

خاستگاه ماگما در پهنه ابرفرورانشی مجموعه افیولیتی پیرانشهر بر اساس شیمی کانی کلینوپیروکسن موجود در بازالت‌های شمال غرب ایران

مریم یزدانی*

دانشگاه ارومیه، مرکز آموزش عالی شهید باکری میاندوآب، گروه مهندسی معدن، ۵۹۸۷۱۵۹

(دریافت مقاله: ۹۶/۱۲/۱۶، نسخه نهایی: ۹۷/۲/۱۵)

چکیده: مجموعه افیولیتی پیرانشهر در شمال غرب ایران، شمال غرب پیرانشهر واقع است. این مجموعه به شدت درهم آمیخته است و مرز بین واحدهای مختلف در آن قابل تفکیک نیست. سنگ‌های تشکیل‌دهنده افیولیت درهم آمیخته پیرانشهر شامل فرامافیک، مافیک، رسوبی و دگرگونی است. سنگ‌های مافیک با ترکیب بازالت و دیاباز در بخش‌های مختلف بصورت پراکنده رخنمون دارند. در این مقاله، زمین‌شیمی کلینوپیروکسن سنگ‌های بازالتی بررسی و با سایر سنگ‌های بازالتی مناطق افیولیتی پهنه ابرفرورانشی شرق مدیترانه مقایسه شده است. کلینوپیروکسن بازالت افیولیت پیرانشهر ترکیب دیوپسید با گستره $En_{0.39-0.59}Fs_{0.01-0.05}WO_{0.50-0.57}$ سرشت آهکی-قلیایی، Ti پایین و Mg بالا نشان می‌دهد. مقدار Mg بالا و Ti پایین ماگما نشان‌دهنده تشکیل بازالت افیولیت پیرانشهر در پهنه ابرفرورانشی است. براساس توزیع آلومینیوم در کلینوپیروکسن‌ها، این کانی در گریزندگی بالای اکسیژن و از ماگمایی با مقدار آب ۱۰ درصد تشکیل شده است. کلینوپیروکسن افیولیت پیرانشهر شیمی مشابه با سایر افیولیت‌های ابرفرورانشی شرق مدیترانه (مثل ترودوس، وارینوس، پندوس و عمان) دارد که قرابت قوس نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: ابرفرورانشی؛ ماگمای قوس؛ پیرانشهر؛ بازالت؛ کلینوپیروکسن.

مقدمه

نشان دهنده شرایط فیزیکی ماگما (فشار و دما) در زمان تبلور نیز است [۳-۵]. بطوریکه بررسی‌های انجام گرفته بر شیمی کلینوپیروکسن در سنگ‌های مافیک نشان داده است که شیمی و ترکیب این کانی توسط ترکیب ماگمای اولیه، شرایط فیزیکوشیمیایی تبلور و محیط زمین‌ساختی کنترل می‌شود [۶،۷]. از این‌رو، ترکیب شیمیایی این کانی در سنگ‌های آذرین می‌تواند به عنوان ابزار قدرتمندی جهت شناسایی شرایط تبلور در این سنگ‌ها به کار گرفته شود.

درشت‌بلور پیروکسن کمتر دگرسان شده در سنگ‌های بازالتی افیولیت پیرانشهر فراوان هستند. بنابراین در این پژوهش، به کمک ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن و همچنین مقایسه آن با کلینوپیروکسن سایر بازالت‌های مناطق افیولیتی،

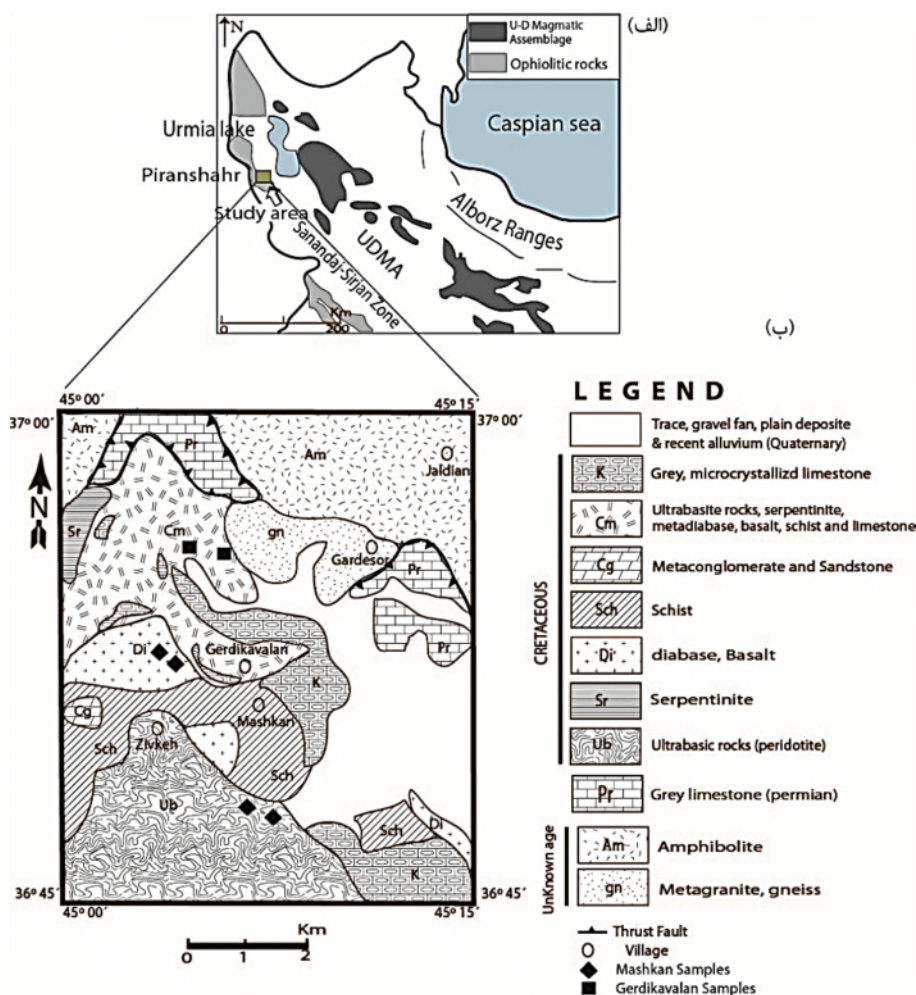
محیط تشکیل و شیمی سنگ‌های بازی در مناطق افیولیتی به ویژه انواع وابسته به فعالیت ماگمایی قوس بسیار متنوع است. برخی از عوامل تاثیرگذار عبارتند از شیمی اولیه خاستگاه گوشته‌ای، نوع و نرخ ذوب، فرایند جدایش، فلوئیدهای آزاد شده از تختال فرورانشی و فعالیت دگرنهادی گوشته‌ای، آلودگی ماگمای بازی در اثر هضم پوسته‌ای و فرایند دگرسانی [۱]. بنابراین تعیین خاستگاه و محیط زمین‌ساختی سنگ‌های بازی به ویژه سنگ‌های بازالتی با حساسیت بیشتری همراه است [۱]. کلینوپیروکسن به عنوان یک کانی ردیاب در ارزیابی شرایط فیزیکوشیمیایی ماگما شناخته شده است که ترکیب آن نه تنها بازتاب‌کننده شرایط شیمیایی و سری ماگمایی [۲،۳] بلکه

محیط ساختاری بازالت‌های افیولیتی پیرانشهر بررسی شده است.

زمین‌شناسی عمومی

منطقه مورد بررسی در شمال‌غرب شهرستان پیرانشهر در استان آذربایجان غربی واقع است. بر اساس تقسیم‌بندی ساختارهای زمین‌شناسی ایران [۸]، این منطقه بخشی از کمربند دگرگونی و افیولیتی سنندج- سیرجان است. در تقسیم‌بندی ساختارهای زمین‌شناسی ایران [۹]، این منطقه در پهنه سنندج- سیرجان واقع است (شکل ۱ الف). سنگ‌های رخمون یافته در این منطقه دارای ترکیب سنگ‌شناسی و سنی متنوعی هستند. مجموعه افیولیتی رخمون یافته در این منطقه به شدت در هم آمیخته است و امکان جدا کردن واحدهای مختلف در آن وجود ندارد. این مجموعه افیولیتی به سن کرتاسه [۱۰]، دارای پریدوتیت‌های سرپانتینی شده

گوشته‌ای، دیاباز، بازالت، گابرو و سنگ آهک ریزبلورین (لجه- ای) است. سنگ‌های دگرگونی این مجموعه شامل سرپانتینیت، پریدوتیت دگرگونه، آمفیبولیت، متاپلیت دگرگونه و شیست‌های بازی دگرگونه هستند. بیش از ۷۰ درصد رخمون افیولیت پریدوتیت‌های گوشته‌ای است که در بخش غربی منطقه گسترده است. پریدوتیت غالب منطقه دونیت و هارزبورژیت است. گابرو، بازالت و دایک‌های دیابازی توسط سنگ آهک‌ها و رادیولاریت لجه‌ای کرتاسه پایانی پوشیده شده است [۱۱، ۱۰]. سنگ‌های آهکی و دولومیتی تیره رنگ به سن پرمین با ضخامت قابل توجه در بخش‌های شمال‌غرب و شرق منطقه بسیار گسترده دیده می‌شوند. آمفیبولیت و گنیس گرانیته به سن نامشخص نیز از این منطقه گزارش شده است [۱۰] (شکل ۱ ب).



شکل ۱ (الف) جایگاه منطقه مورد بررسی در نقشه زمین ساختی ایران برگرفته از مرجع [۹]. (ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه پیرانشهر برگرفته از مرجع [۱۰].

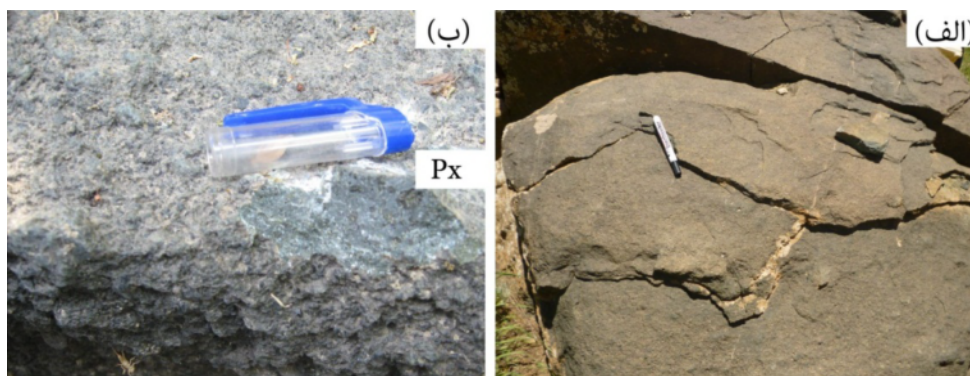
سنگ‌نگاری

بازالت‌های موجود در مجموعه افیولیتی شمال‌غرب پیرانشهر اغلب از نوع کلینوپیروکسن-بازالت هستند که در آن‌ها کلینوپیروکسن به صورت درشت‌بلور در یک زمینه بسیار دانه ریز شامل کلینوپیروکسن‌های ریز، پلاژیوکلاز، کانی‌های تیره و سایر کانی‌های فرعی قرار گرفته‌اند (شکل ۳). درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن موجود در این سنگ‌ها بیشتر به صورت خود شکل و یا نیمه‌خود شکل ظاهر شده‌اند (شکل ۳). برخی از درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن موجود در این نمونه‌ها دگرسان بوده و با کلسیت ثانویه جایگزین شده‌اند. شدت دگرسانی در برخی از بلورها بالاست، بطوریکه کل کانی به کلسیت و مجموعه‌ای دانه‌ریز از کانی‌های ثانویه تبدیل شده و تنها قالب دروغین کلینوپیروکسن در آن‌ها باقی مانده است. کانی هورنبلند بصورت درشت‌بلور خودشکل نیز در بازالت‌ها دیده شده است (شکل ۳ الف). کلسیت ثانویه برآمده از دگرسانی کانی‌های ریز موجود در زمینه کلینوپیروکسن بازالت‌ها بفرآوری قابل مشاهده است (شکل ۳ ب).

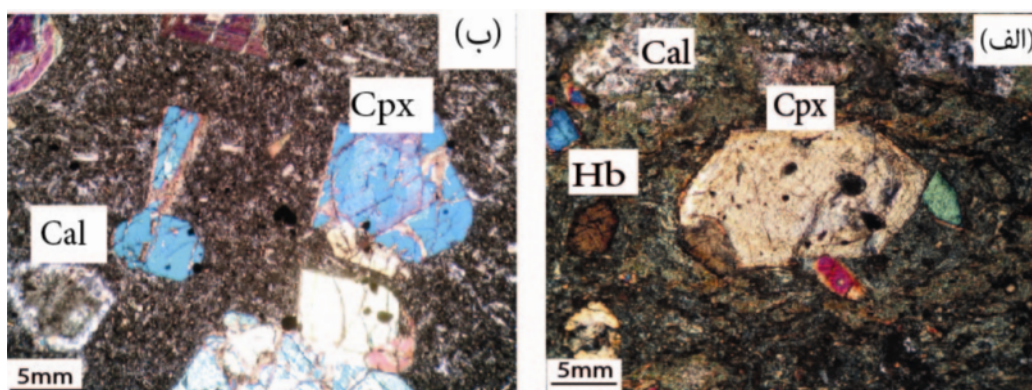
سنگ‌های مافیک این مجموعه شامل بازالت، دیاباز و گابرو است که به صورت درهم آمیخته با مجموعه فرامافیک و دگرگونی‌های آمفیبولیتی دیده می‌شود. سنگ‌های بازالتی دارای بافت‌های غالب دانه‌ریز و پورفیری هستند (شکل‌های ۲ الف و ب) و برخی ویژگی برشی شده را نیز نشان می‌دهند. درشت‌بلورهای پیروکسن به طول نیم تا یک سانتی متر در خمیره سبز رنگ (برآمده از دگرسانی خمیره) قابل مشاهده هستند (شکل ۲ ب).

روش بررسی

برای انجام این پژوهش، پس از بازدیدهای گسترده صحرایی، تعدادی مقطع نازک از نمونه‌های بازالتی تهیه و بررسی شد. پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری، به منظور بررسی شیمی کلینوپیروکسن‌ها و تعیین روابط سنگ‌زایی، کلینوپیروکسن‌های موجود در بازالت‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مدل JEOL, JXA-8200 با ولتاژ شتابدهنده ۱۵kV و شدت جریان ۲۰nA در دانشگاه پتسدام در کشور آلمان تجزیه شدند.



شکل ۲ تصاویر صحرایی از سنگ‌های بازالتی افیولیت پیرانشهر، (الف) بافت دانه ریز سنگ‌های بازالتی و (ب) بافت پورفیری و خمیره سبز رنگ سنگ‌های بازالتی.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از سنگ‌های بازالتی منطقه پیرانشهر، (الف) کلینوپیروکسن خودشکل (XPL) در خمیره دگرسان شده و هورنبلند خودشکل و (ب) کلینوپیروکسن نیمه شکل دار (XPL) در خمیره دگرسان شده و کلینوپیروکسن جایگزین شده با کلسیت.

زمین شیمی

شیمی کلینوپیروکسن

در این پژوهش، بلورهای کلینوپیروکسن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تجزیه شدند که نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. فرمول ساختاری کلینوپیروکسن بر پایه ۶ اتم اکسیژن و ۴ کاتیون محاسبه شده است. همه آهن موجود در ترکیب این کانی به صورت آهن دو ظرفیتی محاسبه شده است. مقدار عدد منیزیم، $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ ، در نمونه‌های مختلف نسبتاً بالا بوده و از ۰٫۷۳۸ تا ۰٫۹۸ در تغییر است. فراوانی Ti در کلینوپیروکسن‌های بررسی شده پایین بوده (۰٫۰۶ apfu -

۰٫۰۷) در حالیکه مقدار Al موجود در ترکیب این نمونه‌ها نسبتاً بالاست (۰٫۰۹-۰٫۴ apfu). مقدار Si در این نمونه‌ها متغیر بوده و از ۱٫۵۸ تا ۱٫۸۸۱ اتم در واحد فرمولی در تغییر است. میزان تغییرات مشاهده شده در مقدار Ca در مقایسه با عناصر دیگر نسبتاً پایین است (۰٫۹۶۴ - ۰٫۹۳۵ apfu). مقدار Fe^{2+} در ترکیب کلینوپیروکسن‌های موجود در بازالت‌های پیرانشهر پایین بوده و از ۰٫۰۰۱ تا ۰٫۰۶۰ اتم در واحد فرمولی در تغییر است. در مقابل مقدار عنصر Mg در ترکیب این کانی-ها بالاست (۰٫۷۲۶-۰٫۹۴۶ apfu).

جدول ۱ نتایج برآمده از تجزیه نقطه‌ای کانی کلینوپیروکسن موجود در بازالت‌های منطقه پیرانشهر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی.

SiO ₂	۵۱٫۴۳	۴۸٫۰۸	۴۸٫۱۵	۴۷٫۵۱	۴۷٫۸۶	۴۷٫۱۴	۴۱٫۹۶	۴۷٫۲۸	۵۱٫۵۲	۵۱٫۳۶	۵۱٫۲۸	۴۹٫۶۵	۵۱٫۲۹	۵۱٫۱۱
TiO ₂	۰٫۳۵	۰٫۹۱	۰٫۸۲	۰٫۹۱	۰٫۸۸	۱٫۰۶	۰٫۶۱	۱٫۰۳	۰٫۳۲	۰٫۳۲	۰٫۳۸	۰٫۶۴	۰٫۳۴	۰٫۴۰
Al ₂ O ₃	۲٫۲۰	۵٫۱۰	۵٫۱۵	۵٫۷۳	۵٫۳۸	۶٫۲۹	۳٫۷۸	۶٫۰۸	۱٫۹۰	۲٫۱۲	۲٫۴۱	۳٫۸۶	۲٫۵۶	۲٫۶۰
Cr ₂ O ₃	۰٫۲۵	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۴۱	۰٫۴۱	۰٫۲۳	۰٫۰۷	۰٫۲۶	۰٫۳۰
Fe ₂ O ₃	۴٫۶۶	۵٫۷۴	۶٫۱۱	۶٫۵۵	۶٫۱۹	۶٫۶۰	۱۷٫۷۱	۶٫۵۲	۴٫۴۱	۴٫۳۵	۴٫۱۰	۵٫۳۸	۴٫۱۷	۴٫۳۵
FeO	۰٫۰۰	۲٫۸۲	۱٫۷۰	۱٫۶۱	۱٫۹۶	۱٫۹۰	۰٫۰۰	۱٫۷۶	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۶۷	۰٫۷۵	۰٫۷۷	۰٫۴۳
MnO	۰٫۰۷	۰٫۱۲	۰٫۱۶	۰٫۱۱	۰٫۱۶	۰٫۱۶	۰٫۲۳	۰٫۱۵	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۱۰	۰٫۱۳	۰٫۰۸	۰٫۰۸
MgO	۱۶٫۸۵	۱۳٫۷۲	۱۴٫۲۶	۱۳٫۸۶	۱۳٫۶۴	۱۳٫۴۲	۹٫۵۱	۱۳٫۷۴	۱۷٫۱۱	۱۶٫۹۵	۱۶٫۴۰	۱۵٫۴۳	۱۶٫۴۰	۱۶٫۳۸
CaO	۲۴٫۳۴	۲۲٫۹۶	۲۳٫۲۵	۲۳٫۲۶	۲۲٫۹۴	۲۳٫۲۵	۲۵٫۷۸	۲۳٫۱۲	۲۴٫۰۶	۲۳٫۹۵	۲۳٫۹۸	۲۳٫۷۵	۲۳٫۹۵	۲۳٫۸۷
Na ₂ O	۰٫۱۷	۰٫۳۲	۰٫۲۷	۰٫۳۰	۰٫۴۳	۰٫۳۲	۱٫۵۱	۰٫۳۱	۰٫۱۹	۰٫۱۷	۰٫۲۰	۰٫۲۳	۰٫۱۸	۰٫۲۴
K ₂ O	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۷	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۱
مجموع	۹۹٫۲۲	۹۹٫۳۰	۹۹٫۲۲	۹۹٫۸۷	۹۸٫۸۹	۹۹٫۵۱	۹۲٫۷۸	۹۹٫۳۸	۹۹٫۱۵	۹۹٫۱۸	۹۹٫۳۵	۹۹٫۳۸	۹۹٫۵۹	۹۹٫۳۴
فرمول بر پایه ۶ اتم O														
Si	۱٫۸۸	۱٫۷۹	۱٫۷۹	۱٫۷۷	۱٫۷۹	۱٫۷۵	۱٫۶۸	۱٫۷۶	۱٫۸۹	۱٫۸۹	۱٫۸۸	۱٫۸۳	۱٫۸۸	۱٫۸۸
Ti	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Al(total)	۰٫۰۹	۰٫۲۲	۰٫۲۳	۰٫۲۵	۰٫۲۴	۰٫۲۸	۰٫۱۸	۰٫۲۷	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۱۰	۰٫۱۷	۰٫۱۱	۰٫۱۱
Al ^{IV}	۰٫۰۶	۰٫۱۰	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۶	۰٫۱۲	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۸	۰٫۰۶	۰٫۰۶
Al ^{VI}	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۱۴	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Cr	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Fe ³⁺	۰٫۱۳	۰٫۱۶	۰٫۱۷	۰٫۱۸	۰٫۱۷	۰٫۱۸	۰٫۵۳	۰٫۱۸	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۵	۰٫۱۲	۰٫۱۲
Fe ²⁺	۰٫۰۱	۰٫۰۹	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۲۲	۰٫۰۵	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱
Mn	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Mg	۰٫۹۲	۰٫۷۶	۰٫۷۹	۰٫۷۷	۰٫۷۶	۰٫۷۴	۰٫۵۷	۰٫۷۶	۰٫۹۴	۰٫۹۳	۰٫۹۰	۰٫۸۵	۰٫۹۰	۰٫۹۰
Ca	۰٫۹۵	۰٫۹۲	۰٫۹۳	۰٫۹۳	۰٫۹۲	۰٫۹۳	۱٫۱۱	۰٫۹۲	۰٫۹۵	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴
Na	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۱۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲
K	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۴٫۰۲	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۴۴	۴٫۰۰	۴٫۰۲	۴٫۰۱	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰
نسبت‌های مولی														
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	۱٫۰۱	۰٫۹۰	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۳	۰٫۹۳	۱٫۶۳	۰٫۹۳	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۹
En	۰٫۴۹	۰٫۴۳	۰٫۴۵	۰٫۴۴	۰٫۴۴	۰٫۴۳	۰٫۳۹	۰٫۴۴	۰٫۵۰	۰٫۵۰	۰٫۴۸	۰٫۴۷	۰٫۴۸	۰٫۴۸
Fs	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Wo	۰٫۵۱	۰٫۵۲	۰٫۵۲	۰٫۵۳	۰٫۵۳	۰٫۵۴	۰٫۷۶	۰٫۵۳	۰٫۵۱	۰٫۵۰	۰٫۵۱	۰٫۵۲	۰٫۵۱	۰٫۵۱

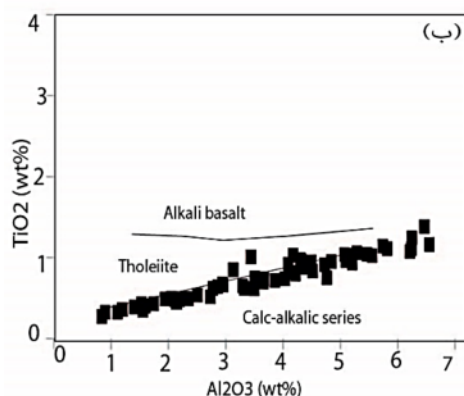
ادامه داده‌ها

SiO ₂	۵۱٫۱۶	۵۰٫۰۰	۴۹٫۲۳	۵۰٫۶۸	۵۰٫۷۴	۴۷٫۱۲	۴۷٫۷۰	۴۷٫۷۰	۴۷٫۵۹	۴۳٫۱۰	۴۲٫۲۲	۴۵٫۲۳	۴۶٫۳۲	۴۶٫۷۳
TiO ₂	۰٫۴۳	۰٫۵۳	۰٫۷۳	۰٫۴۴	۰٫۴۹	۱٫۰۰	۰٫۷۳	۰٫۹۰	۰٫۹۰	۱٫۸۸	۲٫۱۵	۱٫۲۹	۱٫۱۱	۱٫۱۱
Al ₂ O ₃	۲٫۷۵	۳٫۵۱	۴٫۵۹	۳٫۱۴	۳٫۰۹	۶٫۱۵	۵٫۴۶	۵٫۳۹	۵٫۳۴	۱۰٫۲۴	۱۰٫۷۶	۸٫۰۶	۷٫۲۴	۶٫۸۲
Cr ₂ O ₃	۰٫۲۱	۰٫۳۰	۰٫۲۱	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۱۳	۰٫۲۳
Fe ₂ O ₃	۴٫۲۲	۴٫۸۸	۵٫۲۱	۴٫۷۴	۴٫۴۹	۷٫۱۰	۶٫۳۶	۶٫۴۷	۵٫۹۷	۸٫۲۶	۸٫۸۳	۷٫۴۰	۶٫۸۴	۶٫۵۳
FeO	۰٫۸۸	۰٫۴۸	۰٫۶۸	۰٫۴۸	۰٫۷۳	۱٫۲۰	۱٫۵۴	۱٫۷۰	۲٫۴۴	۲٫۲۴	۱٫۹۹	۱٫۶۱	۱٫۴۶	۱٫۵۴
MnO	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۶	۰٫۱۰	۰٫۰۶	۰٫۱۳	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۵	۰٫۱۵	۰٫۱۲	۰٫۱۳	۰٫۱۳
MgO	۱۶٫۲۲	۱۵٫۷۸	۱۵٫۱۸	۱۶٫۰۹	۱۶٫۱۱	۱۳٫۶۷	۱۴٫۰۵	۱۳٫۹۹	۱۳٫۶۹	۱۱٫۲۱	۱۱٫۰۸	۱۲٫۶۲	۱۳٫۲۲	۱۳٫۵۱
CaO	۲۳٫۹۸	۲۳٫۸۵	۲۳٫۷۹	۲۳٫۹۸	۲۳٫۹۵	۲۳٫۳۰	۲۳٫۳۷	۲۳٫۲۳	۲۳٫۸۱	۲۲٫۶۸	۲۲٫۶۲	۲۳٫۲۶	۲۳٫۲۸	۲۳٫۳۸
Na ₂ O	۰٫۲۰	۰٫۲۲	۰٫۲۶	۰٫۲۱	۰٫۲۰	۰٫۳۶	۰٫۲۶	۰٫۲۷	۰٫۲۹	۰٫۳۹	۰٫۳۴	۰٫۲۹	۰٫۲۶	۰٫۲۵
K ₂ O	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰
مجموع	۹۹٫۷۱	۹۹٫۱۵	۹۹٫۴۳	۹۹٫۵۲	۹۹٫۵۴	۹۹٫۳۸	۹۹٫۲۰	۹۹٫۱۶	۹۸٫۶۳	۹۹٫۳۰	۹۹٫۳۹	۹۹٫۲۷	۹۹٫۴۲	۹۹٫۵۸
فرمول ساختاری بر پایه ۶ اتم اکسیژن														
Si	۱٫۸۸	۱٫۸۴	۱٫۸۱	۱٫۸۶	۱٫۸۶	۱٫۷۵	۱٫۷۷	۱٫۷۸	۱٫۶۲	۱٫۵۹	۱٫۶۹	۱٫۷۲	۱٫۷۳	۱٫۷۳
Ti	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳
Al(total)	۰٫۱۲	۰٫۱۵	۰٫۲۰	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۲۷	۰٫۲۴	۰٫۲۴	۰٫۲۴	۰٫۴۵	۰٫۴۸	۰٫۳۵	۰٫۳۲	۰٫۲۰
Al ^{IV}	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۰٫۲۱	۰٫۰۷	۰٫۱۰	۰٫۰۷
Al ^{VI}	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۱۷	۰٫۳۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Cr	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱
Fe ³⁺	۰٫۱۲	۰٫۱۴	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۲۰	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۱۷	۰٫۲۳	۰٫۲۵	۰٫۲۱	۰٫۱۹	۰٫۱۸
Fe ²⁺	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۵
Mn	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Mg	۰٫۸۹	۰٫۸۷	۰٫۸۳	۰٫۸۸	۰٫۸۸	۰٫۷۶	۰٫۷۸	۰٫۷۸	۰٫۷۷	۰٫۶۳	۰٫۶۲	۰٫۷۰	۰٫۷۳	۰٫۷۵
Ca	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۳	۰٫۹۳	۰٫۹۳	۰٫۹۲	۰٫۹۱	۰٫۹۱	۰٫۹۳	۰٫۹۳	۰٫۹۳
Na	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲
K	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰
نسبت های مولی														
Mg#	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۵	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۱	۰٫۹۰	۰٫۹۱	۰٫۹۳	۰٫۹۴	۰٫۹۴
En	۰٫۴۸	۰٫۴۸	۰٫۴۶	۰٫۴۸	۰٫۴۸	۰٫۴۴	۰٫۴۴	۰٫۴۴	۰٫۳۹	۰٫۳۹	۰٫۴۲	۰٫۴۳	۰٫۴۳	۰٫۴۳
Fs	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳
Wo	۰٫۵۱	۰٫۵۲	۰٫۵۲	۰٫۵۱	۰٫۵۱	۰٫۵۴	۰٫۵۳	۰٫۵۳	۰٫۵۲	۰٫۵۷	۰٫۵۷	۰٫۵۵	۰٫۵۴	۰٫۵۴

ادامه داده‌ها

SiO ₂	۵۱٫۳۷	۵۰٫۵۳	۵۰٫۳۲	۵۰٫۳۵	۵۰٫۷۵	۵۰٫۶۸	۴۸٫۸۳	۴۹٫۱۳	۴۸٫۶۶	۴۹٫۲۰	۵۰٫۷۱	۴۹٫۲۰	۴۸٫۷۱	۵۰٫۶۷
TiO ₂	۰٫۴۳	۰٫۴۹	۰٫۴۹	۰٫۴۷	۰٫۴۴	۰٫۴۷	۰٫۷۱	۰٫۷۲	۰٫۷۴	۰٫۶۵	۰٫۸۵	۰٫۶۷	۰٫۷۳	۰٫۴۸
Al ₂ O ₃	۲٫۵۴	۳٫۰۵	۳٫۳۶	۳٫۱۲	۳٫۱۵	۳٫۲۰	۴٫۴۶	۴٫۵۱	۴٫۵۱	۴٫۳۰	۴٫۱۴	۳٫۹۵	۴٫۶۷	۲٫۹۵
Cr ₂ O ₃	۰٫۱۵	۰٫۱۸	۰٫۱۶	۰٫۱۵	۰٫۱۵	۰٫۱۶	۰٫۱۶	۰٫۱۹	۰٫۱۶	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۱۵	۰٫۱۵	۰٫۱۵
Fe ₂ O ₃	۴٫۱۷	۴٫۷۸	۴٫۶۴	۴٫۹۰	۴٫۵۳	۴٫۴۰	۵٫۶۸	۵٫۴۶	۵٫۸۰	۶٫۷۳	۱۴٫۳۹	۳٫۰۴	۶٫۳۲	۴٫۲۵
FeO	۰٫۷۷	۰٫۴۱	۰٫۶۸	۰٫۴۵	۰٫۶۱	۰٫۹۶	۰٫۹۱	۱٫۱۲	۰٫۵۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۲٫۹۳	۰٫۳۰	۰٫۷۶
MnO	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۱۲	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۱۴	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۰٫۱۱
MgO	۱۶٫۴۸	۱۶٫۰۹	۱۵٫۸۶	۱۶٫۰۴	۱۶٫۱۴	۱۵٫۹۹	۱۴٫۷۷	۱۵٫۰۰	۱۵٫۰۲	۱۵٫۶۴	۱۰٫۳۳	۱۳٫۴۴	۱۴٫۹۹	۱۵٫۹۳
CaO	۲۳٫۹۷	۲۳٫۹۳	۲۳٫۸۶	۲۳٫۸۶	۲۳٫۸۴	۲۳٫۹۳	۲۳٫۷۳	۲۳٫۶۸	۲۳٫۸۶	۲۳٫۹۰	۱۸٫۱۳	۲۴٫۰۴	۲۳٫۸۸	۲۳٫۹۳
Na ₂ O	۰٫۱۸	۰٫۲۲	۰٫۲۲	۰٫۲۰	۰٫۲۳	۰٫۱۸	۰٫۲۷	۰٫۲۳	۰٫۲۰	۰٫۲۶	۰٫۳۶	۰٫۲۲	۰٫۲۴	۰٫۲۳
K ₂ O	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۱۴	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۹۹٫۷۲	۹۹٫۲۷	۹۹٫۱۶	۹۹٫۱۳	۹۹٫۴۶	۹۹٫۵۹	۹۹٫۴۹	۹۹٫۵۸	۹۸٫۹۶	۹۹٫۸۴	۹۱٫۵۰	۹۷٫۷۶	۹۹٫۴۹	۹۹٫۰۵
فرمول بر پایه ۶ اتم O														
Si	۱٫۸۸	۱٫۸۶	۱٫۸۵	۱٫۸۶	۱٫۸۶	۱٫۸۶	۱٫۸۰	۱٫۸۱	۱٫۸۰	۱٫۸۰	۱٫۵۸	۱٫۸۶	۱٫۸۰	۱٫۸۷
Ti	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱
Al(total)	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۱۴	۰٫۱۴	۰٫۲۱	۰٫۲۰	۰٫۲۰	۰٫۱۹	۰٫۲۵	۰٫۱۸	۰٫۲۰	۰٫۱۳
Al ^{IV}	۰٫۰۶	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۱۹	۰٫۲۱	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۱۳
Al ^{VI}	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۳
Cr	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ³⁺	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۱۶	۰٫۱۵	۰٫۱۶	۰٫۱۹	۰٫۵۶	۰٫۰۹	۰٫۱۸	۰٫۱۲
Fe ²⁺	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۲
Mn	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Mg	۰٫۹۰	۰٫۸۸	۰٫۸۷	۰٫۸۸	۰٫۸۸	۰٫۸۸	۰٫۸۱	۰٫۸۲	۰٫۸۳	۰٫۸۵	۰٫۷۹	۰٫۷۷	۰٫۸۲	۰٫۸۸
Ca	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۵	۰٫۹۴	۱٫۰۰	۰٫۹۷	۰٫۹۴	۰٫۹۵
Na	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲
K	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۱	۴٫۲۷	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰
نسبت های مولی														
Mg#	۰٫۹۷	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۶	۰٫۹۸	۱٫۰۱	۱٫۵۳	۰٫۸۹	۰٫۹۹	۰٫۹۷
En	۰٫۴۸	۰٫۴۸	۰٫۴۷	۰٫۴۸	۰٫۴۸	۰٫۴۷	۰٫۴۶	۰٫۴۶	۰٫۴۶	۰٫۴۸	۰٫۵۲	۰٫۴۲	۰٫۴۶	۰٫۴۷
Fs	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۵	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Wo	۰٫۵۰	۰٫۵۱	۰٫۵۱	۰٫۵۱	۰٫۵۱	۰٫۵۱	۰٫۵۳	۰٫۵۲	۰٫۵۳	۰٫۵۳	۰٫۶۶	۰٫۵۳	۰٫۵۳	۰٫۵۱

مقدار آب و گریزندگی اکسیژن طی تبلور ماگما می‌تواند مشخص کننده محیط زمین‌ساختی ماگما باشد، بطوریکه گریزندگی اکسیژن تاثیر ویژه‌ای در تغییر دمای میعان و ترکیب مذاب دارد [۱۷] و عامل موثری در کنترل فرایندهای ماگمایی، توالی تبلور و نوع کانی‌های تشکیل شده در ماگماست [۱۸]، [۱۹]. مقدار آهن سه‌ظرفیتی پیروکسن‌ها نیز تابعی از گریزندگی اکسیژن در محیط تشکیل آنهاست و این امر از نمودار تغییرات $AL^{IV} + Na$ نسبت به $AL^{VI} + 2Ti + Cr$ قابل ارزیابی است [۲۰]. این نمودار بر اساس موازنه آلومینیوم موجود در جایگاه چهاروجهی با آلومینیوم و کروم موجود در جایگاه هشت وجهی رسم شده است. در ترکیب پیروکسن‌ها، عنصر Fe می‌تواند جانشین عناصر سه ظرفیتی مانند عناصر Cr, Al, Ti در جایگاه هشت‌وجهی شود. بنابراین فراوانی Fe در پیروکسن‌ها بستگی به موازنه Al در جایگاه چهاروجهی و هشت‌وجهی ساختار پیروکسن دارد؛ هرچه مقدار Al چهاروجهی بیشتر باشد، امکان ورود عناصر سه ظرفیتی دیگر مانند Fe در جایگاه هشت وجهی بیشتر می‌شود. در نمودار تغییرات $AL^{IV} + Na$ نسبت به $AL^{VI} + 2Ti + Cr$ ، قرارگیری در بالا و یا زیر خط $Fe^{3+} = 0$ به ترتیب نشان‌دهنده زیاد و یا کم بودن گریزندگی اکسیژن در محیط تشکیل پیروکسن‌هاست. افزون بر این، هرچه فاصله نمونه از خط $Fe^{3+} = 0$ بیشتر باشد، گریزندگی اکسیژن محیط بیشتر است [۲۲، ۲۱]. با توجه به نمودار شکل ۶ الف، همه کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های بازالتی پیرانشهر در بالای خط $Fe^{3+} = 0$ قرار می‌گیرند که این بالا بودن گریزندگی اکسیژن در محیط تبلور را نشان می‌دهد.

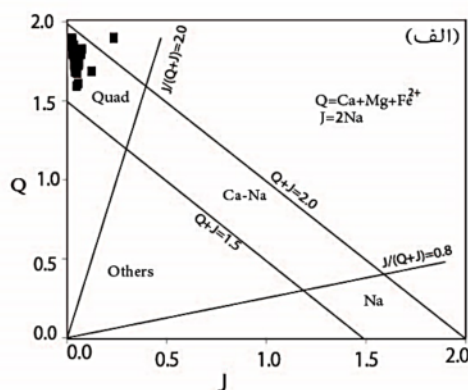


باتوجه به نمودار Q-J از مرجع [۱۲] (شکل ۴ الف)، پیروکسن‌ها به چهار گروه پیروکسن‌های Ca, Mg, Fe, پیروکسن‌های Ca, Na و پیروکسن‌های Na و سایر پیروکسن‌ها تقسیم شده‌اند. در این تقسیم بندی، مکان M1، M2 به عنوان مکان M در نظر گرفته شده است. ترکیب کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در نمودار Q-J در گستره کلینوپیروکسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن (شکل ۴ الف) قرار گرفته است [۱۳]. کلینوپیروکسن بازالت افیولیت پیرانشهر ترکیب دیوپسید ($En_{0.39-0.59}Fs_{0.01-0.05}Wo_{0.50-0.57}$) دارد. باتوجه به نمودار $Al_2O_3-TiO_2$ [۱۴] نمونه‌ها سری ماگمایی آهکی قلیایی نشان می‌دهند (شکل ۴ ب).

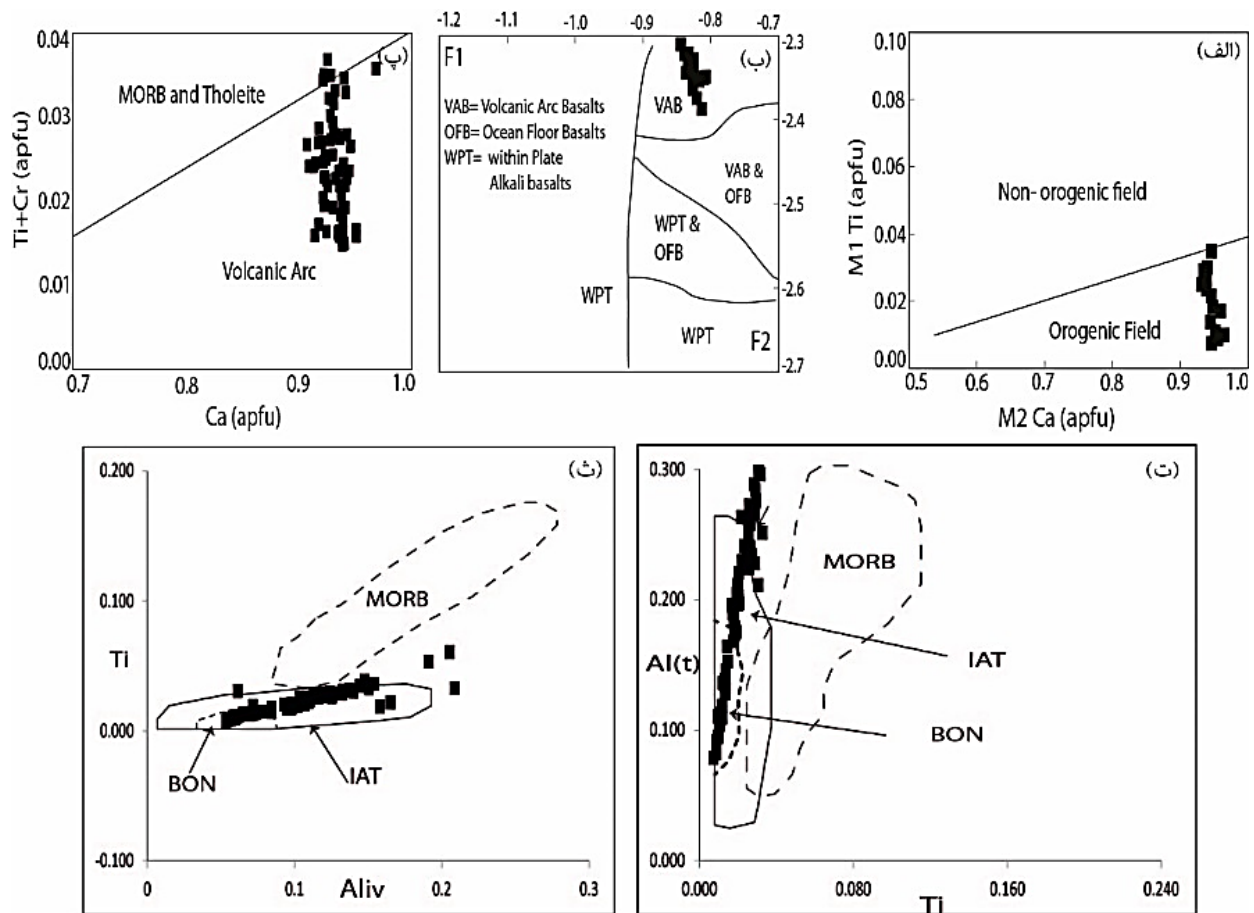
محیط زمین ساختی

برای تعیین محیط زمین ساختی بازالت‌های پیرانشهر از نمودارهای مختلف تفکیک محیط‌های زمین ساختی و مقایسه با بازالت‌های سایر مناطق افیولیتی دنیا استفاده شده است. در نمودار Ti نسبت به Ca [۱۴]، ترکیب کلینوپیروکسن‌های بررسی شده در گستره کوهزایی قرار گرفته است (شکل ۵ الف). در نمودارهای F1 نسبت به F2 [۱۵] و Ti+Cr نسبت به Ca [۱۴]، نمونه‌ها محیط زمین‌ساختی قوس را نشان داده‌اند (شکل‌های ۵ ب و پ).

ترکیب کلینوپیروکسن چند بازالت افیولیتی پشته میان اقیانوسی، تولثیت جزایر قوسی و بنونیتی در شکل ۵ [۱۶]، نشان داده شده است. در این نمودارها، ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن افیولیت پیرانشهر با جایگاه زمین ساختی فعالیت ماگمایی قوس بهترین همخوانی را نشان داده است (شکل‌های ۵ ت و ث).

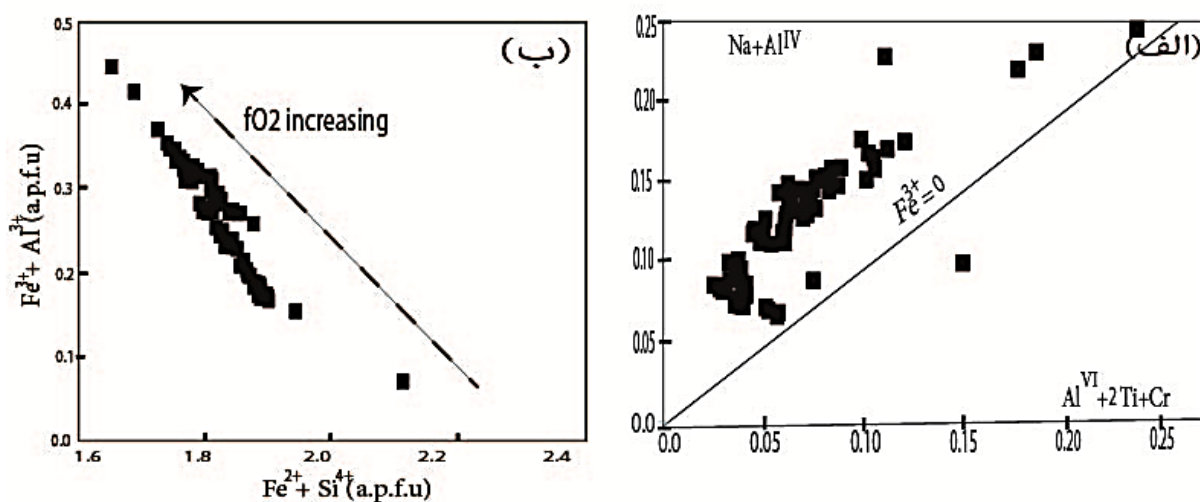


شکل ۴ الف) کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در نمودار Q-J در گستره پیروکسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن (Quad) قرار می‌گیرد [۱۲] و ب) نمودار SiO_2-K_2O [۱۳].



شکل ۵ ترکیب کلینوپیروکسن‌های موجود در سنگ‌های بازالتی پیرانشهر جهت تعیین محیط زمین ساختی. (الف) نمودار Ti نسبت به Ca [۱۴]، (ب) نمودار F1 نسبت به F2 [۱۵]، (پ) نمودار Ti+Cr نسبت به Ca [۱۴]، ت و (ث) نمودارهای تعیین محیط زمین ساختی بر اساس ترکیب کانی کلینوپیروکسن [۱۶]، IAT: تولیت جزایر قوسی، BON: بونینیت، MORB: بازالت پشته میان اقیانوسی).

$$F1 = -(0.012 \cdot SiO_2) - (0.0807 \cdot TiO_2) + (0.0026 \cdot Al_2O_3) - (0.0012 \cdot FeO) - (0.0026 \cdot MnO) + (0.0087 \cdot MgO) - (0.0128 \cdot CaO) - (0.0419 \cdot Na_2O), F2 = - (0.0469 \cdot SiO_2) - (0.0818 \cdot TiO_2) + (0.0212 \cdot Al_2O_3) - (0.0041 \cdot FeO) - (0.1435 \cdot MnO) + (0.0029 \cdot MgO) + (0.0085 \cdot CaO) + (0.016 \cdot Na_2O)$$



شکل ۶ (الف) نمودار $Na+Al^{IV}$ نسبت به $Al^{VI}+2Ti+Cr$ برای تعیین گریزندگی اکسایش در محیط تشکیل کلینوپیروکسن که شرایط اکسیدی در محیط تبلور این کانی‌ها را نشان می‌دهد [۱۹] و (ب) نمودار Fe^{2+}/Si^{4+} نسبت به Fe^{3+}/Al^{III} [۲۳].

مقدار نسبت Al/Ti ، متوسط تا بالا، ۶-۱۰، و تغییرات نسبت $Al_{[6]}/Al_{[4]}$ ، برابر با ۰/۷-۰/۱ است که نشان‌دهنده فشار پایین تبلور کلینوپیروکسن بازالت پیرانشهر است [۲۸]. کلینوپیروکسن بازالت پیرانشهر با داشتن $Mg\#$ برابر با ۰/۷۳۸ تا ۰/۹۸^۰ و مقادیر بسیار پایین Cr_2O_3 برابر با ۰/۱-۰/۳^۰ درصد وزنی و Na_2O برابر با ۰/۱-۰/۳ درصد وزنی از کلینوپیروکسن‌های فشار بالا با $Cr_2O_3 > 0.8 \text{ wt\%}$ ، $Mg\# > 0.95$ [۲۹] متفاوت است.

ویژگی‌های سنگ‌نگاری از جمله وجود درشت بلور غالب و فراوان کانی کلینوپیروکسن و تبلور پلاژیوکلاز بصورت ریز در خمیره نیز تایید کننده فشار پایین تبلور است، بطوریکه بصورت تجربی نشان داده شده است که در فشار پایین ۲ کیلو بار و شرایط ماگمایی آبدار، تبلور کانی‌های آهن-منیزیم‌دار (کلینوپیروکسن و هورنبلند) بر پلاژیوکلاز اولویت دارد [۳۰]. همچنین تشکیل درشت‌بلور هورنبلند شکل دار نیز تاییدی بر آبدار بودن ماگمای بازالتی است.

در نمودارهای شکل ۸، شیمی کلینوپیروکسن در بازالت-های مناطق مختلف افیولیتی پشته‌های میان اقیانوسی و ماگمایی قوس پهنه ابرفرورانشی [۳۱] نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن افیولیت پیرانشهر ویژگی‌های زمین شیمیایی مشابه با بازالت قوس افیولیت‌های ابرفرورانشی شرق مدیترانه مانند تروُدوس، ورینوس، پیندوس و عمان [۱۶] و همچنین ساریکارامان [۳۲] را نشان داده است (شکل‌های ۸ الف و ب).

نمودار $Fe^{2+} + Si^{4+}$ نسبت به $Fe^{3+} + Al^{IV}$ [۲۳]، نیز نشان می‌دهد که کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های بازالتی پیرانشهر در گریزندگی بالای اکسیژن متبلور شده‌اند. در نتیجه می‌توان گفت که گریزندگی بالای اکسیژن طی تشکیل کلینوپیروکسن تایید کننده محیط زمین‌ساختی ماگمایی قوس است.

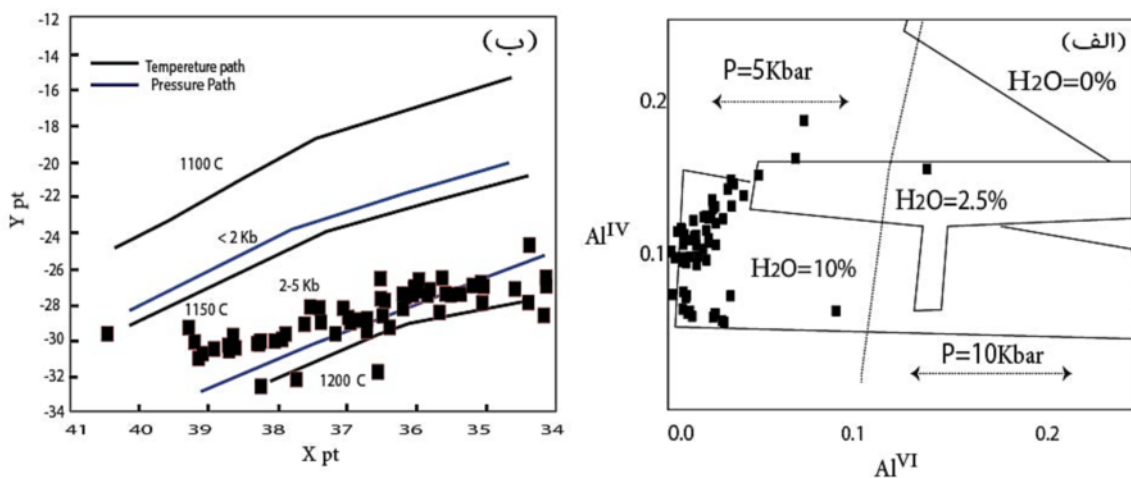
نمودار توزیع آلومینیوم در جایگاه چهاروجهی و هشت وجهی کلینوپیروکسن‌ها (شکل ۷ الف) نشان دهنده تبلور پیروکسن از یک ماگمای آبدار در فشار حدود ۵ کیلو بار است [۲۴]. باتوجه به نمودار شکل ۷ الف، در همه نمونه‌ها مقدار اتم‌های آلومینیوم هشت‌وجهی در ساختار پیروکسن کمتر از ۰/۱ است که نشانگر تبلور سنگ مورد بررسی در فشار حدود ۵ کیلو بار و مقدار آب ماگما ۱۰ درصد است.

ترکیب کلینوپیروکسن‌ها به تغییرات دما حساس است. دما و فشار تشکیل کلینوپیروکسن‌ها را بر اساس نمودار X_{pt} نسبت به Y_{pt} [۲۵] می‌توان بدست آورد (شکل ۷ ب) که مقادیر X_{pt} و Y_{pt} برپایه روابط زیر محاسبه شده است:

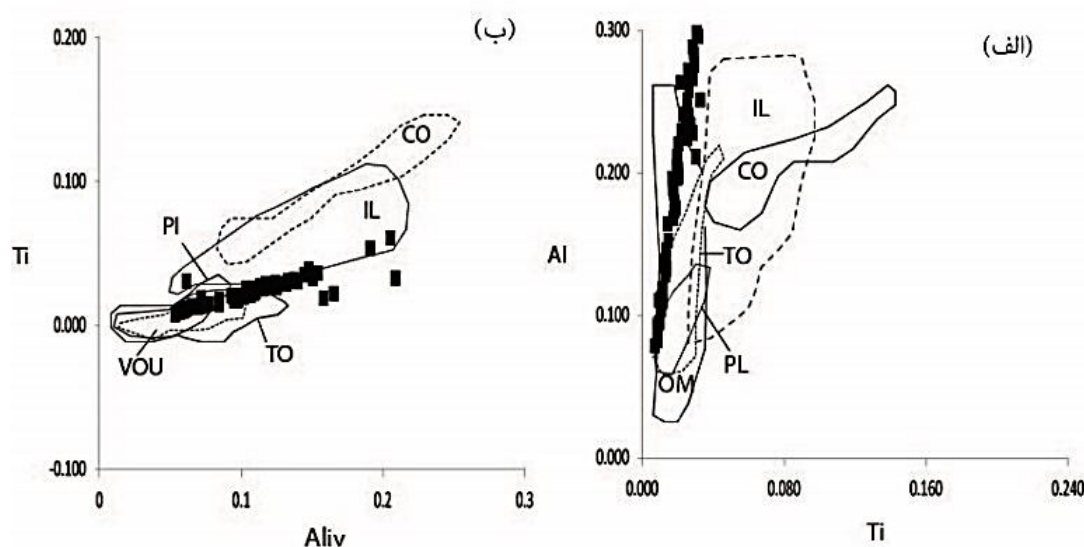
$$X_{pt} = 0.446 SiO_2 + 0.187 TiO_2 - 0.404 Al_2O_3 + 0.346 FeO(\text{total}) - 0.052 MnO + 0.309 MgO + 0.431 CaO - 0.446 Na_2O$$

$$Y_{pt} = -0.369 SiO_2 + 0.535 TiO_2 - 0.317 Al_2O_3 + 0.323 FeO(\text{total}) + 0.235 MnO - 0.516 MgO - 0.167 CaO - 0.153 Na_2O$$

براساس این روش، پیروکسن در دمای بین ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و فشار ۲-۵ کیلو بار تشکیل شده است. دمای بالای تبلور پیروکسن با دمای بالای زیر پوسته اقیانوسی در محیط قوس (بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد) متناسب است [۲۷، ۲۶].



شکل ۷ الف) نمودار توزیع آلومینیوم در جایگاه چهاروجهی و هشت وجهی [۲۴] و ب) نمودار تعیین دما و فشار براساس ترکیب کلینوپیروکسن [۲۵].



شکل ۸. الف و ب) نمودارهای مقایسه ترکیب کلینوپیروکسن‌های افیولیت پیرانشهر با سایر افیولیت‌های بررسی شده در دنیا (OM: عمان، IL: لیگوریای، CO: کورسیکا، VOU: ورینوس، TO: تروروس، PI: پیندوس [۱۶].

بازالت‌های افیولیت پیرانشهر داشتن مقدار Ti کم و Mg بالا است که این نشاندهنده تبلور کلینوپیروکسن از ماگمای فقیر از Ti است. پس احتمالاً مذاب اولیه از ذوب‌بخشی گوشته بالایی تهی شده در حضور آب تشکیل شده است. گفتنی است که آب ماگما برآمده از آزدایی تختال فرورانشی است که منجر به کاهش دمای ذوب پریدوتیت و افزایش نرخ ذوب و تولید ماگمای آهکی-قلیایی می‌شود [۳۵، ۳۶].

بررسی شیمی سنگ کل [۳۷، ۱۱] و شیمی کانی‌های اسپینل و الیوین [۳۸] موجود در پریدوتیت‌های گوشته‌ای افیولیت پیرانشهر نشان داده است که پریدوتیت‌های دونیتی منطقه در اثر ذوب‌بخشی درجه بالا در موقعیت پیش قوس و پریدوتیت‌های هارزبورژیته در موقعیت پشته میان اقیانوسی تشکیل شده است. وجود دو نوع پریدوتیت گوشته‌ای با موقعیت پشته میان اقیانوسی و قوس تایید کننده محیط ساختاری ابرفرورانشی مجموعه افیولیتی پیرانشهر است [۱۱]. بنابراین، نتایج زمین شیمی بازالت افیولیت پیرانشهر (ماگمایی قوس پهنه ابرفرورانشی) با نتایج زمین شیمی پریدوتیت‌های افیولیت پیرانشهر (افیولیت پهنه ابرفرورانشی) همخوانی دارد.

تفاوت در مقدار عنصر Ti در ترکیب کلینوپیروکسن بازالت‌های مناطق مختلف افیولیتی برای تشخیص جایگاه ساختاری ماگماهای کف اقیانوسی بسیار مناسب است [۱۶]. بطوریکه مقدار بالای عنصر Ti در ماگمای مناطق پشته‌های میان اقیانوسی، مقدار کم و مقدار بسیار کم عنصر Ti به ترتیب در ماگمایی ابرفرورانشی و ماگمای بنونیتی ابرفرورانشی دیده شده است [۱۶]. مقدار کم عنصر Ti در ترکیب کلینوپیروکسن‌ها درجه تهی شدگی خاستگاه گوشته‌ای را نشان می‌دهد. برای تشکیل مذاب با Ti کم و مقدار Mg بالا باید در گوشته تهی شده که چندین بار ذوب در حضور آب و با نرخ ذوب بخشی ۲۰-۳۰ درصد را تجربه کرده است دوباره ذوب صورت گیرد [۳۳، ۳۴]. بررسی‌ها نشان داده است که پریدوتیت‌های نازا (مقاوم در برابر ذوب) در زیر پوسته‌های اقیانوسی مناطق بازشونده اقیانوسی تشکیل می‌شوند که چنین پریدوتیت‌های تهی شده فقط در شرایط ذوب‌بخشی آبدار می‌توانند مذاب‌هایی با مشخصه Mg بالا و Ti پایین را تولید کنند و این شرایط در بیشتر مناطق افیولیتی ابرفرورانشی وجود دارد [۳۵، ۳۶].

ویژگی زمین شیمیایی کلینوپیروکسن بازالت‌های افیولیت ابرفرورانشی در مناطق بررسی شده [۱۶-۳۲] و کلینوپیروکسن

برداشت

بر اساس شیمی کانی، نوع کلینوپیروکسن سنگ‌های بازالتی افیولیت پیرانشهر دیوپسید با ویژگی زمین شیمی مقدار Ti پایین، Mg بالا و آهنی-قلیایی است.

مقدار اتم Al هشت وجهی در ساختار پیروکسن، مقدار آب ماگما طی تبلور را ۱۰ درصد و فشار هنگام تبلور را ۵ کیلوبار مشخص کرده است. مقدار متوسط تا بالای نسبت Al/Ti و تغییرات نسبت $Al_{[6]}/Al_{[4]}$ تایید کننده فشار پایین تبلور کلینوپیروکسن بازالت پیرانشهر است. مقدار آهن سه‌ظرفیتی پیروکسن نیز گریزندگی بالای اکسیژن طی تبلور سنگ را نشان داده است. نمودارهای تعیین سری ماگمایی و محیط زمین ساختی و مقایسه ترکیب پیروکسن بازالت افیولیتی پیرانشهر با سایر پیروکسن‌های بازالت‌های افیولیتی نشان می‌دهد که کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی همخوانی خوبی با محیط زمین‌ساختی ماگمایی قوس پهنه ابرفرورانشی دارند. پریدوتیت-های گوشته‌ای افیولیت پیرانشهر نیز محیط زمین‌ساختی ابرفرورانشی نشان داده‌اند که تاییدی بر فعالیت ماگمایی قوس ابرفرورانشی در این منطقه است.

مراجع

- Kedougou inlier, Senegal, West Africa", *European Journal of Mineralogy* 21(2009) 1029-1043.
- [4] Putirka K.D., Mikaelian H., Ryerson F., Shaw H., "New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic evolved and volatile bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and Snake River Plain, Idaho", *American Mineralogist* 88(2003) 1542-1554.
- [5] Putirka K.D., "Thermometers and Barometers for Volcanic Systems", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 69 (2008) 61-120.
- [6] Kushiro I., "Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks", *American Journal of Science* 258 (1960) 548-554.
- [7] Coombs D.S., "Trends and affinities of basaltic magmas and pyroxenes as illustrated on the diopside-olivine-silica diagram", *Mineralogical Society of American Special Papers* 1(1962) 227-250.
- [8] Stocklin J., "Structures history and tectonic of Iran" A review, *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 52 (1968) 1229-1258.
- [9] Alavi M., "Tectonic map of the Middle East, scale: 1:5,000,000. Tehran, Iran", *Geological Survey of Iran one sheet* (1991).
- [10] Khodabandeh A.A., Soltani G.A., "Naghadeh geological quadrangle map", scale 1:100000, *Geological Survey of Iran, Tehran* (2004) 1 sheet.
- [11] Hajjialioghli R., Moazzen M., "Supra-subduction and mid-ocean ridge peridotites from the Piranshahr area, NW Iran", *Journal of Geodynamics* 81 (2014) 41-55.
- [12] Morimoto N., Kitamura M., "Q-J diagram for classification of pyroxenes", *Journal of the Japanese Association of Mineralogy Petrology and Economic Geology* (1983) 78-141.
- [13] Le Bas M.J., "The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage", *American Journal of Science* 260 (1962) 167-88.
- [14] Leterrier J., Maury R.C., Thonon P., Girard D., Marchel M., "Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities
- [1] Dilek Y., Furnes H., "Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere", *Geological Society of America Bulletin* 123 (2011) 387-411.
- [2] Berger J., Femenias O., Mercier J.C.C., Demaiffe D., "Ocean-floor hydrothermal metamorphism in the Limousin ophiolites (western French Massif Central): evidence of a rare preserved Variscan oceanic marker", *Journal of Metamorphic Geology* 23 (2005) 795- 812.
- [3] Dìoh E., Bézìat D., Grégoire M., Debat P., "Origin of rare earth element variations in clinopyroxene from plutonic and associated volcanic rocks from the Foulde basin, Northern

- Melt Compositions*", Journal of Petrology 17 (1976) 139-193.
- [25] Soesoo A., *A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallisation P-T estimations*, Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen) 119 (1997) 55-60.
- [26] Blackwell D.D., Bowen R.G., Hull D.A., Riccio J., Steele J.L., *"Heat flow, arc volcanism and subduction in northern Oregon"* Journal Geophysical Research 87 (1982) 8735-8754.
- [27] Zhao D., Hasegawa A., Horiuchi S., *"Tomographic imaging of p and S wave velocity structure beneath northeastern Japan"* Journal Geophysical Research 97 (1992) 19909-19928.
- [28] Aoki K. and Shiba I., *"Pyroxene from Iherzolite inclusions of Itinomegata"*, Japan, Lithos 6 (1973) 41-51.
- [29] Simonetti A., Shore M., Bell K., *"Diopside phenocrysts from nephelinite lavas, Napak Volcano, Eastern Uganda Evidence for magma mixing"*, The Canadian Mineralogist 34 (1996) 411-421.
- [30] Sisson T.W., Grove T.L., *"Experimental investigations of the role of H₂O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 113 (1993a) 143-166.
- [31] Pearce J.A., Lippard S.J., Roberts S., *"Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. In: Kokelaar, B. P. & Howells, M. F. (eds.): Marginal Basin Geology"*, Geological Society, London, Special Publications 16 (1984) 77-94.
- [32] Yaliniz K.M., Concoğlu C.M., *"Clinopyroxene composition of the isotropic gabbros from the Sarikaman ophiolite: New evidence on suprasubduction zone type magma genesis in Central Anatolia"*, Journal Turkish Earth Science 8 (1999) 103-111.
- [33] Van der Lann S.R., Arculus R.L., Pearce J.A., Murton B.J., *"Petrography, mineral chemistry and phase relations of the basement boninite series of the paleo-volcanic series"*, Earth and Planetary Science Letters 59 (1982) 139-154.
- [15] Nisbet E., Pearce J., *"Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 63 (1977) 149-160.
- [16] Beccaluva L., Macciotto G., Piccardo G.B. and Zeda O., *"Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator"*, Chemical Geology journal 77 (1989) 165-182.
- [17] France L., Ildefonse B., Koepke J., Bech F., *"A new method to estimate the oxidation state of basaltic series from microprobe analyses"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 189 (2010) 340-346.
- [18] Botcharnikov R.E., Koepke J., Holtz, F., McCammon C., Wilke M., *"The effect of water activity on the oxidation and structural state of Fe in a ferro-basaltic melt"*, Geochimistry Cosmochimistry Acta 69 (2005) 5071-5085.
- [19] Moretti R., *"Polymerisation, basicity, oxidation state and their role in ionic modelling of silicate melts"* Annals of Geophysics (2005).
- [20] Schweitzer E., Papike J., Bence A., *"Statistical Analysis of Clinopyroxenes from Deep-Sea Basalts"*, American Mineralogist 64 (1979) 501-513.
- [21] Marcelot G., Maury R.C., Lefevre C., *"Mineralogy of Erromango Lava New Hebrides: Evidence of an early stage of fractionation in island arc basalts"*, Lithos, 16 (1983) 135-151.
- [22] Cameron M., Papike J.J., *"structural and chemical variations in pyroxenes"*, American minerals 66 (1981) 1-50.
- [23] Vieten K., *"The minerals of the volcanic rock association of the Siebengebirge, 1. Clinopyroxenes, and 2. Variation of chemical composition of Ca-rich clinopyroxenes (salites) in the course of crystallization"*, Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen, 140 (1980) 54-88.
- [24] Helz R.T., *"Phase Relations of Basalts in Their Melting Ranges at P H₂O = 5 kbar. Part II.*

- [37] Yazdani M., "*Study of field occurrence and petrology of igneous rocks related to ophiolite complex in Northwest Piranshahr-NW Iran (in Persian)* ", University of Tabriz, PhD Thesis (2014).
- [38] Yazdani M., Jahangiri A., Moazzen M., Hajialioghli R., Ahangari M., "*Investigations on olivine and spinel mineral chemistry and tectonic setting of peridotites from North West of Piranshahr Ophiolite, NW Iran (in Persian)*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 22 (2014) 557-570
- site 786, Izu-Bonin forearc", Ocean Drilling Program, Journal of Scientific Research 125 (1992) 171-201.
- [34] Bebard J.H., "*Cumulate recycling and crustal evolution in the Bay of Island ophiolite*", Journal Geology 99 (1991) 225-249.
- [35] Pearce J.A., "*Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries*", In: Thorpe, R.S. (Ed.), Andesites, Wiley and Sons, New York (1982) 525-548.
- [36] Vannucci R., Rampone E., Piccardo G.B., Ottolini L., Bottazzi P., "*Ophiolitic magmatism in the Ligurian Tethys: an ion microprobe study of basaltic clinopyroxenes*", Contributions to Mineralogy and Petrology 115 (1993) 123-137.