷۶	۴/۹۷۱
Mg#	۰/۹۴۲	۰/۹۴۳	۰/۹۳۹	۰/۹۵۰	۰/۹۴۸	۰/۹۴۶

تغییرات ایجاد شده در ترکیب الیون‌های اولیه و ثانویه

به منظور بررسی تغییرات ترکیبی ایجاد شده در الیون‌های اولیه طی تبدیل به الیون‌های ثانویه، نمودارهای عناصر مختلف (Si, Mg, Fe و Mn) نسبت به فاصله ترسیم شده است (شکل ۳ الف و ب). محل تجزیه‌های خطی تهیه شده از الیون‌های اولیه و ثانویه در شکل ۳ پ و ت نشان داده شده‌اند. بر اساس نمودارهای عناصر نسبت به، فراوانی عناصر آهن و منیزیم در ترکیب الیون‌های اولیه و ثانویه متفاوت‌اند. مقدار دیگر عناصر (Si و Mn) تغییرات آشکاری را در ترکیب الیون‌های ثانویه و اولیه از خود نشان نمی‌دهند. روند کاهش میزان منیزیم و افزایش آهن در الیون‌های ثانویه در نمودار مقدار فورستريت موجود در ترکیب الیون‌ها در برابر فاصله نیز به خوبی مشخص است (شکل ۳ پ و ت). همچنین به منظور تعیین بهتر رابطه‌ی موجود بین عناصر آهن و منیزیم موجود در ترکیب الیون‌های اولیه و ثانویه از نمودار تغییرات دوتایی Fe نسبت به Mg استفاده شده است (شکل ۴). همخوانی مشاهده شده عناصر Fe و Mg در این نمودار منفی است. این امر بیانگر جانشینی آهن

به جای منیزیم در الیون‌های ثانویه در طی فرآیند تبدیل الیون‌های اولیه به الیون‌های ثانویه است.

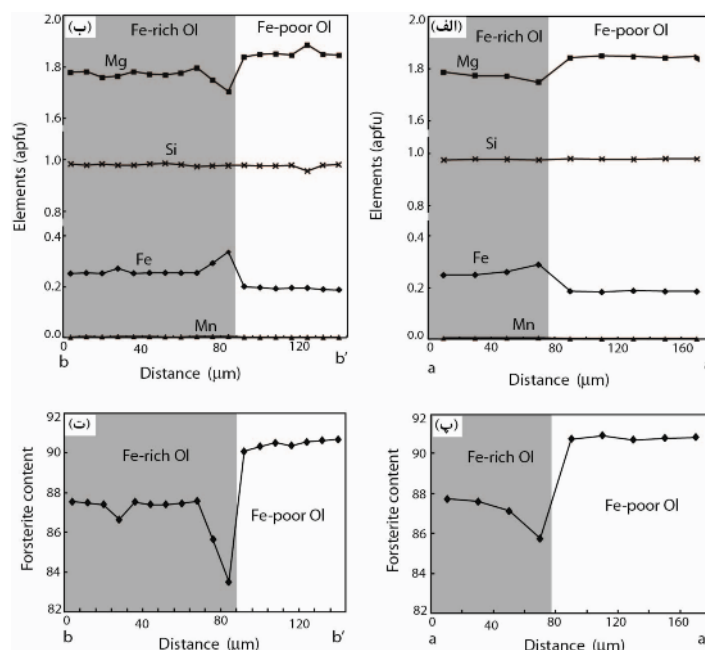
روش تشکیل الیون‌های غنی از آهن

تشکیل الیون‌های غنی از آهن از الیون‌های غنی از منیزیم توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۲]، [۱۷، ۱۶]. الیون‌های غنی از آهن گزارش شده توسط پژوهشگران مذکور، دارای طرح نواری بوده و آنها تشکیل مناطق غنی از آهن را در ارتباط با دگرشکلی و جابجایی‌های خزشی دانسته‌اند. [۲] با بررسی الیون‌هایی که دارای طرح نواری هستند، به این نتیجه رسیدند که گسترش چنین طرح‌هایی در کانی الیون ناشی از تأثیر تنش‌هایی با نرخ پایین حین دگرشکلی است. در تنش‌های با نرخ پایین، عناصر محلول (Fe^{2+}) موجود در ترکیب الیون (در مرز بین ریزذرات انباشته شده و الیون‌های غنی از آهن را به وجود می‌آورند. بررسی‌های بافتی و شیمی کانی انجام گرفته روی سنگ‌های پریدوتیت پیرانشهر بیانگر این است که الیون‌های موجود در این سنگ‌ها، حالت نواری نداشته و همواره در حاشیه‌ی الیون‌های اولیه و همراه با کانی‌های سرپانتین تشکیل شده‌اند. از این رو بر اساس

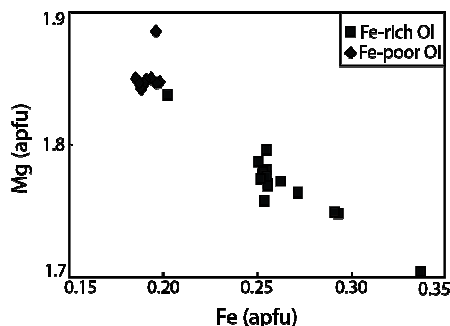
عنصر منیزیم تشکیل می‌شود [۱۸-۲۰]. ولی با توجه به بررسیهای بافتی انجام شده روی سنگ‌های فرامافی منطقه پیرانشهر، منیتیت به همراه سرپانتین‌هایی که همراه با الیون-های غنی از آهن تشکیل شده‌اند، مشاهده نشده است (شکل ۲، ت و ج). [۲۱] بررسی فرآیند سرپانتینی شدن پریدوتیت-ها در دماهای مختلف نشان داد که منیتیت به همراه سرپانتین (لیزاردیت) و هیدروژن ($\pm$ بروسیت) فرآورده‌های اصلی فرآیند سرپانتینی شدن الیون در دماهای پایین (۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد) هستند. بنابر بررسیهای آنها، در دماهای بالاتر (۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد)، نرخ انتشار Fe-Mg در ساختار کانی الیون از نرخ تشکیل و ته‌نشست منیتیت سریع‌تر است. این امر منجر به تشکیل سرپانتین‌های غنی از Mg (آنتیگوریت) به همراه الیون‌هایی که ترکیب آن‌ها دستخوش تغییر شده است،

روابط بافتی، چنین استنباط می‌شود که الیون‌های غنی از آهن به طور ثانویه و در ارتباط با پدیده‌ی سرپانتینی شدن الیون‌ها تشکیل شده‌اند. گرچه لازم به یادآوری است که برخی از بلورهای الیون مشاهده شده در سنگ‌های فرابازی منطقه پیرانشهر آثار دگرشکلی را از خود نشان داده و دارای خاموشی موجی هستند. با این وجود ارتباطی بین دگرشکلی و تشکیل الیون‌های غنی از آهن در سنگ‌های فرامافیک منطقه پیرانشهر یافت نشد.

سرپانتین‌های تشکیل شده روی کانی الیون ($Mg\# = 0.94$) و یا در حاشیه‌ی این کانی ($Mg\# = 0.93 - 0.94$) در مقایسه با ترکیب الیون‌های اولیه ($Mg\# = 0.91 - 0.90$) دارای عدد منیزیم بالاتری هستند. معمولاً طی فرآیند سرپانتینی شدن الیون، منیتیت به همراه سرپانتین‌های غنی از



شکل ۳ (الف و ب): نمودار عناصر مختلف موجود در ترکیب کانی الیون نسبت به فاصله. موقعیت نقاط تجزیه شده در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. (پ و ت): نمودار مقدار عضو انتهایی فورستریت در ترکیب کانی الیون نسبت به فاصله. موقعیت نقاط در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۴ نمودار تغییرات دوتایی Mg نسبت به Fe موجود در ترکیب کانی الیون. همخوانی منفی بین این دو عنصر در این شکل قابل مشاهده است.

برداشت

الیوین از کانی‌های اصلی سنگ‌های فرابازی رخنمون یافته در منطقه‌ی پیرانشهر است. این کانی بی‌شکل بوده و دارای شکستگی‌های فراوان است. سرپانتینی شدن الیوین از حاشیه و محل شکستگی‌ها پدیده‌ای رایج در سنگ‌های فرابازی مورد بررسی بوده و در برخی موارد کانی‌های سرپانتین بر روی الیوین نیز تشکیل شده‌اند. واکنش‌های مربوط به سرپانتینی شدن الیوین در این سنگ‌ها به دو صورت همراه با تشکیل منیتیت و بدون تشکیل منیتیت فرآورده‌ها رخ داده است. بررسی‌های سنگ نگاری، تصاویر BSE تهیه شده و بررسی‌های شیمی کانی انجام گرفته روی الیوین‌های سرپانتینی شده منطقه پیرانشهر که منیتیت در فرآورده‌های حاصل از سرپانتینی شدن آن‌ها قابل مشاهده نیست، حاکی از تبدیل این کانی به الیوین‌های غنی از آهن در حاشیه است. این تبدیل حتی در الیوین‌هایی که به صورت درونگیر در درون دیگر کانی‌ها بویژه ارتوپیروکسن حضور دارند، نیز قابل مشاهده است. بر اساس بررسی‌های بافتی، الیوین‌های غنی از آهن، همواره در ارتباط با کانی‌های سرپانتین تشکیل شده‌اند. بررسی شیمی کانی‌های سرپانتین تشکیل شده در حاشیه و روی الیوین‌های اولیه و مقایسه‌ی آن با الیوین‌های اولیه، نشان می‌دهد که کانی‌های سرپانتین در مقایسه با الیوین‌های اولیه دارای غلظت بالایی از عنصر منیزیم در ترکیب خود هستند. به طوری که که عدد منیزیم موجود در ترکیب الیوین‌های اولیه از ۰/۹۰ تا ۰/۹۱ و عدد منیزیم کانی‌های سرپانتین از ۰/۹۳ تا ۰/۹۵ در تغییر است. لازم به یادآوری است که سرپانتین تنها فرآورده فرآیند سرپانتینی شدن در این الیوین‌ها بوده و دیگر فازها بویژه منیتیت در طول این فرآیند تشکیل نشده‌اند. عدم تشکیل منیتیت طی فرآیند سرپانتینی شدن الیوین‌ها در بافت‌های یادشده، منجر به افزایش غلظت عنصر آهن در شاره‌ی حاصل از سرپانتینی شدن الیوین‌ها شده است. شاره‌ی یاد شده با تأثیر بر الیوین‌های اولیه، باعث تبدیل آن‌ها به الیوین‌های غنی از آهن از حاشیه شده است.

قدردانی

بدینوسیله از دکتر کریستینا گونتر از دانشگاه پتسدام که ما را در انجام تجزیه‌های ریزپردازشی یاری دادند، تشکر می‌کنیم. همچنین از دانشگاه تبریز برای در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی تشکر می‌شود. همچنین از داوران محترم مقاله که

می‌شود. از اینرو، این فرآیند منجر به عدم تشکیل منیتیت و هیدروژن طی فرآیند سرپانتینی شدن الیوین خواهد شد. گرچه [۱۹] نمونه‌ای از فرآیند سرپانتینی شدن الیوین و ارتوپیروکسن بدون حضور منیتیت در دمای پایین را گزارش کرده است. [۱۹] عدم تشکیل منیتیت در این سنگ‌ها را وابسته به عواملی همچون دما، f_{H_2O} و f_{H_2} و a_{SiO_2} می‌دانند و تشکیل منیتیت را منجر به تشکیل سرپانتین‌های (لیزاردیت) غنی از آهن می‌دانند. همه‌ی سرپانتین‌های تشکیل شده در پریدوتیت‌های منطقه پیرانشهر فقیر از آهن (۰/۱۶۷-۰/۱۵۹ apfu) برای سرپانتین‌های تشکیل شده در حاشیه الیوین‌ها و ۰/۱۵۳ apfu - ۰/۱۴۴ برای سرپانتین‌های تشکیل شده روی الیوین‌ها) و غنی و از منیزیم (۲/۶۰۸-۲/۵۹۵ apfu) برای سرپانتین‌های تشکیل شده در حاشیه الیوین‌ها و ۲/۷۵۴-۲/۷۱۳ apfu برای سرپانتین‌های تشکیل شده روی الیوین) هستند. بنابراین، شرایط یاد شده توسط [۱۹] در فرآیند سرپانتینی شدن پریدوتیت‌های منطقه پیرانشهر صادق نیست. [۳] با بررسی روی الیوین‌های غنی از آهن و الیوین‌های اولیه در پریدوتیت-های جلوی قوس ماریانا واقع در غرب اقیانوس آرام، معتقدند که تشکیل الیوین‌های غنی از آهن در حاشیه‌ی الیوین‌های اولیه ناشی از تأثیر شاره‌هایی است که ترکیب آن‌ها طی تشکیل سرپانتین در دمایی در حدود ۴۵۰ تا ۵۵۰ °C، از عنصر آهن غنی شده است.

بررسی‌های سنگ‌شناسی و بافتی انجام گرفته روی پریدوتیت‌های منطقه پیرانشهر نشان می‌دهد که واکنش‌های سرپانتینی شدن الیوین در این سنگ‌ها به دو صورت (۱) همراه با منیتیت (بدون حضور الیوین‌های ثانویه غنی از آهن) و (۲) بدون حضور منیتیت و همراه با تشکیل الیوین‌های غنی از آهن در فرآورده‌ها رخ داده است. از این رو، با توجه به فرآورده‌های واکنش‌های سرپانتینی شدن الیوین (برخی از فرآورده‌های همراه با منیتیت و برخی دیگر بدون حضور منیتیت و همراه با الیوین‌های غنی از آهن)، عدم تشکیل سرپانتین‌های غنی از آهن و نیز نتایج حاصل از بررسی‌های [۲۱، ۳] و با توجه به شواهد بافتی و شیمی کانی می‌توان چنین نتیجه گرفت که الیوین‌های غنی از آهن تشکیل شده در حاشیه الیوین‌های منطقه پیرانشهر در اثر فرآیند سرپانتینی شدن و تأثیر شاره‌های غنی از آهن در دمایی در حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه‌ی سانتیگراد تشکیل شده‌اند.

- [11] Kunugiza K., "Formation of zoning of olivine with progressive metamorphism of serpentinite – an example from the Ryumon peridotite body of the Sanbagawa metamorphic belt, Kii peninsula", Journal of the Japanese Association of Mineralogist, Petrologists and Economic Geologists 77 (1982), 157-170.
- [12] Trommsdorff V., López Sánchez-Vizcaíno V., Gómez-Pugnaire M. T., Müntener O., "High pressure breakdown of antigorite to spinifex-textured olivine and orthopyroxene, SE Spain", Contributions to Mineralogy and Petrology 132 (1998), 139-148.
- [13] Frost B. R., "On the stability of sulfides, oxides, and native metals in serpentinite", Journal of Petrology 26 (1985), 31-63.

[۱۴] خداینده ع. ا.، "نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ نطده"

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۳).

- [15] Li X. P., Rahn M., Bucher K., "Metamorphic processes in rodingites of the Zermatt-Saas ophiolites", International Geological Review 46 (2004), 28-51.
- [16] Kitamura M., Matsuda H., Morimoto N., "Direct observation of Cottrell Atmosphere in olivine", Proceedings of Japan Academy 62 (1986), 149-152.
- [17] Uda S., "The contact metamorphism of the Oeyama ultrabasic mass and the genesis of the "cleavable olivine", The Journal of the Geological Society of Japan 90 (1984), 393-410.
- [18] Evans B. W., "Control of the Products of Serpentinization by the $Fe^{3+}Mg_{-1}$ Exchange Potential of Olivine and Orthopyroxene", Journal of Petrology 49 (2008), 1873-1887.
- [19] Evans B. W., Kuhnert S. M., Chopelas A., "Magnetite-free, yellow lizardite serpentinization of olivine websterite, Canyon Mountain complex, N.E. Oregon", American Mineralogist 94 (2009), 1731-1734.
- [20] Frost B. R., Beard J. S., "On silica activity and serpentinization", Journal of Petrology 48 (2007), 1351-1368.
- [21] Evans B., "Lizardite versus antigorite serpentinite: Magnetite, hydrogen, and life(?)", Geology 38 (2010), 879-882.

با ارائه نظرهای سازنده‌ی باعث بهتر شدن مقاله شدند، نیز تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] Nozaka T., "Compositional heterogeneity of olivine in thermally metamorphosed serpentinite from Southwest Japan", American Mineralogist 88 (2003), 1377-1384.
- [2] Ando J., Shibata Y., Okajima Y., Furusho M., Tomioka N., "Striped iron zoning of olivine induced by dislocation creep in deformed peridotites", Nature 414 (2001), 893-895.
- [3] Murata K., Maekawa H., Ishii K., Mohammad Y. O., Yokose H., "Iron- rich stripe patterns in olivines of serpentinized peridotites from Mariana forearc seamounts, western Pacific", Journal of Mineralogical and Petrological Sciences 104 (2009), 199-203.
- [4] Murata K., Maekawa H., Yokose H., Yamamoto K., Fujioka K., Ishii T., Chiba H., Wada Y., "Significance of serpentinization of wedge mantle peridotites beneath Mariana forearc, western Pacific", Geosphere 5 (2009), 90-104.
- [5] Nicolas A., Christensen N. I., "Formation of anisotropy in upper mantle peridotite: a review. In: Fuchs K, Fordevaux C (eds) Composition, structure and dynamics of the lithosphere-aesthenosphere system", Geodynamic Series 16 (1987), 111-123.
- [6] Chopra P. N., Paterson M. S., "The role of water in the deformation of dunite", Journal of Geophysical Researches 89 (1984), 7861-7876.
- [7] Mei S., Kohlstedt D. L., "Influence of water on plastic deformation of olivine aggregates 2. Dislocation creep regime", Journal of Geophysical Researches 105 (2000), 21471-21481.
- [8] Hier-Majumder S., Anderson I. M., Kohlstedt D. L., "Influence of protons on Fe-Mg interdiffusion in olivine", Journal of Geophysical Researches 110 (2005), B02202.
- [9] Vance J. A., Dungan M. A., "Formation of peridotites by deserpentinization in the Darrington and Sultan areas, Cascade Mountains, Washington", Geological Society of America Bulletin 88 (1977), 1497-1508.
- [10] Trommsdorff V., Evans B. W., "Titanian hydroxyl-clinohumite: formation and breakdown in antigorite rocks (Malenco, Italy)", Contributions to Mineralogy and Petrology 72 (1980), 229-242.