

شیمی کانی‌ها و زمین دما-فشارسنگی سنگ‌های بازالتی متاع (جنوب کرمان): شاخص نوع ماقما و جایگاه زمین‌ساختی

زهرا بدرازده*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۹۹/۳/۱۷، نسخه نهایی: ۹۹/۷/۳)

چکیده: سنگ‌های آتشفسنگی بازالتی با ساخت بالشی در دورترین بخش جنوب‌شرقی پهنه سندج-سیرجان رخنمون دارند. این سنگ‌ها وابسته به توالی آتشفسنگی-رسوبی ژوراسیک‌پیشین با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق تا شمالی-جنوبی هستند. در این پژوهش، شیمی بلورهای کلینوپیروکسن و پلازیوکلاز برای شناسایی شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل ماقما و محیط زمین‌ساختی قدیمی آن‌ها بررسی شد. بازالت‌های مورد بررسی بافت پورفیری دارند. کلینوپیروکسن و پلازیوکلاز کانی‌های درشت‌بلور هستند که در زمینه دانه‌ریز با بافت بین دانه‌ای تا اینترسرتال قرار دارند. نتایج تجزیه نقطه‌ای نشان داد که بلورهای پلازیوکلاز غنی از کلسیم هستند و ترکیب بیتونیتی دارند و پیروکسن‌ها از نوع اوژیت هستند. نتایج عنصر سنگی پیروکسن‌ها از جمله مقدار بالای Al و مقدار پایین Ti و Fe³⁺. نقش اصلی مولفه چرمک بویزه مولفه CaAlAlSiO₆ و نقش ناچیز مولفه اکمیت (NaFe³⁺Si₂O₆) را در ترکیب آن‌ها نشان می‌دهد. مقدار پایین TiO₂ و Na₂O و مقدار بالای SiO₂ بیانگر ماهیت تولئیتی آن‌هاست. برپایه دما فشارسنگی، دمای تبلور درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن حدود ۱۲۰۰–۱۲۵۰°C و فشار تبلور آن‌ها حدود ۵–۶ کیلوبار است که با عمق تبلور ۱۵ تا ۱۸ کیلومتری همخوانی دارد. درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن مورد بررسی ویژگی‌های زمین شیمیایی مشابه با پیروکسن موجود در بازالت‌های حوضه پشت‌قوس را دارند.

واژه‌های کلیدی: کلینوپیروکسن؛ زمین دما-فشارسنگی؛ بازالت؛ جایگاه زمین‌ساختی؛ متاع؛ کرمان.

مقدمه

و بهطور کلی به عنوان شاخص سنگ‌زایی مهم در بررسی تکامل ترکیبی ماقماها، فرایندهای ماقمایی در سامانه‌های باز [۱۳-۱۶].

سنگ‌های بازالتی بالشی در جنوب کرمان (جنوب‌غرب سبزواران) و شمال روستای متاع در دورترین بخش جنوبی پهنه سندج-سیرجان رخنمون دارند. این سنگ‌ها وابسته به توالی آتشفسنگی-رسوبی ژوراسیک‌پیشین در جنوبی‌ترین بخش از پهنه سندج-سیرجان جنوبی و شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی از جمله سنگ‌آهک‌توفی، توف‌آهکی و سنگ‌آهک به همراه سنگ‌های آذرآواری فلسفی و سنگ‌های

کلینوپیروکسن یکی از مهمترین کانی‌های مافیک در سنگ‌های آتشفسنگی است که به دلیل پایداری در گستره دمایی وسیع، فشار و ترکیب‌شیمیایی و همچنین حساسیت به شرایط تبلور ماقما، در بررسی فرایندهای ماقمایی نقش مهمی دارد [۶-۱۱]. ترکیب شیمیایی درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن در تعادل با سنگ میزان به تغییر پارامترهای بحرانی مانند دما، فشار، فعالیت آب و گریزندگی اکسیژن حساس است، از این تغییرات می‌توان برای تعیین سری‌های ماقمایی [۷، ۸]، جایگاه زمین ساختی [۱۰-۹، ۸]، دما و فشار تبلور ماقمایهای بازالتی [۱۲]

سیرجان واقع هستند. این توالی با همبُری زمین ساختی و یا با قاعده کنگلومراپی و با دگرشیبی زاویه‌ای بسیار مشخص بر مجموعه‌های دگرگونی پالئوزوئیک قرار دارد [۲۱]. این توالی آتشفشاری-رسوبی در منطقه مورد بررسی با ته‌نشست تناوب به نسبت ضخیمی از سنگ‌های آذرآواری فلسی، سنگ‌آهک‌توفی، توف‌آهکی و سنگ‌آهک آغاز می‌شود (شکل ۱). بخش عمده این واحد را نهشته‌های توف‌آهکی و آهک‌توفی تشکیل می‌دهند. استوکها و دایک‌های با ترکیب گابرو‌دیوریتی تا گرانوودیوریتی با سن احتمالی ژوراسیک میانی تا پسین [۲۱] در این واحد نفوذ کردند. به سمت بالای توالی، سنگ‌های رسوبی به تدریج حذف شده و توالی با تناوبی از سنگ‌های آذرآواری و سنگ‌های آتشفشاری بازی ادامه می‌یابد. به سمت بالا، به تدریج سنگ‌های آذرآواری ناپدید شده و توالی با تشکیل بازالت‌های با ساخت بالشی مشخص می‌شود که مهم‌ترین واحد سنگی توالی را با ضخامت حدود ۱/۵ تا ۲ کیلومتر تشکیل داده‌اند (شکل ۱). بازالت‌های بالشی از نظر ریخت شناسی بخش‌های مرتفع این توالی بوده و به رنگ تیره تا سبزتیره هستند (شکل ۲ الف و ب). بالش‌های بازالتی اغلب دارای یک پوسته شیشه‌ای با ضخامت متغیر از ۲ تا ۵ سانتی‌متر و بیشتر هستند که این پوسته‌ها بیشتر شکسته شده و در نتیجه واکنش سریع آن‌ها با آب دریا بین بالش‌ها اپیدوت و کلریت تشکیل شده است. بازالت‌های بالشی به نوبت با واحد توف اسیدی به رنگ سبزروشن تا خاکستری پوشیده می‌شوند. کنگلومرا چندزادی به طور هم‌شیب و بدون گستگی رسوبی بر واحد توف اسیدی قرار می‌گیرد. این کنگلومرا با ضخامت حدود ۵۰ متر شامل قطعه‌های چندزادی مختلف بوده که بیشتر از قطعه‌های سنگی توف، بازالت و گرانیت تشکیل شده است.

رسوب‌های نوع فیلیش که شامل ردیف ضخیم از رسوب‌های ماسه‌سنگی، ماسه‌سنگ‌آهکی، لای سنگ، شیل و کمی میان‌لایه‌های آهکی به سمت بالای توالی هستند، بر واحد کنگلومرا ته‌نشست یافته‌اند. رسوب‌های نوع فیلیش با آهک‌های کالپیون‌دار به سن ژوراسیک پسین-نئوکومین [۲۲] به صورت دگرشیب پوشیده می‌شوند (شکل ۱). دایک‌های متعدد تأخیری با لبه زود سرد شده و با ترکیب بیشتر دیابازی و کوارتزدیوریتی

آتشفشاری بازالتی با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق هستند [۱۷]. سنگ‌های بازالتی بافت پورفیری دارند و در بردارنده درشت‌بلورهای پلازیوکلاز و کلینوپیروکسن هستند. این بازالت‌ها اولیه نیستند و ماهیت جدایش یافته دارند [۱۸]. بازالت‌های مورد بررسی براساس داده‌های عناصر اصلی و نسبت‌های عناصر کمیاب مانند Y/Nb و Zr/Y ویژگی نیمه قلیایی با ماهیت تولثیتی دارند و الیوین‌هنجری هستند. به باور بدرزاده [۱۸]، این سنگ‌ها ویژگی‌های زمین‌شیمیایی بین بازالت‌های پشت‌همیان‌اقیانوسی نوع مورب عادی (N-MORB) و تولثیت‌های جزایر قوسی را دارند، به‌طوری که مشابه با N-MORB، از عناصر خاکی نادر سبک (LREE) نسبت به عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) تهی شده هستند و از طرف دیگر مشابه با مگماهای ایجادشده در پهنه‌های فروزانش، ویژگی غنی شده از عناصر سنگ دوست بزرگ یون (LILE) و تهی شده از عناصر با شدت میدان بالا (HFSE؛ به ویژه Nb و Ta) نسبت به مورب نشان می‌دهند. البته، این تهی شدگی و غنی شدگی‌ها به مقادیر مربوط به بازالت‌های کمان نمی‌رسد.

توده گرانیت‌توئیدی سیاه‌کوه در فاصله حدود ۵۰ کیلومتری غرب بازالت‌های مورد بررسی قرار دارد. با توجه به جایگزینی وابسته به کمان گرانیت‌توئیدهای آهکی-قلیایی سیاه‌کوه [۱۹] در پهنه سنندج-سیرجان جنوبی و بر اساس ویژگی‌های زمین‌شیمیایی این بازالت‌ها، نتیجه گرفته‌اند که سنگ‌های بازالتی منطقه متاع به احتمال بسیار در مراحل اولیه بازشدگی حوضه پشت‌قوس قاره‌ای کمان‌ماگماهای پهنه سنندج-سیرجان جنوبی در اوایل مزو佐ئیک تشکیل شده‌اند [۲۰، ۱۸].

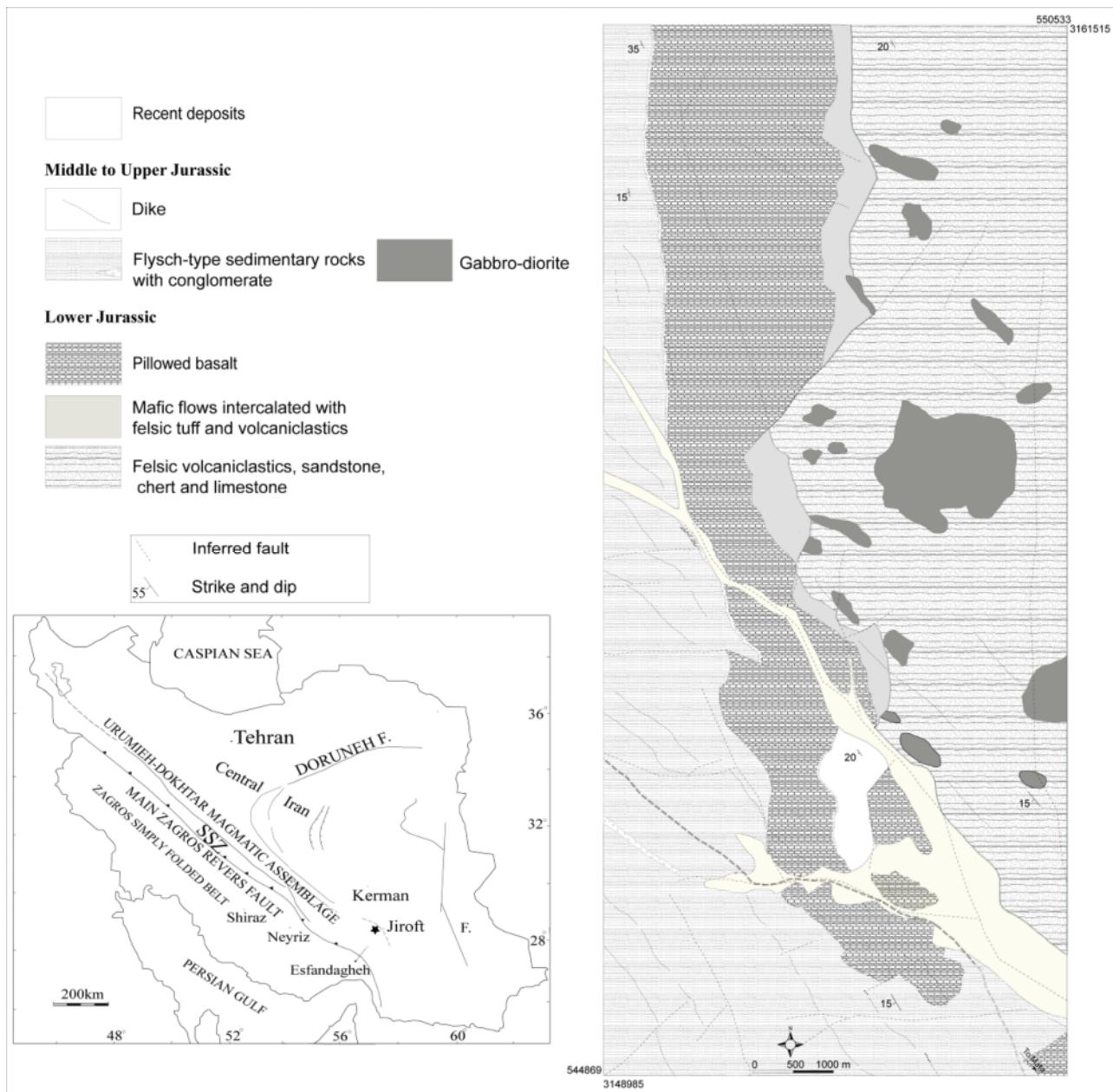
از آنجا که تاکنون بلورشیمی سنگ‌های بازالتی متاع بررسی نشده است، در این پژوهش از ترکیب شیمی درشت‌بلورهای پلازیوکلاز و کلینوپیروکسن برای بررسی شرایط دما و فشار تبلور مگماهای بازالتی استفاده شد و نیز جایگاه زمین ساختی سنگ‌های بازالتی بر پایه‌ی ترکیب شیمیایی بلورهای کلینوپیروکسن شناسایی گردید.

جایگاه زمین شناسی

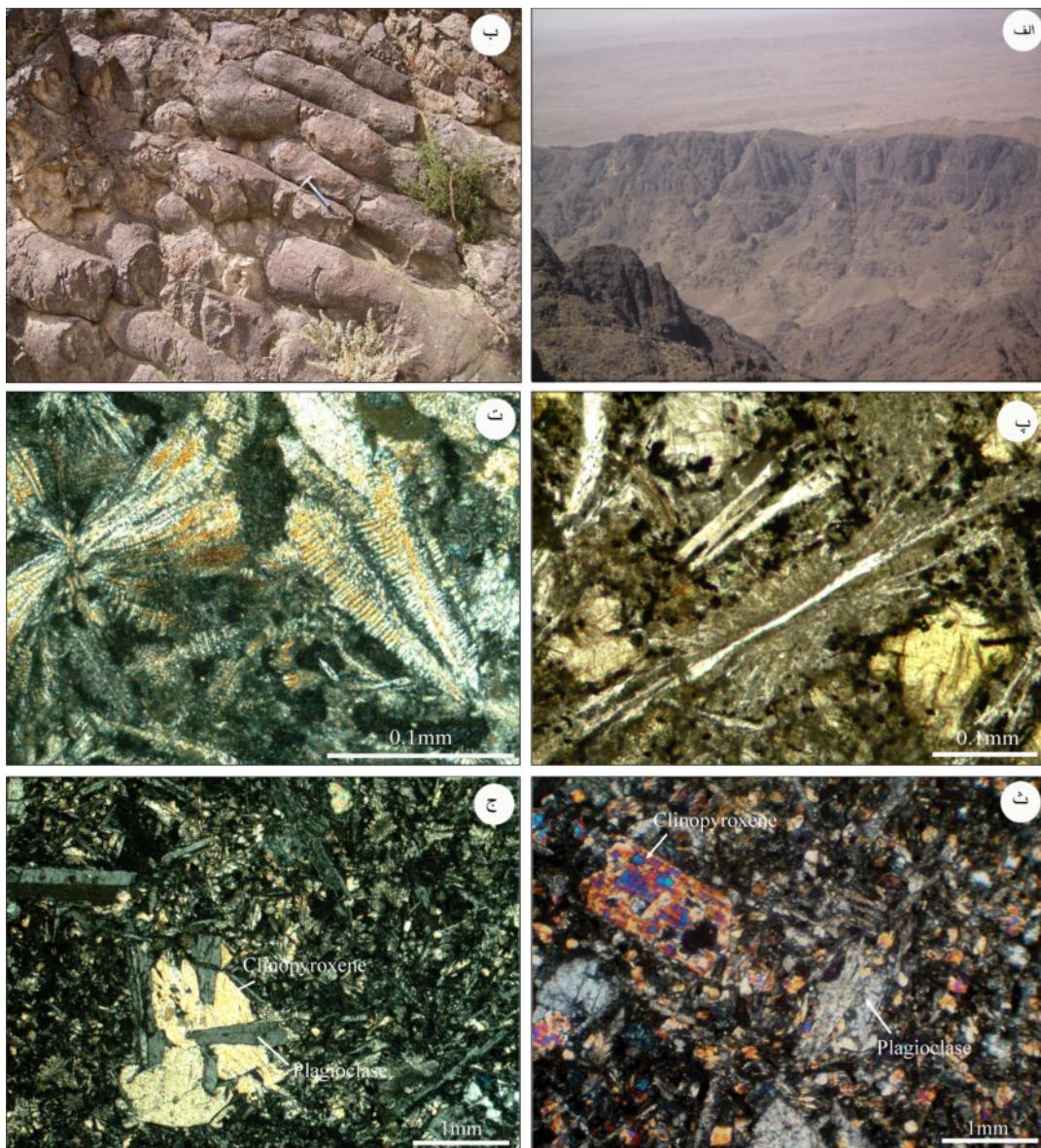
سنگ‌های بازالتی منطقه متاع وابسته به توالی آتشفشاری-رسوبی ژوراسیک پیشین در جنوبی ترین بخش پهنه سنندج-

رخداد سنگ‌های آهکی و آهک‌توفی در قاعده مجموعه آتشفسانی-رسوبی ژوراسیک پیشین، تناب سنتگ‌های آذرآواری و آتشفسانی اسیدی و بازی و تنهشست بازالت‌های با ساخت بالشی نشان‌دهنده تشکیل این مجموعه در یک حوضه زیردریایی است.

مجموعه سنگ‌های آتشفسانی-رسوبی و نیز رسوب‌های نوع فیلیش را مورد هجوم قرار داده‌اند. با توجه به بررسی‌های صحرایی و سنگ‌شناسی، ویژگی مهم توالی آتشفسانی-رسوبی فعالیت آتشفسانی و دوگانه آن است که با حضور سنگ‌های آتشفسانی با ترکیب اسیدی و بازی و نبود سنگ‌های آتشفسانی با ترکیب حدواسط مشخص می‌شود.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه متاع [۱۷]. موقعیت منطقه مورد بررسی (ستاره مشکی) در پهنه ساختاری سندگ-سیرجان (شکل سمت چپ) نشان داده شده است.



شکل ۲ تصاویر صحرایی و میکروسکوپی سنگ‌های بازالتی مورد بررسی: (الف و ب) نمای دور و نزدیک از سنگ‌های بازالتی بالشی منطقه، پ و ت) بافت‌های اکسیولیتیک و پرمانند کلینوپیروکسن و بافت دمپرسیوکسن در بلورهای پلازیوکلاز ناشی از انجماد سریع گدازه، (ث) درشت‌بلورهای پلازیوکلاز و کلینوپیروکسن در زمینه بین دانه‌ای تا اینترستکال و (ج) بافت نیمه پوست ماری درشت‌بلورهای پلازیوکلاز و کلینوپیروکسن (همه تصاویر میکروسکوپی در نور قطبیده متقاطع XPL، گرفته شده‌اند، به جز تصویر پ که در نور قطبیده صفحه‌ای PPL ثبت شده است).

دانشگاه بارسلونا (اسپانیا) انجام شد. برای واسنجی دستگاه از ارتوکلاز (Ca, Al, K), روتیل (Si, Ti), والستونیت (Mg, Na), هماتیت (Fe, Mn) و فرسترتیت (Cr₂O₃) به عنوان کانی‌های استاندارد اولیه استفاده شد. نسبت‌های مولکولی پلازیوکلاز براساس ۳۲ اتم اکسیژن و نسبت‌های مولکولی کلینوپیروکسن براساس ۶ اتم اکسیژن محاسبه شدند.

روش بررسی

پس از بازدیدهای صحرایی و برداشت نمونه‌های به نسبت سالم، ۱۴۷ مقطع نازک برای بررسی‌های میکروسکوپی تهیه گردید. ۳ نمونه از بخش‌های مرکزی بالش‌ها برای بررسی‌های ریز-پردازشی انتخاب شد. تجزیه شیمی کانی‌ها برای مقاطع نازک-صیقلی پوشیده شده با کربن با استفاده از دستگاه ریزپردازشگر الکترونی Cameca SX 50 در شرایط 20kV و 15-20 nA در

درشت‌بلور و ویژگی‌های سنگ‌نگاری این سنگ‌ها نشان‌دهنده تبلور کلینوپیروکسن و پلازیوکلاز به عنوان فازهای مذاب و نزدیک به مذاب در آن هاست. درشت‌بلورها اغلب شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با ابعاد تا ۳ میلی‌متر هستند. دگرسانی بخشی کانی‌های کلینوپیروکسن و پلازیوکلاز به کانی‌های اپیدوت، کلریت و سریسیت صورت گرفته است و آمیگال‌ها با کانی‌های کلسیت و کلریت پر شده‌اند.

بلور شیمی

نتایج تجزیه ریز پردازشی بلورهای کلینوپیروکسن و پلازیوکلاز در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. بر این اساس، درشت‌بلورهای پلازیوکلاز از نوع بیتونیت هستند و ترکیب آنها از $\text{An}_{75}\text{Ab}_{25}$ تا $\text{An}_{85}\text{Ab}_{15}$ متغیر است (شکل ۳). مقدار K از Na_{15}O تا $\text{Na}_{17.66}$ و مقدار CaO این کانی‌ها بین ۰/۲۹ و ۰/۷۰ درصد وزنی متغیر است.

سنگ‌نگاری

سنگ‌های بازالتی بالشی با بافت ریزپورفیری و بادامی در صحراء مشخص می‌شوند. بخش‌های لبه‌ای بالش‌های بازالتی بیانگر سردشده‌گی سریع گدازه بازالتی دما بالا هستند که در آن‌ها بافت‌های دم‌پرستویی، اکسیولیتیک و پرمانند شکل گرفته است (شکل ۲ پ و ت). این در حالی است که بخش‌های درونی بالش‌های بازالتی دانه‌درشت‌تر و شامل درشت‌بلورهای پلازیوکلاز و کلینوپیروکسن هستند که در زمینه بین دانه‌ای تا اینترستالت در بردارنده پلازیوکلاز+کلینوپیروکسن و کانی‌های فرعی شامل اکسیدهای آهن-تیتان، آپاتیت و زمینه‌ی شیشه‌ای کلریتی شده قرار دارند (شکل ۲ ث). بلورهای پلازیوکلاز تیغه‌ای شکل هستند و به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار با ماکل چند ریخت رخ داده‌اند. مقدار مودال پلازیوکلاز در این سنگ‌ها به ۵۰٪ می‌رسد. کانی‌های کلینوپیروکسن به دو صورت درشت‌بلور و در زمینه رخ داده‌اند. بافت گلومروپورفیری درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن با پلازیوکلاز و نیز بافت نیمه پوست ماری در آن‌ها معمول است (شکل ۲ ج). مجموعه‌های

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی پلازیوکلازهای سنگ‌های بازالتی متاع بر حسب درصد وزنی.

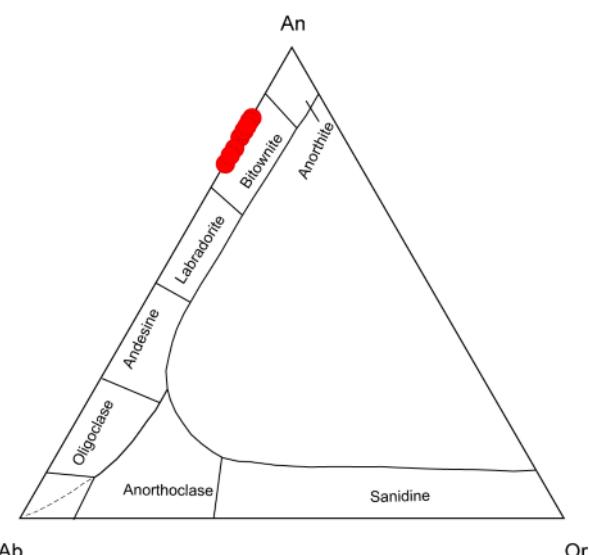
Thin section Spot number	۱۷GH-				۳۶GH-				۴۵GH-	
	۷#	۸#	۹#	۱۰#	۱۴#	۱۵#	۲#	۶#	۵#	۱۰#
Location	rim	rim	core	core	core	core	rim	core	rim	rim
SiO _۴	۴۸.۹۰	۴۸.۵۲	۴۶.۹۹	۴۷.۰۹	۴۶.۱۹	۴۶.۸۲	۴۷.۴۸	۴۶.۱۵	۴۹.۱۸	۴۹.۰۲
TiO _۴	۰.۰۶	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۱	۰.۰۵	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۵	۰.۰۵
Al _۲ O _۳	۳۲.۶۲	۳۳.۱۱	۳۴.۲۰	۳۳.۳۱	۳۴.۸۹	۳۴.۲۹	۳۴.۰۹	۳۴.۹۹	۳۲.۵۰	۳۲.۹۹
FeO	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۰۳
MgO	۰.۰۳	۰.۰۹	۰.۰۳	۰.۱۸	۰.۱۲	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۲۴	۰.۱۵	۰.۰۰
CaO	۱۶.۰۹	۱۶.۲۹	۱۶.۷۱	۱۷.۶۶	۱۷.۰۰	۱۶.۸۱	۱۵.۹۶	۱۶.۷۰	۱۵.۲۹	۱۵.۸۵
Na _۲ O	۲.۴۰	۲.۱۲	۱.۹۸	۱.۷۰	۱.۷۴	۱.۹۹	۲.۳۹	۱.۸۴	۲.۷۶	۲.۵۹
K _۲ O	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۴	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۳
Total	۱۰۰.۱۳	۱۰۰.۱۵	۹۹.۹۶	۱۰۰.۰۱	۱۰۰.۰۱	۱۰۰.۰۴	۹۹.۹۹	۹۹.۹۷	۹۹.۹۹	۱۰۰.۵۶
Formulae calculated on the basis of 32 oxygens										
Si	۸.۹۴	۸.۸۷	۸.۶۳	۸.۶۸	۸.۴۹	۸.۶۰	۸.۷۰	۸.۴۹	۹.۰۰	۸.۹۲
Al	۷.۰۳	۷.۱۳	۷.۴۰	۷.۲۳	۷.۵۶	۷.۴۲	۷.۳۶	۷.۵۹	۷.۰۱	۷.۰۷
Fe(ii)	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Ca	۲.۱۵	۲.۱۹	۲.۲۹	۲.۴۹	۲.۳۵	۲.۳۱	۲.۱۳	۲.۲۹	۳.۰۰	۳.۰۹
Na	۰.۸۵	۰.۷۵	۰.۷۰	۰.۶۱	۰.۶۲	۰.۷۱	۰.۸۵	۰.۶۶	۰.۹۸	۰.۹۱
K	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱
TOTAL	۱۹.۹۷	۱۹.۹۴	۲۰.۰۳	۲۰.۰۱	۲۰.۰۴	۲۰.۰۵	۲۰.۰۵	۲۰.۰۴	۱۹.۹۹	۲۰.۰۱
An	۷۸.۷۵	۸۰.۸۶	۸۲.۲۵	۸۵.۰۲	۸۴.۳۲	۸۲.۳۱	۷۸.۴۹	۸۳.۲۸	۷۵.۲۶	۷۷.۰۴
Ab	۲۱.۲۵	۱۹.۰۸	۱۷.۶۳	۱۴.۸۱	۱۵.۶۲	۱۷.۶۳	۲۱.۲۷	۱۶.۶۰	۲۴.۵۶	۲۲.۷۸
Or	۰.۰۰	۰.۰۶	۰.۱۲	۰.۱۷	۰.۰۶	۰.۰۶	۰.۲۳	۰.۱۲	۰.۱۸	۰.۱۷

جدول ۲ نتایج تجزیه شیمیایی کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های بازالتی متاع.

مقاطع نازک	GH-۱۷				GH-۲۶				GH-۴۵			
	#۲۶	#۲۷	#۲۸	#۲۹	#۴۱	#۴۲	#۵۱	#۵۲	#۵۳	#۵۴	#۵۵	
شماره نقطه												
موقعیت	مرکز	لبه	لبه	لبه	مرکز	مرکز	نزدیک مرکز	گوشته	گوشته	لبه		
SiO ₄	۴۹,۵۰	۵۲,۴۴	۵۲,۸۹	۵۲,۲۴	۵۲,۹۹	۴۹,۹۴	۵۰,۱۶	۵۰,۲۲	۵۱,۱۱	۵۱,۴۸	۵۲,۳۲	
TiO _۲	۰,۳۹	۰,۲۵	۰,۲۶	۰,۲۱	۰,۳۱	۰,۷۹	۰,۳۵	۰,۴۶	۰,۴۴	۰,۳۳	۰,۳۳	
Al _۲ O _۳	۵,۰۸	۲,۴۸	۲,۷۳	۲,۳۲	۲,۴۲	۴,۸۸	۴,۸۵	۵,۰۳	۳,۷۹	۳,۵۷	۳,۰۶	
Cr _۲ O _۳	۰,۹۷	۰,۵۸	۰,۵۱	۰,۵۹	۰,۷۳	۰,۱۰	۱,۲۵	۱,۰۸	۰,۷۷	۱,۲۴	۰,۴۸	
FeO	۵,۱۶	۵,۶۵	۵,۴۶	۵,۸۱	۵,۳۳	۶,۹۰	۵,۱۸	۵,۴۲	۵,۶۸	۴,۹۶	۵,۴۸	
MnO	۰,۱۳	۰,۱۸	۰,۱۹	۰,۱۷	۰,۱۱	۰,۱۸	۰,۱۲	۰,۱۵	۰,۱۲	۰,۱۲	۰,۱۳	
MgO	۱۶,۹۵	۱۹,۴۸	۱۸,۵۸	۱۹,۳۴	۱۸,۳۳	۱۶,۲۳	۱۶,۴۱	۱۶,۴۶	۱۶,۷۴	۱۷,۱۲	۱۷,۴۵	
CaO	۲۰,۴۹	۱۸,۳۶	۱۹,۱۳	۱۸,۰۷	۱۹,۹۲	۱۹,۸۰	۲۱,۲۵	۲۰,۱۴	۲۱,۳۰	۲۱,۲۳	۲۰,۹۹	
Na _۲ O	۰,۱۸	۰,۱۷	۰,۲۳	۰,۱۶	۰,۱۲	۰,۱۸	۰,۱۷	۰,۱۳	۰,۱۶	۰,۱۸	۰,۱۶	
K _۲ O	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	
مجموع	۹۹,۴۶	۱۰۰,۵۹	۹۹,۹۸	۹۹,۹۱	۱۰۰,۲۶	۹۹,۰۰	۹۹,۷۴	۹۹,۱۰	۹۹,۹۱	۱۰۰,۲۳	۱۰۰,۴۰	

فرمول محاسبه شده بر پایه Fe^{+3} محسوب شده برای ۴ کاتیون

Si	۱,۸۳	۱,۹۳	۱,۹۳	۱,۹۴	۱,۹۳	۱,۸۶	۱,۸۵	۱,۸۶	۱,۸۸	۱,۸۸	۱,۹۱
Al(IV)	۰,۱۷	۰,۰۷	۰,۰۷	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۱۴	۰,۱۵	۰,۱۴	۰,۱۲	۰,۱۲	۰,۰۹
Al(VI)	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۰۶	۰,۰۸	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴
Fe(iii)	۰,۱۱	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۵	۰,۰۵
Cr	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۱
Ti	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱
Fe(ii)	۰,۰۶	۰,۱۵	۰,۱۴	۰,۱۶	۰,۱۵	۰,۱۶	۰,۰۹	۰,۱۴	۰,۱۱	۰,۱۰	۰,۱۲
Mn	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Mg	۰,۹۴	۱,۰۵	۱,۰۱	۱,۰۵	۰,۹۹	۰,۹۰	۰,۹۰	۰,۹۱	۰,۹۲	۰,۹۳	۰,۹۵
Ca	۰,۸۱	۰,۷۱	۰,۷۵	۰,۷۰	۰,۷۸	۰,۷۹	۰,۸۴	۰,۸۰	۰,۸۴	۰,۸۳	۰,۸۲
Na	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱
K	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Wo	۴۱,۸۵	۳۶,۴۹	۳۸,۴۱	۳۶,۱۹	۳۹,۹۳	۴۱,۰۷	۴۳,۸۰	۴۲,۲۹	۴۳,۲۶	۴۳,۰۴	۴۲,۰۴
En	۴۸,۱۷	۵۳,۸۷	۵۱,۹۱	۵۳,۸۹	۵۱,۱۳	۴۶,۸۴	۴۷,۰۸	۴۸,۱۰	۴۷,۳۱	۴۸,۳۰	۴۸,۶۴
Fs	۹,۳۱	۹,۰۲	۸,۸۴	۹,۳۴	۸,۵۰	۱۱,۴۱	۸,۴۸	۹,۱۱	۸,۸۴	۸,۰۱	۸,۷۴
Acm	۰,۸۷	۰,۶۱	۰,۸۴	۰,۵۸	۰,۴۴	۰,۶۸	۰,۶۴	۰,۴۹	۰,۵۹	۰,۶۶	۰,۵۸

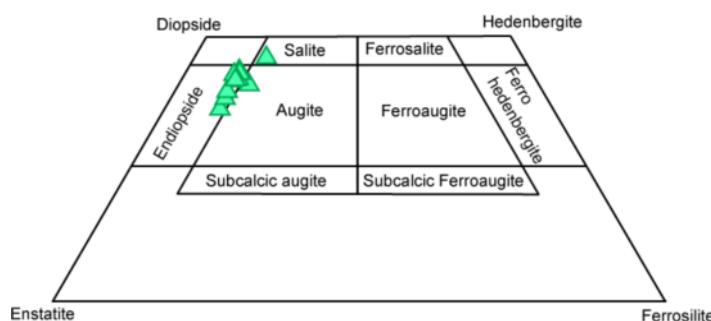


شکل ۳ ترکیب پلاژیوکلаз سنگ‌های بازالتی متاع.

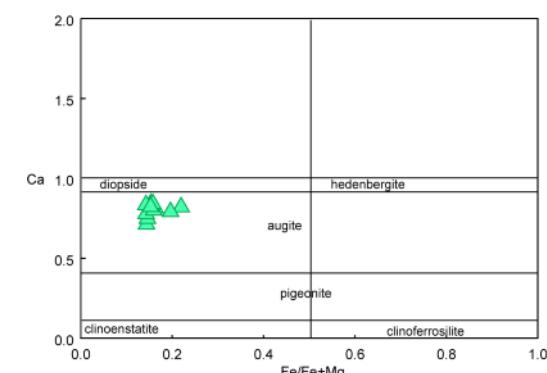
درصد وزنی)، TiO_2 (۰/۲۱-۰/۷۹)، Cr_2O_3 (۱/۲۵-۱/۰)، Na_2O (۰/۲۳-۰/۰۲)، Al_2O_3 (۰/۱۲-۰/۰۴) و CaO (۰/۰۸-۰/۰۲) می‌باشد. در این تحقیق از مکانیزم پلیمریزاسیون پیروکسن های آهنی با استفاده از اسید فوسفیتی از جمله H_3PO_4 و H_2PO_4^- برای ایجاد پلیمرها و پیروکسن های آهنی استفاده شده است. نتایج آزمایشات نشان داد که در مقایسه با پیروکسن های آهنی معمولی، پیروکسن های آهنی ایجاد شده با اسید فوسفیتی دارای خواصی متمایزی هستند. این خواص شامل افزایش درجه حرارت ذوب، افزایش مقاومت در برابر اکسیژن، افزایش مقاومت در برابر اسیدها و افزایش مقاومت در برابر خوردگی می‌باشد.

ترکیب شیمی درشت بلورهای کلینوپیروکسن بازالت‌های متاع براساس نتایج تجزیه ریز پردازشی (جدول ۲) در چاروجهی پیروکسن‌ها [۲۳] در نظر گرفته شده است (شکل ۴). پیروکسن‌های بررسی شده در گستره آن دیوپسید واقع بوده و فقیر از سدیم ($\text{Na}_2\text{O} < 0.2$) هستند؛ ولی با توجه به مقدار به نسبت پایین Ca در مقایسه با دیوپسید (کمتر از ۰/۸۴apfu)، بفت است آنها، اوخته بنامی (شکل ۵).

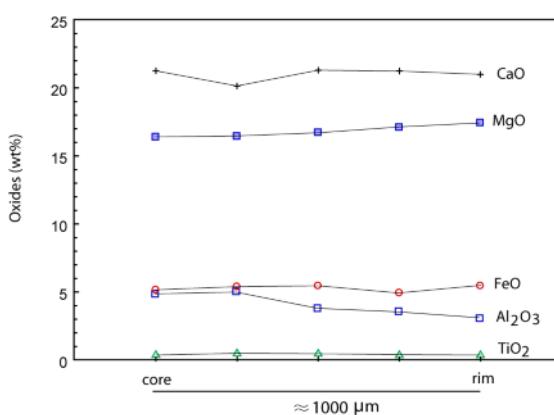
- کلینوپیروکسن‌ها دارای مقدار SiO_2 متوسط ۴۴٪-۵۳٪، Al_2O_3 ۵۰٪-۵۹٪، Mg بالا (۰-۹٪)، Ca و Mn پر (۱۰٪-۲۰٪)، Fe و Ti کم (۰-۱٪) و Na و K نیز دارند.



شکل ۴ نمودار چاروچهی پیروکسین‌ها برای درشت بلورهای کلینوپیروکسین پازالت‌های متاع [۲۳].



شکل ۵ نمودار $\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mg}$ نسبت به Ca بر حسب apfu.



شکل ۶ تغییرات ترکیبی درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن بازالت‌های متاع از مرکز تا لبه.

رو، تطابق منطقی بین Ti و Al^T وجود دارد (شکل ۸ ب)، با این حال مقدار Al بسیار بالاتر از Ti است، به طوری که همه پیروکسن‌ها بالای خط $6Al:Ti$ واقع هستند (شکل ۸ ب). همچنین این مقدار بالای Al به احتمال بسیار نشان‌دهنده ورود Al در جایگاه هشت وجهی است که طی آن، جانشینی $M^{2+}Al(AlSiO_6)$ $\Rightarrow M^{2+}_{y+z}Si_z$ منجر به تشکیل ترکیب $2Al = CaR^{3+}R^{3+}SiO_6$ شده است. بنابراین، Al کافی در دسترس بوده است تا کمبود Si در جایگاه چار وجهی و کمبود Ti در جایگاه هشت وجهی را برطرف نموده و تعادل را حفظ نماید. این امر نشانگر نقش اصلی مولفه چرم‌ماک ($CaR^{3+}R^{3+}SiO_6$) بoviژه مولفه $CaAlAlSiO_6$ در ترکیب این کلینوپیروکسن‌هاست [۲۸]. بر پایه نمودار $Na-Ti-Al^{IV}$ [۲۹] نیز ترکیب کلینوپیروکسن‌ها در گستره مولکول چرم‌ماک غنی از Ca قرار دارد (شکل ۹).

همانگی منفی بین $(Fe^{3+}+Al^{IV})$ و $(Fe^{2+}+Si^{4+})$ و قرار Fe^{3+} گیری ترکیب پیروکسن‌ها در سمت چپ خط $0 = fO_2 = 0$ (شکل ۱۰) نیز نشان‌دهنده افزایش گریزندگی اکسیژن (fO_2) و حضور آهن سه ظرفیتی همراه با تبلور درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن بازالت‌های منطقه است [۳۱، ۳۰].

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که جانشینی Al به جای سیلیسیم منجر به نقص بار یونی در پیروکسن‌ها گردیده که این نقص بار با جانشینی Fe^{3+} و Al به جای Fe^{2+} و Mg در جایگاه هشت وجهی M_I موازن شده است.

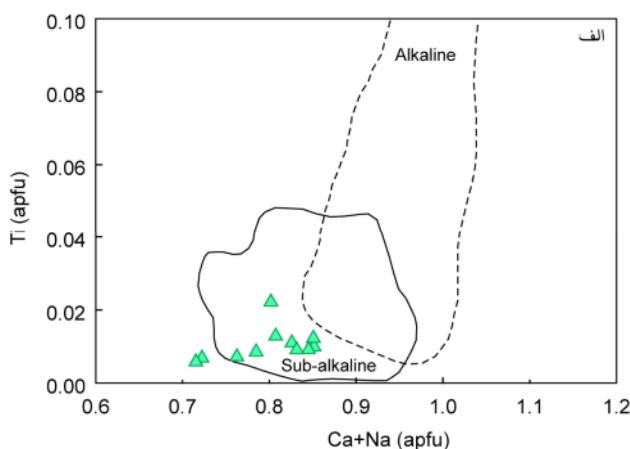
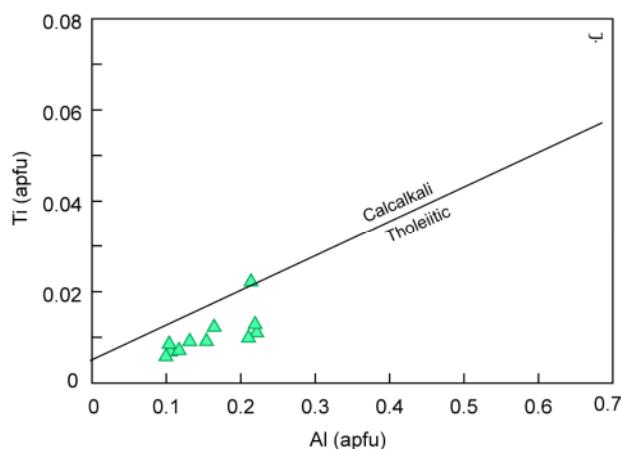
گفتنی است که مولفه اکمیت نقش ناچیزی در ترکیب این کلینوپیروکسن‌ها دارد که این امر با مقدار Na پایین (حدود 0.01 apfu) تایید می‌شود.

مقدار Ti کلینوپیروکسن‌ها از معیارهای مهم در تشخیص ماهیت مگمات است. ترکیب درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن بر پایه نمودار Ti نسبت به $Ca+Na$ (شکل ۷ الف)، در گستره بازالت‌های نیمه قلیایی قرار دارد که نشان‌دهنده ویژگی نیمه قلیایی ماقمای مادر آنهاست [۸]. ویژگی‌های شیمیایی این کانی‌ها به همراه مقدار Ti پایین، ویژگی کلاسیک کلینوپیروکسن‌های بازالت‌های با ماهیت توئیتی است [۸، ۲۵] که در نمودار Ti نسبت به Al (شکل ۷ ب) دیده می‌شود.

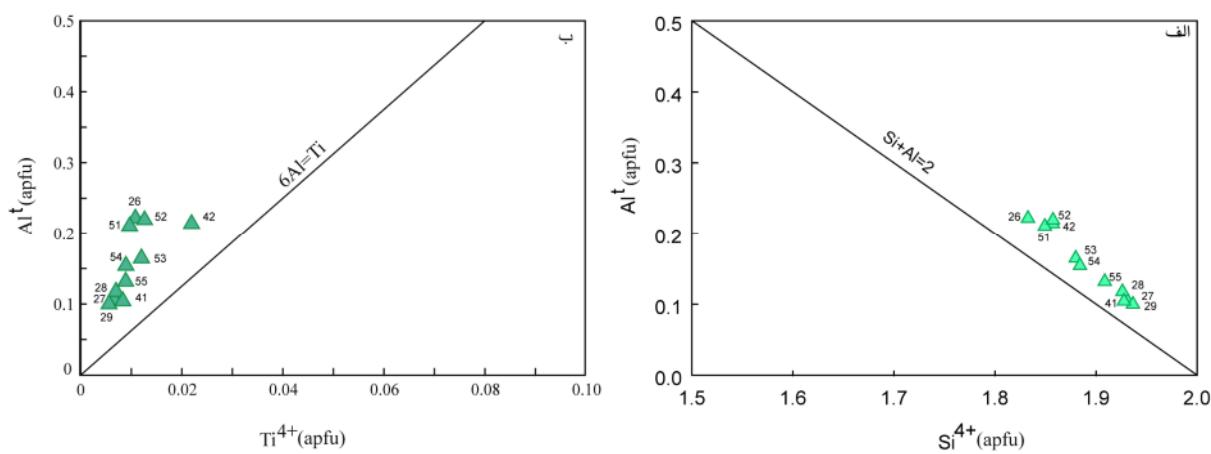
بحث

فرمول عمومی پیروکسن XYZ_2O_6 است که در جایگاه X کاتیون‌های Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca , Na , Li , M_2 , در جایگاه Y کاتیون‌های Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cr^{3+} , Al , Si , Mg^{2+} و در جایگاه هشت وجهی I_1 وارد می‌شوند و Z بیانگر Si و Al در جایگاه چاروجهی است.

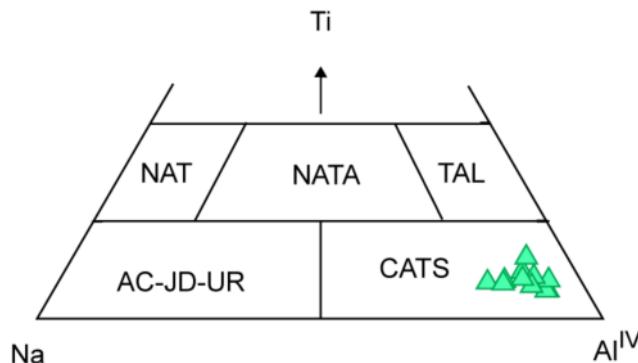
ورود Al و Ti در شبکه پیروکسن به فشار و ترکیب ماقما بستگی دارد [۲۶]، به طوری که مقدار پایین SiO_2 منجر به جایگزینی مولکول چرم‌ماک $CaAl_2SiO_6$ می‌شود. همانگی قابل قبولی بین روند Al و Ti در درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن وجود دارد. رابطه Si و Al در کلینوپیروکسن های مورد بررسی نشان می‌دهد که بخشی از جایگاه‌های چار وجهی شبکه پیروکسن توسط Al اشغال شده است (شکل ۸ الف). بنابراین Al در جایگاه چار وجهی (T) وارد شده است تا کمبود Si را جبران نماید [۲۷]. حضور Al در این جایگاه با ورود Ti^{4+} در جایگاه هشت وجهی (M) موازن می‌شود که بیانگر جانشینی $Ti^{4+}_{M+2Si_T} \Rightarrow Ti^{4+}_{M+2Al^{3+}_T}$ است. از این



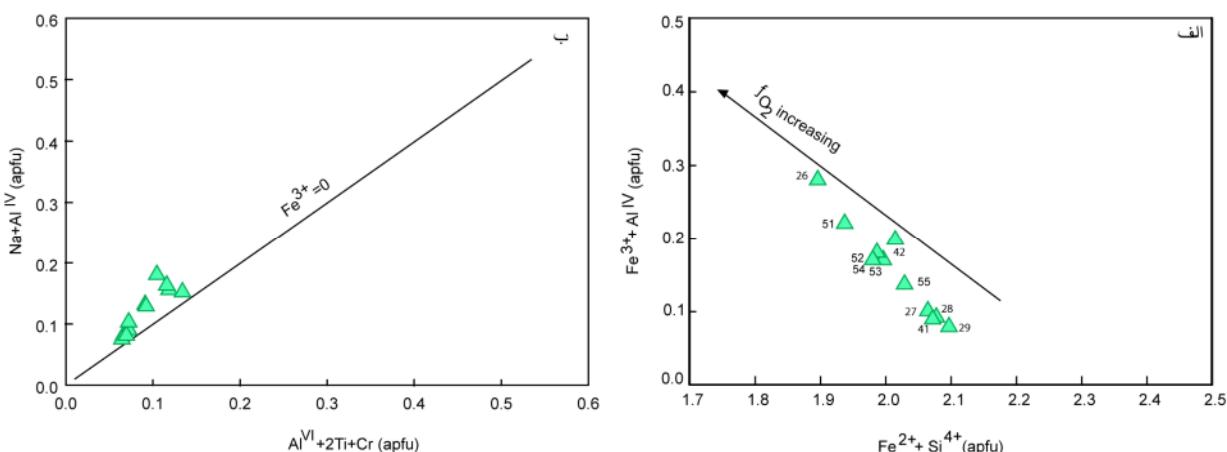
شکل ۷ نمودارهای الف) Ti نسبت به $Ca+Na$ و ب) Ti نسبت به Al برای تشخیص ماهیت کلینوپیروکسن بازالت‌های متعار [۸].



شکل ۸ نمودار های الف) Al^t نسبت به Si و ب) Al نسبت به Ti کلینوپیروکسن بازالت‌های متاع [۲۷] (اعداد کنار هر نمونه شماره نقاط تجزیه هستند که در جدول آمده‌اند).



شکل ۹ نمودار $\text{Ti}-\text{Na}-\text{Al}^{\text{IV}}$ پیروکسن‌ها [۲۹].
 CaFeAlSiO_6 . $\text{CaTiAl}_2\text{O}_6$:TAL . NaTiSiAlO_6 :NATA . $\text{NaTi}_{0.5}\text{R}_{0.52}+\text{Si}_2\text{O}_6$:NAT .
 $\text{NaCrSi}_2\text{O}_6$:UR JD- $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$. $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$:AC . CaAlAlSiO_6 :CATS



شکل ۱۰ نمودار های الف: $\text{Fe}^{3+}+\text{Al}^{\text{IV}}$ نسبت به $\text{Al}^{\text{VI}}+2\text{Ti}+\text{Cr}$ و ب: $\text{Na}+\text{Al}^{\text{IV}}$ نسبت به $\text{Fe}^{2+}+\text{Si}^{4+}$ (اعداد کنار هر نمونه شماره نقاط تجزیه هستند که در جدول ۲ آورده شده‌اند).

نسبت داده‌اند [۳۵-۳۲]. با این حال، با باور کپدری و همکارش [۳۶] ترکیب اولیه‌ی ماغما عامل مهم کنترل‌کننده‌ی ترکیب کلینوپیروکسن‌هاست. مقدار Al_2O_3 کلینوپیروکسن‌ها به چند

پژوهشگران مختلف تغییرات ترکیبی کلینوپیروکسن‌های تبلور یافته از ماقما را به تاریخچه سردشدنی مذاب، ترتیب ظهور کانی‌های مختلف، گریزندگی اکسیژن و دمای تبلور

در کلینوپیروکسن‌های تشکیل شده در فشارهای بالا (بین -۲۰-

۱۵ کیلوبار)، مقدار $\text{Al}^{IV}/\text{Al}^{VI}$ حدود ۱-۱/۵ است [۴۲]. مقدار پایین این نسبت در کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی (۰/۶-۰/۳) و نسبت بالای (۰/۲۳-۰/۲۱) تشکیل آن-ها را در فشارهای پایین نشان می‌دهد [۴۳، ۴۴].

برآورد دما و فشار تبلور درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن براساس روش مرجع [۴۵] نشان می‌دهد که این درشت‌بلورها در دمای حدود ۱۱۵۰-۱۲۰۰°C و فشار کمتر از ۱۰ kb (حدود ۵ تا ۶ کیلوبار) تشکیل شده‌اند (شکل ۱۱). پارامترهای X_{PT} و

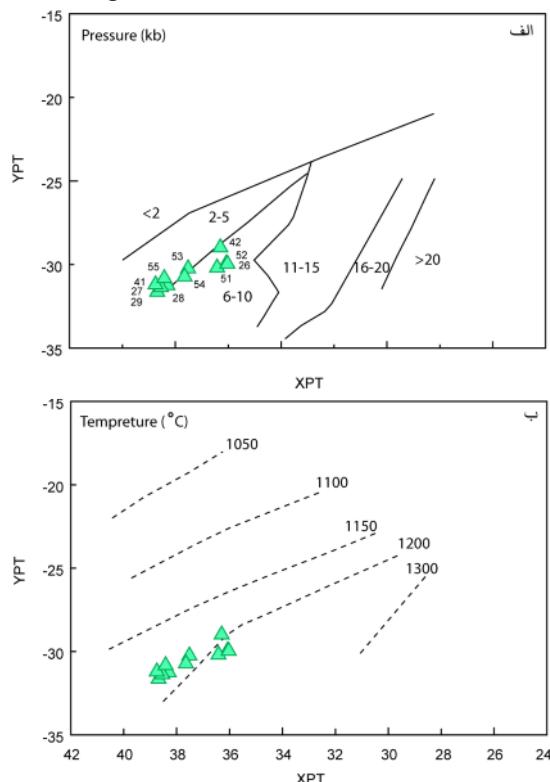
Y_{PT} در این روش از روابط زیر محاسبه شده‌اند:

$$X_{PT} = 0.446\text{SiO}_2 + 0.187\text{TiO}_2 - 0.404\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.346\text{FeO}^t - 0.052\text{MnO} + 0.309\text{MgO} + 0.431\text{CaO} - 0.446\text{Na}_2\text{O} \quad (۱)$$

$$Y_{PT} = -0.369\text{SiO}_2 + 0.535\text{TiO}_2 - 0.317\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.323\text{FeO}^t + 0.235\text{MnO} - 0.516\text{MgO} - 0.167\text{CaO} - 0.153\text{Na}_2\text{O} \quad (۲)$$

براساس نمودار $\text{Al}^{IV}/\text{Al}^{VI}$ نسبت به X_{PT} (شکل ۱۲) نیز، درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن در فشار حدود ۵ کیلوبار و مقدار

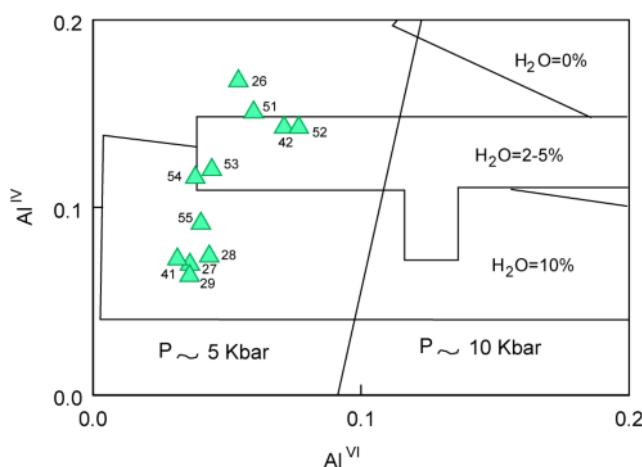
آب بالا تشکیل شده‌اند.



شکل ۱۱ نمودارهای Y_{PT} نسبت به X_{PT} برای شرایط تبلور کلینوپیروکسن‌های متاع [۴۵] (اعداد کنار هر نمونه شماره نقاط تجزیه هستند که در جدول ۲ آورده شده‌اند).

عامل از جمله دما و فشار تبلور و ترکیب شیمی ماغما بستگی دارد [۳۷]. در مagmaهای نیمه قلایی، مقدار Al پیروکسن به گریزندگی اکسیژن حساس نیست و به باور براؤن [۳۷] و مویر و تایلی [۳۸]، در magmaهای توئیتی، تبلور در فشار بالا عاملی است که موجب ورود در مقادیر قابل ملاحظه Al_2O_3 در ساختار پیروکسن می‌شود. با توجه به مقادیر بالای آلومینیم در بخش‌های مرکزی کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی نسبت به لبه آنها، می‌توان نتیجه گرفت که مرکز کانی‌های کلینوپیروکسن در فشار بالاتر نسبت به لبه آن‌ها تشکیل شده است.

مقادیر پایین در Al ، Ti و Cr کلینوپیروکسن‌های منطقه متاع نشان می‌دهد که این کانی‌ها به طور کلی در فشار به نسبت پایین تشکیل شده‌اند [۳۹]. فشار تبلور کلینوپیروکسن در سامانه‌های ماقمایی توسط پژوهشگران مختلف بررسی شده است. به باور وس [۴۰]، از نسبت $\text{Al}^{IV}/\text{Al}^{VI}$ با کاهش فشار تبلور، کاسته می‌شود. از این رو، مقدار این نسبت در پیروکسن‌ها به عنوان زمین فشارسنج به کار می‌رود [۴۱، ۴۰].



شکل ۱۲ نمودار Al^{IV} نسبت به Al^{VI} برای کلینوپیروکسن‌های بازالت‌های متاع [۴۶] (اعداد کنار هر نمونه شماره نقاط تجزیه هستند که در جدول ۲ آورده شده‌اند).

براساس ترکیب درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن، نموداری برای تفکیک، بازالت‌های تولئیتی جزایر قوسی از بازالت‌های غیرکوهزایی (بازالت پشت‌میان‌اقیانوسی، بازالت جزایر اقیانوسی و بازالت حوضه پشت‌قوس) طراحی کردند. بر این اساس، درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن بازالت‌های متاع به کلینوپیروکسن‌های تبلور یافته در تولئیت‌های غیرکوهزایی شبیه هستند (شکل ۱۳ ب). بر پایه نمودار Al_2O_3 نسبت به $\text{TiO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ (شکل ۱۳ پ)، کلینوپیروکسن‌ها در گستره پیروکسن‌های مربوط به بازالت‌های پشت‌قوس واقع هستند که با داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌کل نیز همخوانی دارد [۱۸].

برداشت

در این پژوهش بررسی کانی‌های پلازیوکلаз و کلینوپیروکسن بازالت‌های متاع نتایج زیر برداشت می‌شود:

- درشت‌بلورهای پلازیوکلاز بازالت‌های متاع کلسیمی هستند و ترکیب بیتونیتی دارند و کلینوپیروکسن‌ها از نوع اوژیت هستند.
- شیمی درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن نشان می‌دهد که ماگمایی مادر آن‌ها ویژگی نیمه قلیایی با ماهیت تولئیتی داشته است.

- مقدادیر پایین Ti و Cr و مقدار بالای Mg در پیروکسن‌ها بیانگر تشکیل بازالت‌ها در فشار پایین است.

- بر اساس شیمی کانی کلینوپیروکسن، Al جانشینی سیلیسیم شده که این جانشینی منجر به نقص بار یونی در ساختار پیروکسن‌ها شده است. احتمال می‌رود که این نقص بار با

به باور سیسان و گرو [۴۷]، آب پایداری نسبی کانی‌های کلینوپیروکسن و پلازیوکلاز را کنترل می‌نماید، به این ترتیب که میدان پایداری کلینوپیروکسن را گسترش داده و با تبلور کلینوپیروکسن، مذاب باقی‌مانده از Al_2O_3 غنی می‌شود. در این شرایط، پلازیوکلاز پس از کلینوپیروکسن در مذاب متبادر می‌گردد. این احتمال وجود دارد که مقادیر بالای آب مذاب طی تبلور درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن بازالت‌های متاع (شکل ۱۱) منجر به تبلور درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن پیش از تبلور درشت‌بلورهای پلازیوکلاز در ماگمای بازالتی شده باشد. ترکیب کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی که در بردارنده مولکول تی‌چرماتک هستند، نیز تبلور درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن پیش از پلازیوکلاز را در بازالت‌های مورد بررسی تأیید می‌کند [۳۴].

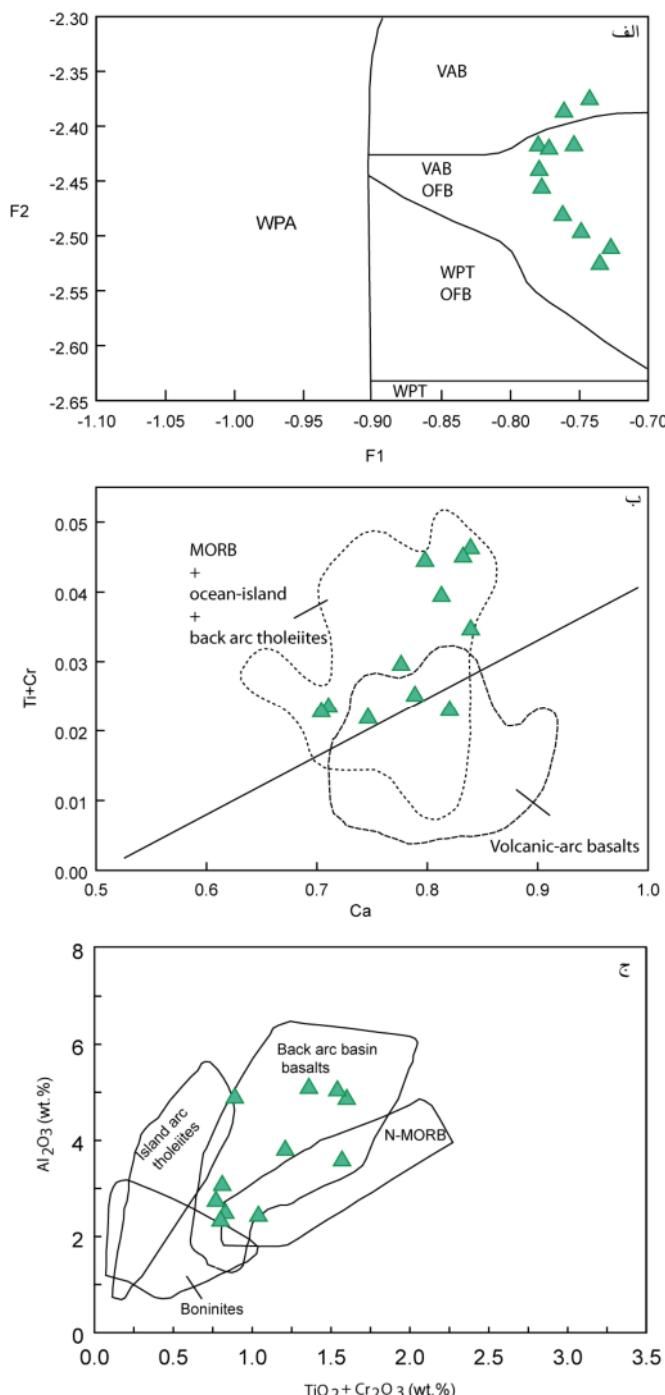
جاگاه زمین‌ساختی

ترکیب کانی‌های کلینوپیروکسن براساس شیمی گدازه میزان آن‌ها تغییر می‌کند. این امر، به ویژه در درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن صادق است و ترکیب آن‌ها تفاوت‌های شیمیایی موجود بین انواع مختلف ماگماهای بازالتی را با دقت بالاتر از ترکیب کلینوپیروکسن‌های زمینه نشان می‌دهد. این ویژگی به عنوان شاخصی برای بازالت‌های جاگاه‌های زمین‌ساختی مختلف بکار رفته است. براساس نمودار تشخیصی F1-F2 [۹]، داده‌های تجزیه کلینوپیروکسن‌های بازالت‌های متاع در گستره مشترک بازالت‌های کف‌اقیانوس (OFB) و جزایر قوسی (VAB) واقع هستند (شکل ۱۳ الف). لترر و همکاران [۸]

- بر اساس شیمی درشتبلورهای کلینوپیروکسن، سنگ‌های بازالتی متاع در حوضه‌ی پشت‌قوسِ کمان ماقمایی ژوراسیک‌پیشین در پهنه سندج-سیرجان جنوبی تشکیل شده‌اند که این با نتایج زمین‌شیمیایی سنگ‌کل نیز همخوانی دارد.

جانشینی Fe^{3+} به جای Fe^{2+} و Mg در جایگاه هشت وجهی M_1 موازن نه شده باشد.

- بر اساس نتایج دما و فشارسنجی، کانی‌های کلینوپیروکسن در مقادیر آب بالا در دمای حدود $1150 - 1200^\circ\text{C}$ و فشار حدود ۵ تا ۶ کیلوبار متببور شده‌اند که بیانگر تشکیل آن‌ها در عمق ۱۵ تا ۱۸ کیلومتری است.



شکل ۱۳ نمودارهای (الف) F1-F2 [۹]، (ب) $\text{Ti}+\text{Cr}$ نسبت به Ca [۸] و (پ) Al_2O_3 نسبت به $\text{TiO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ [۴۸]. برای تشخیص محیط زمین ساختی کانی‌های کلینوپیروکسن بازالت‌های متاع.

مراجع

- [12] Putrika K., 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 the Snake River Plain, Idaho", *American Mineralogist*, Volume 88 (2003) 1542–1554.
- [13] Liotard J.M., Briot D., Boivin P., "Petrological and geochemical relationships between pyroxene megacrysts and associated alkali basalts from Massif Central xenolith suite (France)", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 98 (1988) 81–90.
- [14] Wood B.J., Blundy J.D., "A predictive model for rare earth element partitioning between clinopyroxene and anhydrous silicate melt", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 129 (1997) 166–181.
- [15] Vanucci R., Bottazzi P., Wulff P. E., Neumann E. R., "Partitioning of REE, Y, Sr, Zr and Ti between clinopyroxene and silicate melts in the mantle under La Palma (Canary Islands): implications for the nature of the metasomatic agents", *Earth and Planetary Science Letters* 158 (1998) 39–51.
- [16] Jankovics M.E., Taracsák Z., Dobosi G., Embey-Isztin A., Batki A., Harangi S., Hauzenberger C.A., "Clinopyroxene with diverse origins in alkaline basalts from the western Pannonian Basin: Implications from trace element characteristics", *Lithos*, 262, 120-134.
- [17] Aghazadeh M., Barati B., "Geological and mineralogical map of Gale Rigi (scale 1:20000)", Geology survey of Iran, Tehran (in Persian) (2010).
- [18] Badrzadeh Z., "Geochemistry and petrogenesis of Mata Lower Jurassic basaltic rocks (Southeast Kerman): Implication to Southern Sanandaj- Sirjan zone evolution. Petrology", No. 36 (2019) 153-170.
- [19] Arvin M., Pan Y., Dargahi S., Malekizadeh A., Babaei A., "Petrochemistry of the Siah-Kuh granitoid stock southwest of Kerman, Iran: implications for initiation of Neotethys subduction", *J Asian Earth Sci* 30 (2007) 474–489.
- [20] Badrzadeh Z., Peter J.M., Aghazadeh M., Barrett T., "Volcanogenic Cu-Zn-Au and Cu-Zn massive sulfide Sargaz-Mata metallogenic province, Sanandaj-Sirjan zone, Iran", 13th Quadrennial IAGOD Symposium, Adelaide, South Australia (2010).
- [21] Babakhani A., "Geological map of Sabzevaran (scale 1:250.000)". Geology survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian) (1992).
- [22] Shahraki A., "Geological map of Esfandaeqeh sheet (scale 1:100.000)", Geology survey of Tehran, Iran (in Persian) (2003).
- [1] Dobosi G., Jenner G.A., "Petrologic implications of trace element variation in clinopyroxene megacrysts from the Nograd volcanic province", North Hungary: a study by laser ablation microprobe inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Lithos* 46 (1999) 731–749.
- [2] Ghorbani M.R., Middlemost E.A.K., "Geochemistry of pyroxene inclusions from the Warrumbungle Volcano, New South Wales", Australia. *American Mineralogist* 85 (2000) 1349–1367.
- [3] Bizimis M., Vincent J.M.S., Enrico B., "Trace and REE content of clinopyroxenes from supra-subduction zone peridotites: implications for melting and enrichment processes in island arcs", *Chemical Geology* 165 (2000) 67–85.
- [4] Nazzareni S., Molin G., Peccerillo A., Zanazzi P.F., "Volcanological implications of crystal-chemical variations in clinopyroxenes from the Aeolian Arc, Southern Tyrrhenian Sea (Italy)", *Bulletin of Volcanology* 63 (2001) 73–82.
- [5] Avanzinelli R., Bindi L., Menchetti S., Conticelli S., "Crystallization and genesis of peralkaline magmas from Pantelleria Volcano", Italy: an integrated petrological and crystal-chemical study. *Lithos* 73 (2004) 41–69.
- [6] Zhu Y.-F., Ogasawara Y., "Clinopyroxene phenocrysts (with green salite cores) in trachybasalts: implications for two magma chambers under the KokcheNAPV UHP massif", North Kazakhstan. *Journal of Asian Earth Sciences* 22 (2004) 517–527.
- [7] Le Bas M.J., "The role of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage", *American Journal of Science* 260 (1962) 267–288.
- [8] Leterrier J., Maury R.C., Thonon P., Girard D., Marchal M., "Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series", *Earth and Planetary Science Letters* 59 (1982) 139–154.
- [9] Nisbet F.G., Pearce J.A., "Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 63 (1977) 149–160.
- [10] Nimis P., "Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. Part 2. Structural geobarometers for basic to acid", tholeiitic and mildly alkaline magmatic systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135(1) (1999) 62-74.
- [11] Putirka K., Johnson M., Kinzler R., Longhi J., Walker D., "Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene-liquid equilibria", 0–30 kbar. *Contrib Mineral Petrol* 123 (1996) 92–108.

- [36] Capedri S., Venturelli G., "Clinopyroxene composition of ophiolitic metabasalts in the Mediterranean area", *Earth Planet Sci Lett* 43 (1979) 61–73.
- [37] Brown GM., "Mineralogy of the basaltic rocks. In: Hess HH, Poldervaart A (eds) *Basalts. Interscience*", New York, 103–162 (1967).
- [38] Muir I.D., Tilley C.E., "Basalts from the northern part of the Rift Zone of the Mid-Atlantic ridge", *J. Petrol.* 5 (1964) 409–434.
- [39] Hawkins J.W., Allan J.F., "Petrologic Evolution of Lau Basin Sites 834 Through 839. In: Hawkins, J.W., et al. (Editors.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, vol. 135. Ocean Drilling Program*", College Station, Texas (1994) 427–470.
- [40] Wass S.Y., "Multiple origins of clinopyroxenes in alkali basaltic rocks", *Lithos* 12 (1979) 115–132.
- [41] Meyer H.O.A., Mitchell R.H., "Sapphire-bearing ultramafic lamprophyre from Yogo Gulch, Montana; a ouachitite", *The Canadian Mineralogist* 26(1), 81–88.
- [42] Thompson R.N., "Some high-pressure pyroxenes", *Mineral. Mag.* 39(1974) 768–787.
- [43] Aoki K., Kushiro I., "Some clinopyroxenes from ultramafic inclusions in Dreiser Weiher", *Eifel. Contrib. Mineral. Petrol.* 25 (1968) 284–288.
- [44] Aoki K., Shiba I., "Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinomegata", *Japan. Lithos* 6 (1973) 41–51.
- [45] Soesoo A., "A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallization PT-estimations", *GFF*, Vol. 119 (Pt. 1, March), pp. 55–60. Stockholm. ISSN (1997) 1103–5897.
- [46] Helz R. T., "Phase relations of basalt in their melting ranges at $\text{PH}_2\text{O}=5$ kb as a function of oxygen fugacity", Part I. mafic phases. *Journal of Petrology* 14 (1973) 249–302.
- [47] Sisson T.W., Grove T.L., "Temperatures and H_2O contents of low-MgO high-alumina basalts", *Contrib. Mineral. Petrol.* 113 (1993) 167–184.
- [48] Hout F., Hebert R., Varfalvy V., Beaudoin G., Wang C.S., Liu Z.F., Cotten J., Dostal J., "The Beimarang melange (southern Tibet) brings additional constraints in assessing the origin", *metamorphic evolution and obduction processes of the Yarlung Zangbo ophiolite*. *Journal of Asian Earth Sciences* 21 (2002) 307–322.
- [49] Kretz R., "Symbols for rock-forming minerals", *American Mineralogist*, Volume 68 (1983) 277–279.
- [23] Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginzburg I.V., Ross M., Seifert F.A., Zussman J., Aoki K., Gottardi D., "Nomenclature of pyroxenes", *Am. Min.*, 62 (1988) 53–62.
- [24] Rapprich V., "Compositional variation of clinopyroxenes of basaltic", essexitic and tephriphonolitic rocks from the Dourovské hory Volcanic Complex, NW Bohemia. *J Geosci* 50 (2005) 119–132
- [25] Beccaluva L., Macchiotta G., Piccardo G.B., Zeda O., "Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator", *Chem. Geol.*, 77 (1989) 165–182.
- [26] Dobosi G., "Chemistry of clinopyroxenes from the Lower Cretaceous alkaline volcanic rocks of the Mecsek Mountains", south Hungary. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*, 156(3) (1987) 281–301.
- [27] Kushiro I., "Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks", *American Journal of Science*. 258 (1960) 548–554.
- [28] Deer WA., Howie RA., Zussman J., "An introduction to the rock-forming minerals: Second edition", London, Longman (1997).
- [29] Papike J.J., Cameron K.L., Baldwin K., "Amphiboles and pyroxenes: characterization of other than quadrilateral components and estimates of ferric iron from microprobe data", *Geology Society of America* 6 (1974) 1053–1054.
- [30] Schweitzer E. L., Papike J. J., Bence A. E., "Clinopyroxenes from deep sea basalts: A statistical analysis", *Geophysical Research Letters*, 5(7) (1978) 73–576.
- [31] 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 Jahrb. Mineral., Abh.*, 140 (1980) 54–88.
- [32] Verhoogen J., "Distribution of titanium between silicates and oxides in igneous rocks", *Am J Sci* 260 (1962) 211–220
- [33] Lofgren G., Donaldson CH., Williams RJ., Mullins O., Usselman TM., "Experimentally produced textures and mineral chemistry of Apollo 15 quartz normative basalts", *Geochim Cosmochim Acta Suppl* 5(1) (1974) 549–567
- [34] Barberi F., Bizouard H., Varet J., "Nature of the clinopyroxene and iron enrichment in alkalic and transitional basaltic magmas", *Contrib Mineral Petrol* 33 (1971) 93–107.
- [35] Mollo S., Del Gaudio P., Ventura G., Iezzi G., Scarlato P., "Dependence of clinopyroxene composition on cooling rate in basaltic magmas: Implications for thermobarometry", *Lithos* 118 (2010) 302–312.