

## برآورد دما - فشار و گریزندگی اکسیژن در گابرو - پیروکسنیت‌های تازه کند کلیبر؛ با تمرکز بر شیمی بلورها و فعالیت کانی‌ها

محسن مؤید<sup>۱</sup>، منیر مجرد<sup>۲\*</sup>، قادر حسین زاده<sup>۱</sup>

۱- دانشگاه تبریز، دانشکده علوم طبیعی، گروه زمین‌شناسی

۲- دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، صندوق پستی ۱۶۵-۵۷۱۵۳

(دریافت مقاله: ۸۸/۱۰/۳ ، نسخه نهایی: ۸۸/۱۲/۲۳)

چکیده: در مجموعه‌ی مافیک - اولترامافیک تازه کند کلیبر در شمالغرب ایران به سن نسبی سنوزوئیک زیرین، هسته‌ی پیروکسنیتی با گابرو و کل مجموعه‌ی با سنگ‌های ولکانوکلاستیک سازند مجید آباد احاطه شده‌اند. کانی‌های اصلی موجود در گابروها شامل پلاژیوکلاز + کلینوپیروکسن + آمفیبول + فلوگوبیت و کانی‌های اصلی پیروکسنیت‌ها عبارتند از کلینوپیروکسن + الیوین + کانی‌های کدر است. ترکیب پیروکسن در هر دو نوع سنگ از دیوپسید غنی بوده و دارای مقداری هدنبرزیت و کلسیم چرمک است. پلاژیوکلاز، آنورتیتی و ترکیب کانی تیره‌ی هماتیتی است. با بررسی ارتباط بین فعالیت کانی‌های اصلی در این سنگ‌ها با ترکیب شیمیائی کانی‌ها مشخص شد که فعالیت کانی کلسیم چرمک در پیروکسن با مقدار Al با پیکره‌ی هشت وجهی کنترل می‌شود. در حالی‌که فعالیت چرمکیت در آمفیبول رابطه‌ی مستقیمی با Al موجود در پیکره‌ی چهار وجهی داشته و با Si چهار وجهی، Al هشت وجهی و Na موجود در پیکره‌ی آرامیکی عکس دارد. با استفاده از روش‌های مختلف فشار ۸-۱۰ kbar در دمای ۹۰۰°C برای تبلور پیروکسنیت‌ها و فشار kbar در همان دما برای گابروهای مجموعه برآورد شده است. دمای جدایش تیغه‌های ایلمنیتی مشاهده شده از متن هماتیت طی فرایندهای نیمه جامد C ۴۷۰ ° درجه ۲۰۰ (Log fO<sub>2</sub>) برای ماقمای مولد این سنگ‌ها ۸-۱۴ تا و برای پیروکسنیت‌ها این کمیت بالاتر از گابروها ارزیابی شده است.

واژه‌های کلیدی: پیروکسنیت، دما فشار سنجی، فعالیت کانی‌ها، نا آمیختگی هماتیت - ایلمنیت، گریزندگی اکسیژن.

سازند مجید آباد به سن پالئوسن رخمنون دارند. توده‌های مافیک - اولترامافیک در هسته‌ی یک تاقدیس و با روند محوری شرقی - غربی رخمنون یافته‌اند. گسل‌های مهمی نظری گسل رانده‌ی هوراند در شمال، گسل راستا لغز چیگرد مجید آباد در شرق و گسل عربشاه - قلعه ملک در غرب همبافت یاد شده را محدود کرده‌اند. توده‌های اولترامافیک پیروکسنیتی قدیمی‌ترین رخمنون‌های منطقه بوده و بخش مرکزی همبافت حلقوی یاد شده را تشکیل می‌دهند. توده‌های مافیک گابرو،

### مقدمه

گستره‌ی مورد بررسی در شمالغربی - ایران، استان آذربایجان شرقی و شهرستان کلیبر، بین طول‌های جغرافیایی شرقی ۴۷°۰' تا ۲۰°۴۷' و عرض‌های جغرافیایی شمالی ۳۸°۰' تا ۵۵°۳۸' محدود شده است.

سنگ‌های مافیک - اولترامافیک و دایک‌های نفلین سینیتی رخمنون‌های اصلی این گستره را تشکیل می‌دهند. پیرامون این سنگ‌ها نهشته‌های آتشفشانی و آتشفشان آواری

\* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۴۴۱(۲۹۷۲۱۲۹)، نمبر: ۰۴۴۱(۲۷۷۶۷۰۷)، پست الکترونیکی: mmodjarrad@yahoo.com

کلیبر این مجموعه تحت عنوان توده‌های نفوذی الیگوسن و با ترکیبی در حد دیوریت تا بیوتیت دیوریت و گرانیت تا گرانودیوریت معرفی شده‌اند [۱]. بررسی‌های زمین‌شناسی این منطقه نشان می‌دهد که بخش مرکزی و عمدۀ رخنمون حلقوی یاد شده را سنگ‌های پیروکسنیتی (کلینوپیروکسنیت تا الیوین کلینوپیروکسنیت و کلینوپیروکسنیت پلازیوکلازدار) تشکیل می‌دهند (شکل ۱). ارتباط ژنتیکی این واحد با توده‌های مافیک و نفوذی‌های فلزیک مبهم است. وجود زنولیت‌های بزرگی از پیروکسنیت در داخل گابروها (احتمالاً در اثر پدیده‌ی استوپینگ) و نیز دایک‌های گابروئی در داخل پیروکسنیت‌ها حکایت از جوان بودن گابروها و گابرو - دیوریت‌ها نسبت به پیروکسنیت‌ها دارد. دایک‌های نفلین سینیتی تا مونزنونیتی مجموعه‌های یاد شده را قطع کرده و از همه‌ی واحدهای یاد شده جوانترند. دایک‌های نفلین سینیتی و مونزنونیتی از نظر کانی‌شناسی شباهت زیادی به توده‌های نفلین سینیتی کلیبر داشته و لذا سن نسبی آن‌ها به الیگوسن فوقانی نسبت داده شده است.

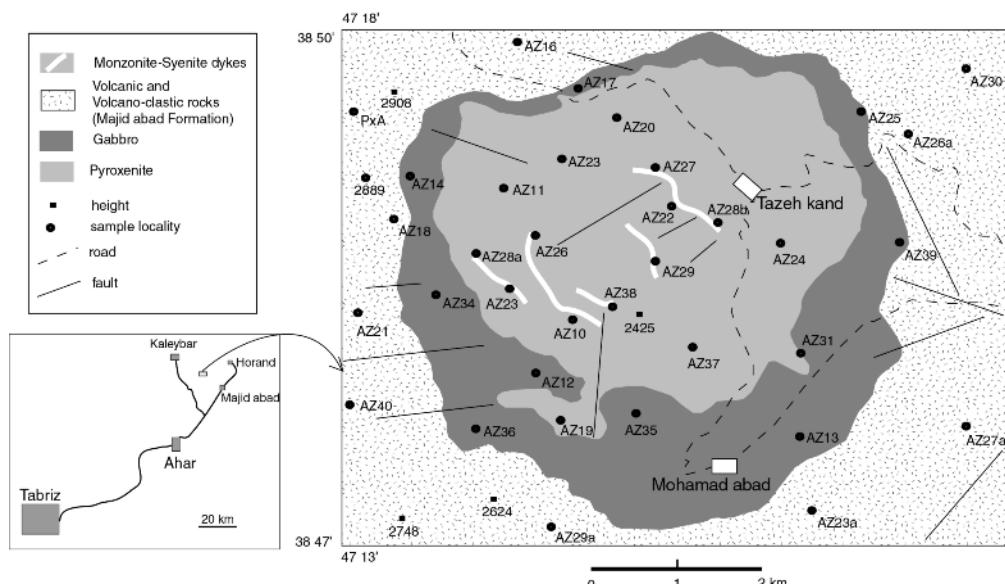
با توجه به رخنمون مجموعه‌های مافیک - اولترامافیک در هسته‌ی تاقدیس موجود در نهشته‌های پالئوسن و عدم مشاهده همیری دمایی این توده‌ها با نهشته‌های آتشفسانی و آتشفسانی آواری سازند مجید آباد، به نظر می‌رسد که این مجموعه سنی قدیمی‌تر از پالئوسن داشته باشد.

گابرو - دیوریت تا میکرو گابرو - دیوریت و گابروی پگماتیتی را شامل می‌شوند. این دسته از سنگ‌ها از پیرامون توده‌ی اولترامافیک پیروکسنیتی را در بر گفته‌اند. دایک‌های از توده‌ی مافیک بداخل توده‌ی پیروکسنیتی تزریق شده‌اند. برونيوم‌هایی از توده‌ی پیروکسنیتی در درون توده‌ی گابرو - دیوریتی دیده می‌شوند. دایک‌های نفلین سینیتی و مونزنونیتی فاز تأخیری در منطقه محسوب می‌شوند که مجموعه‌ی مافیک و اولترامافیک را قطع کرده‌اند.

در این مقاله نتایج بررسی ابعاد مختلف کانی‌شناسی سنگ‌های مافیک - اولترا مافیک تازه کند کلیبر آورده شده‌اند. هدف، استفاده از داده‌های صحرائی، بررسی‌های سنگنگاری و داده‌های کانی شیمی به منظور (۱) تعیین دما و فشار تبلور سنگ‌ها (۲) تعیین گریزندگی اکسیژن<sup>۳</sup> (۳) عمق تشکیل ماغما و نرخ ذوب بخشی در خاستگاه است. در این مقاله روی تغییرات ترکیبی پارازیزهای کانیائی به عنوان نمایشگر دما و فشار و گریزندگی اکسیژن ماغما هنگام تبلور این پارازیزها تمرکز شده است. به علاوه به مجموعه‌ی اکسیدی آهن - تیتانیم و سیلیکات‌های همراه برای برآورد دمای تبلور این کانی‌ها از ماغما توجه شده است.

#### زمین‌شناسی منطقه

همبافت حلقوی کوههای هشت سر پیرامون روستاهای تازه کند و محمدآباد و در هسته‌ی یک تاقدیس با روند محوری شرقی - غربی رخنمون یافته است. در نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده شده منطقه‌ی مورد بررسی. موقعیت جغرافیائی منطقه و محل نمونه برداری‌ها بر روی نقشه مشخص شده است.

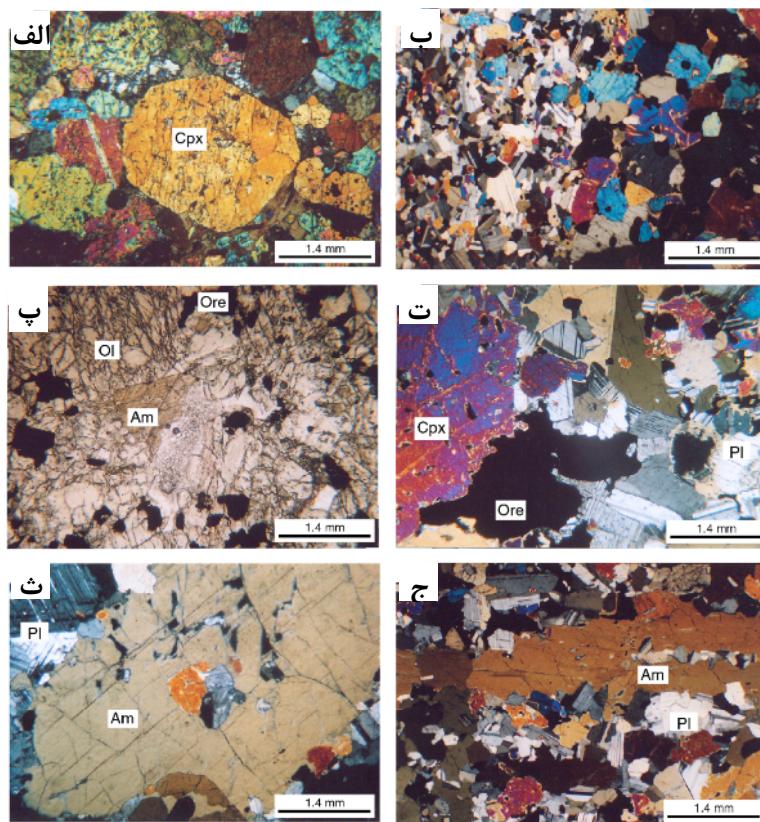
آل یا غیر ایده آل و با ذکر منبع با استفاده از نرم افزار AX محاسبه شده است [۳]. برای توزیع کاتیون‌ها در جایگاه‌های بلوری از برنامه‌ی کامپیوترا PTMAFIC استفاده شده است [۴]. جدول ۱ داده‌های معرف آنالیز ریز پردازشی را نشان می‌دهد.

### سنگ نگاری پیروکسنیت‌ها

این سنگ‌ها بیشتر از کلینوپیروکسن‌های شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار (۷۰ تا ۸۰ درصد)، الیوین (۵ تا ۱۰ درصد)، کانی کدر (۱۰ تا ۱۵ درصد) و مقادیر جزئی ارتوپیروکسن، فلوگوپیت، آپاتیت و هرسی نیت تشکیل شده‌اند (شکل ۲). در بعضی سنگ‌ها پلاژیوکلاز و آمفیبول به میزان ۵ تا ۱۰ درصد مشاهده می‌شوند. لایه‌بندی ظاهری مشاهده شده در برخی از نمونه‌ها به تغییر در اندازه‌ی ذرات وابسته بوده و بخش ریز دانه از بخش درشت دانه تفکیک شده است.

### روش بررسی

پس از بررسی مقاطع نازک و انتخاب نمونه‌های مناسب به منظور بررسی ترکیب شیمیائی کانی‌ها، دو نمونه پیروکسنیتی سالم و نادگرسان از نمونه‌های تازه کند به عنوان نمونه‌ی معرف با ریز پردازندۀ مرکز تحقیقات فراآوری مواد معدنی ایران آنالیز شدند. این دستگاه به روش EDS، با ولتاژ شتاب‌دهنده‌ی ۱۵kV، جریان پرتو الکترونی ۱۵nA، زمان آنالیز ۴۰ ثانیه برای هر نقطه و با استفاده از استانداردهای طبیعی و ساخته شده کار می‌کند. برای تبدیل سیگنال‌های X-ray به درصد اکسیدها از نرم افزارهای کامپیوترا خاص بهره گرفته شده است. حد تشخیص دستگاه حدود ۲Wt% برای اکسیدهاست. مقدار فلورور و آب برای همه نقاط، اندازه‌گیری شده است. اکسید آهن به صورت آهن کل گزارش شده و برای جدایش  $Fe^{2+}$  از  $Fe^{3+}$  از روش‌های عنصر سنجی و نسبت R برای هر کانی استفاده شده است. فعالیت کانی‌ها بر پایه‌ی نوع آمیختن محلول جامد ایده



شکل ۲ تصاویر سنگنگاری نمونه‌های مورد بررسی. تمامی تصاویر جز مورد ب به حالت XPL گرفته شده‌اند. (الف) کلینوپیروکسن‌های شکل‌دار جزء اصلی پیروکسنیت‌ها را تشکیل می‌دهند. (ب) کانی‌های الیوین و اکسید فلزی در رتبه بعدی فراوانی قرار دارند. (پ) لایه‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول در بعضی نمونه‌های پیروکسنیتی در حد کانی اصلی به چشم می‌خورند. (ت) لایه‌بندی ناشی از جدایش درشت دانه‌ها از ریز دانه‌ها در پیروکسنیت‌ها مشاهده شده است. (ث) و (ج) تصاویر میکروسکوپی وابسته به گابروهاست که حضور پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و آمفیبول را به عنوان کانی‌های اصلی و لایه‌بندی ناشی از طبقات غنی از آمفیبول و غنی از کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز را نشان می‌دهد.







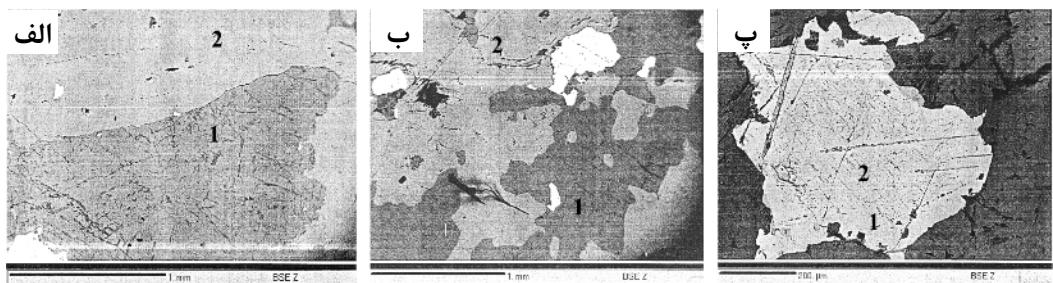
که از لایه‌های غنی از آمفیبول‌های درشت و ریز دانه غنی از کلینوپیروکسن و پلازیوکلаз تشکیل شده است.

برای اطمینان از شناسائی صحیح کانی‌ها و بررسی ریزتر روابط تعادلی کانی‌ها تصاویر BSE از نمونه‌های گابروئی و اولترامافیک تهیه شده‌اند (شکل ۳). در این تصاویر به دلیل عدم آمیختگی در فرایندهای نیمه جامد تیغه‌های ریز اکسولوشنی از کانی ایلمنیت از متن هماتیت جدا شده است.

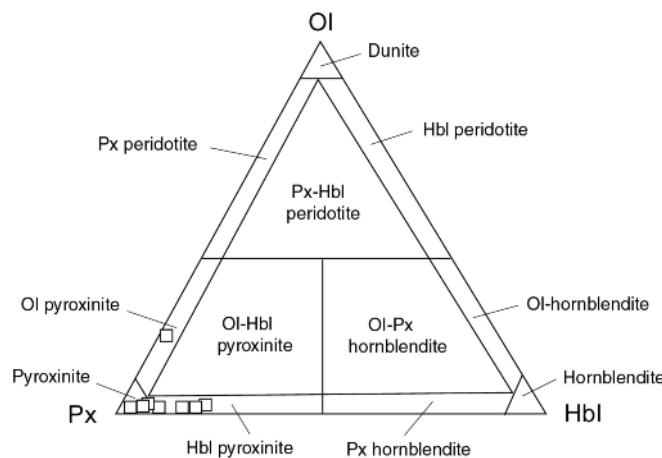
به منظور رده‌بندی نمونه‌های سنگی پیروکسنیتی از مثلث مدبی ویژه سنگ‌های اولترامافیک هورنبلند دار [۲] استفاده شده است. بر این اساس بیشتر نمونه‌ها از نوع پیروکسنیت تا هورنبلند پیروکسنیت رده‌بندی شده‌اند (شکل ۴).

بافت شانه‌ای در برخی از نمونه‌ها پگماتیتی و حاصل از سمت‌گیری بلورهای بلند آمفیبول در آن‌ها تشکیل شده است. این سنگ‌ها بخش حاشیه‌ای توده‌ی پیروکسنیتی را تشکیل داده و دایک‌های متعددی از آن در داخل توده‌ی پیروکسنیتی تزریق شده است.

در حاشیه این دایک‌ها تمرکز بالائی از میکا که به ورمیکولیت تبدیل شده است، دیده می‌شود. ورمیکولیت‌های یاد شده اغلب شبه ششگوش بوده و به نظر می‌رسد که از دگرسانی بیوتیت یا فلوگپیت‌های اولیه حاصل شده‌اند. وجود این ذخائر در اطراف دایک‌های گابروئی تا گابرو دیوریتی و سینیتی را می‌توان به فعالیت گرمابی و دگرنهادی پتابسیم نسبت داد. در برخی از نمونه‌های گابروئی، لایه‌بندی ترکیبی مشاهده می‌شود



شکل ۳ تصاویر SEM از نمونه‌های منطقه‌ی. الف و ب) از نمونه‌های گابروئی تهیه شده است. کانی ۱ در هر دو عکس پلازیوکلاز بوده و کانی ۲ در عکس اول کلینوپیروکسن و در عکس دوم آمفیبول است. اطمینان از حصول تعادل بافتی (داشتن مرز مشترک) و امکان تبادل کاتیونی بین کانی‌ها برای دما فشار سنجی‌های کاتیونی ضروری است. پ) تصویر تهیه شده از نمونه‌های اولترامافیک (AZ20). متن کانی از هماتیت و تیغه‌های اکسولوشنی ایلمنیت در تصویر مشخص است. دمای نا‌آمیختگی ایلمنیت در هماتیت در بخش بعدی محاسبه شده است.



شکل ۴ نمونه‌های سنگی منطقه‌ی مورد بررسی در مثلث طبقه‌بندی سنگ‌های الترامافیکی هورنبلنددار [۲] در گستره‌ی پیروکسنیت و هورنبلند پیروکسنیت قرار گرفته‌اند.

چرماک اضافه می‌شود (جدول ۱) که خود تابعی از فزونی فشار هنگام تبلور کانی است. لذا مشخص می‌شود که فشار لیتواستاتیک [سنگ ایستائی] هنگام تبلور پیروکسنتیت‌ها بالاتر از زمان تبلور گابروها بوده است.

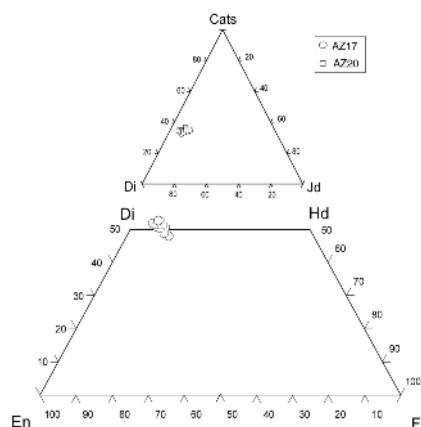
آمفیبیول: نتایج آنالیز آمفیبیول در نمونه‌های معرف در جدول ۱ آمده‌اند. کاتیون‌های این کانی بر اساس ۲۳ اکسیژن محاسبه شده است. مقدار  $\text{Fe}^{3+}$  از روش [۷] تعیین شده است. برای این کانی با سه نمودار از لیک [۸] نام چرماکیت و در یک مورد پارگازیت مشخص شده است (شکل ۶). لذا ترکیب آمفیبیول‌ها را در مثلث پارگازیت - چرماکیت - چرماکیت آهن دار پیاده کرده و معلوم شد ترکیبی حد وسط اعضای نهائی چرماکیت - پارگازیت دارند (شکل ۷). ضریب همبستگی مجموع قلیایی و آلومینیوم در پیکره‌ی چهار وجهی آمفیبیول‌ها برای بردار جانشینی پارگازیتی یک است و نمونه‌های آنالیز شده به خوبی راستای جانشینی پارگازیتی را در آمفیبیول‌ها نشان می‌دهند (شکل ۷). در مقایسه محتوای چرماکیتی این کانی در پیروکسنتیت‌ها از گابروها بالاتر است. در حالی که پارگازیت آهن دار در گابروها فعالیت بیشتری دارد (جدول ۱). این مسئله به احتمال زیاد به فشار تبلور بیشتر در پیروکسنتیت‌ها وابسته است.

اخیراً نامگذاری‌های جدیدی برای آمفیبیول‌های دارای منگنز بالا از سوی (IMA) انجمن بین المللی کانی‌شناسی صورت گرفته است [۹] ولی با توجه به مقدار پائین اکسید منگنز در آمفیبیول‌های مورد بررسی (حداکثر ۰/۲ درصد) از این رده‌بندی استفاده نشده است.

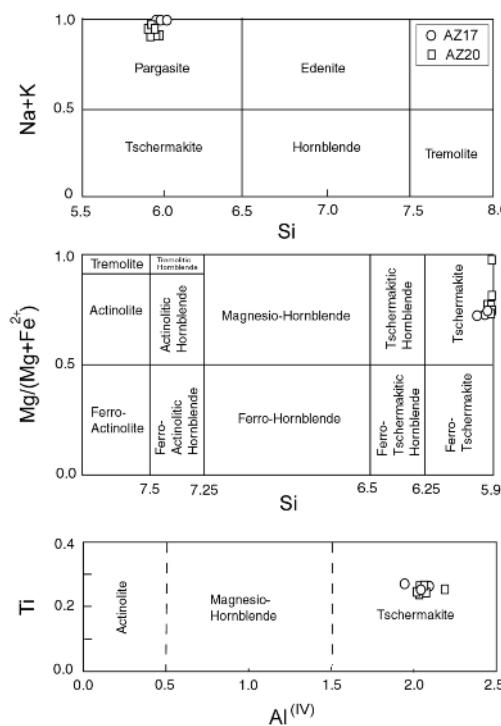
### کانی شیمی

پلازیوکلаз: کانی پلازیوکلاز در گابروها از آنورتیت غنی است ( $\text{An}_{90}\text{Ab}_{10}$ ) و در گسترده‌ی بیتونیت قرار می‌گیرد. برای محاسبه‌ی فعالیت این کانی از روش محلول جامد هولند و پاول [۵] استفاده شد، و کل آهن موجود به عنوان آهن سه ظرفیتی در نظر گرفته شده است. فعالیت آنورتیت بین ۰/۹۳ و ۰/۸۶ و فعالیت آلبیت در طیف ۰/۳۷-۰/۲۰ در تغییر است (جدول ۱). بین مقدار  $\text{Fe}^{3+}$  و فعالیت آنورتیت در کانی رابطه‌ی عکس وجود دارد. در مقابل بالاترین فعالیت آلبیت به نقطه‌ای با بیشترین مقدار آهن سه ظرفیتی وابسته است. هیچ نوع منطقه-بندی شیمیائی در این کانی مشاهده نشد که نشان دهنده‌ی وجود تعادل ترمودینامیکی هنگام تبلور کانی است.

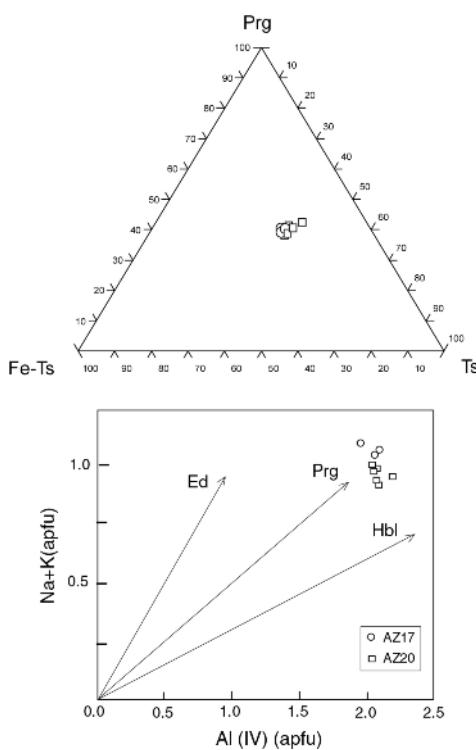
کلینوپیروکسن: فرمول ساختاری کلینوپیروکسن‌ها بر اساس ۶ اکسیژن و ۴ کاتیون محاسبه شد. برای براورد آهن سه ظرفیتی از فرض  $\text{Fe}^{3+}=\text{Na}-\text{Al}-\text{Cr}$  استفاده شده است [۶]. ترکیب شیمیائی این کانی در پیروکسنتیها و گابروها از دیوپسید غنی است و با در نظر گرفتن جانشینی چرماک ترکیبی بین دیوپسید - کلسیم چرماک - هدنبرژیت دارد (شکل ۵). فعالیت میانگین برای اعضای نهائی این کانی عبارت است از:  $\text{Di}_{0.68}\text{Hd}_{0.15}\text{CaTs}_{0.12}$ . عدد منیزیم برای این کانی بین ۰/۸۱-۰/۸۷ در تغییر است. مقدار کرم در این کانی صفر یا در حد چند هزارم است که در گسترده‌ی خطای اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در این کانی‌ها  $\text{Na} < \text{Al}$  است باید آن‌ها را جزء پیروکسنهای کلسیک رده‌بندی کرد و مقدار  $\text{Fe}^{3+}$  در پیکره‌ی چهار وجهی آن صفر در نظر گرفته می‌شود. با افزایش مقدار  $\text{Al}^{(VI)}$  در ساختار کانی فعالیت کلسیم



شکل ۵ ترکیب شیمیائی کلینوپیروکسن‌ها در ذوزنقه‌ی Di-Hd-En-Fs و مثلث Di-Jd-Cats پیاده شده‌اند. کلینوپیروکسن‌های آنالیز شده از گابروها و پیروکسنتیت‌ها از عضو نهائی دیوپسید و کلسیم - چرماک غنی هستند.



شکل ۶ مجموع کاتیون‌های قلیائی آمفیبول‌های منطقه از مقدار مشخص شده برای چرماتیت بیشتر بوده و آن‌ها را در گستره‌ی پارگازیت قرار می‌دهد [۸]. آمفیبول‌ها با در نظر گرفتن نسبت کاتیونی  $Mg/(Mg + Fe)$  در گستره‌ی چرماتیت قرار گرفته‌اند. ترکیب شیمیائی آمفیبول‌ها در نمودار مقادیر کاتیونی  $Ti$  در برابر  $Al$  پیکره‌ی چهار وجهی [۸] نیز از نوع چرماتیت مشخص می‌شود. این نمودار بر پایه میزان آلومینیوم پیکره‌ی چهار وجهی، کانی‌های چرماتیت، منیزیو-هورنبلند و آکتینولیت را از هم جدا می‌کند.



شکل ۷ با در نظر گرفتن ترکیب شیمیائی بسط داده شده سه عضو نهائی  $Prg-Ts-FeTs$  ترکیب آمفیبول‌های منطقه حد واسط پارگازیت - چرماتیت مشخص شده است. نمودار بردارهای جانشینی ادنیتی، پلرگازیتی و هورنبلندی بر اساس مقادیر کاتیونی قلیائی نسبت به آلومینیوم چهار وجهی. نمونه‌های آمفیبول آنالیز شده به وضوح راستای جانشینی پارگازیتی را در آمفیبول‌ها نشان می‌دهند.

کاتیونی بهره گرفته شد. ترکیب شیمیائی کانی آمفیبول به طور گستردگی برای تعیین فشار سنگ‌های آذرین و دگرگونی به کار می‌رود (مانند [۱۵، ۱۶]). با استفاده از مقدار کاتیونی آلومینیوم کل موجود در ساختار آمفیبول درجه‌بندی‌های مختلف [۱۹-۲۱] فشاری بین  $7-9 \pm 1$  کیلوبار برای پیروکسنیت‌ها برآورد شده است (جدول ۲). بر این اساس فشار برای تبلور آمفیبول در گابروها  $7-8 \pm 1$  کیلوبار بوده است. با بهره‌گیری از فشارسنگی کلینوپیروکسن - پلازیوکلاز - کوارتز [۲۰] فشاری معادل  $8-9$  کیلوبار در دمای فرضی  $800$  درجه سانتی‌گراد برای تبلور گابروها به دست آمد.

برای اندازه‌گیری دمای تبلور گابروها مورد بررسی از واکنش پیوسته‌ی بین پلازیوکلاز و آمفیبول [۲۱] استفاده شد. با استفاده از جانشینی ادنیت - ریشتربیت در آمفیبول‌ها در حضور پلازیوکلاز دمای معادل  $950-1000 \pm 40$  درجه‌ی سانتی‌گراد در فشار فرضی  $10$  کیلوبار به دست آمد (جدول ۲). از طریق دماسنگی دو فلدسپار [۲۲] برای سنگ‌های گابروئی دماهای سنگ‌ها اندازه‌گیری شدند. با بهره‌گیری از این دماسنگی ترسیمی دمای بین  $700-800$  درجه سانتی‌گراد برای رسیدن به تعادل بین آلبیت و آنورتیت در سنگ‌های مورد بررسی برآورد شد (شکل ۸).

روش دما - فشار سنگی بر مبنای اکسیدهای آلومینیوم و تیتانیم در آمفیبول [۲۳] برای سنگ‌های مافیک - اولترامافیک تازه کند به کار رفت (شکل ۹). بر این اساس دمای برابر  $900$  درجه در فشار حدود  $8-10$  کیلوبار نتیجه شده است (جدول ۲). نمونه‌های پیروکسنیتی در فشار بالاتری نسبت به نمونه‌های گابروئی متبول شده‌اند. نتایج دما - فشارسنگی در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

مقدار آب برای این کانی‌ها بین  $1/5$  تا  $1/2$ % اندازه‌گیری شده است. درصد فلوئور در آمفیبول‌های موجود در گابروها بالاتر از مقدار آن در پیروکسنیت‌هاست (حدود  $0/8$  در برابر  $0/03$ ). کاتیون‌های آمفیبول‌ها به روش‌های پیشنهاد شده توسط Al [۱۰] در پیکره‌های فضایی توزیع شده‌اند. به طوری که Al [۱۰] در  $1/95-2/195$  و  $0/462-0/257$  در  $(^{IV})$  Al [۱۹] در طیف  $0/06-0/13$  است. مقدار فضای خالی (vacancy) در  $A$  پیکره‌ی A بلوری این کانی معمولاً در حدود  $0/06$  apfu می‌باشد. فعالیت اعضای نهائی در آمفیبول در این مجموعه سنگی با استفاده از  $[12-14]$  به صورت غالب به قرار زیر تعیین شده است:

$Ts_{412-494} Fe-Parg_{93-234} Fe-Ts_{105-168}$  فعالیت چرماکیت با مقدار  $Al^{(IV)}$  رابطه‌ی مستقیم و با مقدار کاتیون Si در پیکره‌ی چهار وجهی،  $Al^{(VI)}$  و سدیم در پیکره‌ی A رابطه‌ی معکوس دارد. فعالیت پارگازیت تابعی از مقدار سدیم در پیکره‌ی M4 است (جدول ۱). فعالیت ادنیت با مقدار کلسیم افزوده می‌شود.

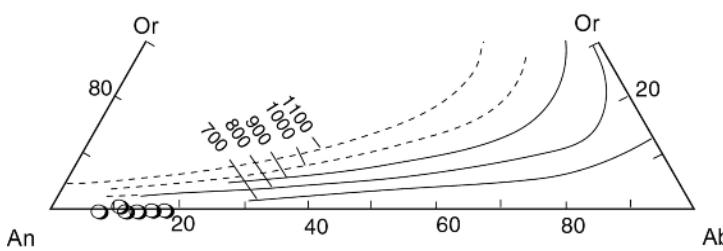
هماتیت: اکسید فلزی آنالیز شده در نمونه‌ی پیروکسنیت‌ها از نوع هماتیت است و تقریباً  $2$  کاتیون آن در برابر  $3$  اکسیژن، از  $Fe_2O_3$  تشکیل شده است ( $1/91-1/98$ ). مقدار اکسید تیتانیم در این کانی بیش از  $0/3$ % نیست. با در نظر گرفتن مدل اختلاط ایده آل برای این کانی فعالیت هماتیت بین  $0/98-0/92$  در تغییر است.

#### دما - فشارسنگی

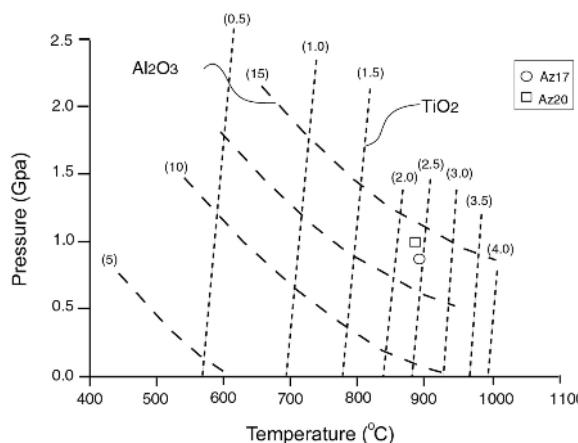
به منظور برآورد شرایط دما و فشار تبلور گابروها و پیروکسنیت‌های منطقه‌ی تازه کند کلیپر از روش‌های متعدد تبادل

جدول ۲ نتایج برآورد دما و فشار برای تبلور سنگ‌های گابروئی و پیروکسنیتی منطقه‌ی مورد بررسی.

دماسنگی دو فلدسبار	فشارسنگی کلینوپیروکسن - پلازیوکلاز - کوارتز	دما - فشارسنگی اکسیدهای الومینیوم و آمفیبول - پلازیوکلاز	فشارسنگی از طریق محتوای آلومینیوم موجود در آمفیبول
[۲۴]	[۲۲]	[۲۵]	[۲۱]
$800 =$ دما درجه	$10 =$ فشار کیلوبار دما $\pm 40$ درجه	$1 \pm$ فشار کیلوبار	[۲۰]
$700-800$ تعداد=۶	$7/3-9/2$ تعداد=۶	$970-1030$ تعداد=۳	$7-7/3$ تعداد=۳
		$8=$ کیلوبار دما $\pm 40$ درجه	$8/5-8/8$ تعداد=۳
		$10=$ کیلوبار دما $\pm 80$ درجه	$8/9-8/2$ تعداد=۶
			$8/2-8/7$ تعداد=۶
			$8/8-9/4$ تعداد=۶



شکل ۸ تعیین دمای دو فلدسپار در نمونه گابروئی AZ17 از روش دماستنجی دو فلدسپار [۲۴] برای فرایند یاد شده دما بین ۷۰۰-۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ارزیابی می‌شود.



شکل ۹ دما- فشارستنجی با تک کانی آمفیبول بر اساس مقدار اکسیدهای آلومینیوم و تیتانیم در این کانی [۲۵]. فشار در حدود ۹-۱۱ کیلوبار و دما نزدیک به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد برای تبلور آمفیبول‌های منطقه ارزیابی می‌شود. فشار تبلور آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های اولترامافیک در حدود ۲ کیلوبار بالاتر از فشار تشکیل گابروهاست.

(كسر مولی نزدیک به یک برای این کانی)، کمینه دمای تبلور هماتیت در پیروکسنیت‌های تازه کند حدود ۶۷۰ درجه سانتی‌گراد بدست آمده است. طی فرایندهای نیمه جامد و با ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد افت دما اولین تیغه‌های ایلمنیت در دمای حدود ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد از متن کانی هماتیت جدا شده‌اند (شکل ۱۰).

**تعیین گریزندگی اکسیژن**  
از جمله شرایط ترمودینامیکی تشکیل سنگ‌ها علاوه بر دما و فشار، گریزندگی گازهای است. برای تعیین گریزندگی اکسیژن به عنوان اصلی ترین فاز گازی در کنار هیدروژن در سنگ‌های دارای کانی‌های آبدار، استفاده از ترکیب شیمیائی کانی‌های اکسید فلزی و آمفیبول معمول است (مانند: [۳۱، ۳۰]). در این پژوهش از نمودارهای تجربی برای تعیین این پارامتر کمک گرفته شده است. از بررسی‌های تجربی در مورد اثر گریزندگی اکسیژن بر روی ترکیب شیمیائی آمفیبول [۳۲] برای برآورد این پارامتر استفاده شده است (شکل ۱۱). بر این اساس

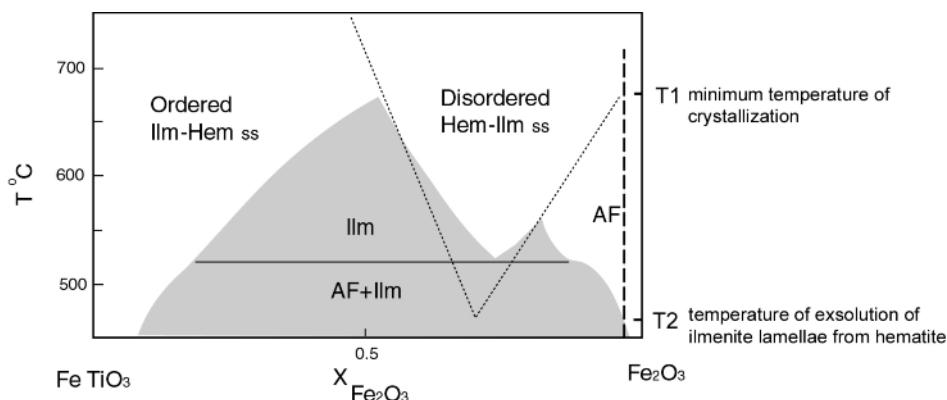
### کانی‌های اکسید Fe-Ti

بررسی کانی‌های اکسید و سولفید فلزی مفید است زیرا اغلب رابطه‌ی منظمی بین انواع مختلف کانی‌های اکسیدی و ترکیب‌های متفاوت آن‌ها و کانی‌های سیلیکاتی همزیست و آبگون‌های همراه برقرار است [۲۴]. سری‌های محلول جامد ایلمنیت - هماتیت میل به آمیختگی ندارند که بر اساس داده‌های تجربی در نمودارهای دما- ترکیب شیمیائی مشخص شده است [۲۵، ۲۶]. نظم ساختاری و مغناطیسی در این محلول جامد وجود دارد که توسط بارتون [۲۷] محاسبه شده است. متاسفانه شکل دقیق این ناامیختگی به طور جزئی شناخته شده نیست ([۲۹، ۲۸]).

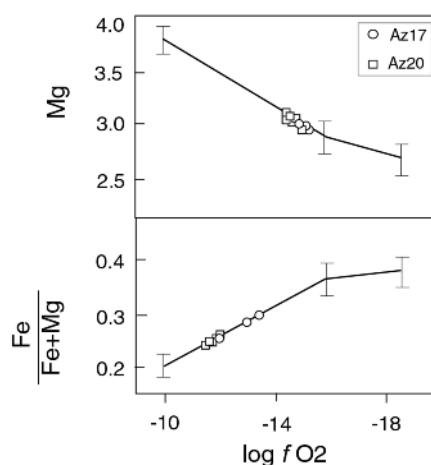
با توجه به مشاهده‌ی تیغه‌های اکسلوشنی ایلمنیت در هماتیت پیروکسنیت‌های منطقه از منحنی سولوس بین این دو عضو نهائی برای تعیین دمای تبلور استفاده شده است (شکل ۱۰). نمودار T-X [۲۹] برای این منظور به کار رفته و با توجه به غنی بودن کانی‌های اکسید فلزی آنالیز شده از هماتیت

سنگ‌های مافیک - اولترامافیک که به روش تجربی مشخص شده است [۳۲] برای تعیین این فاکتور بهره گرفته شد (شکل ۱۲). بر این اساس مجموعه آمفیبول + کلینوپیروکسن + هماتیت (+پلازیوکلاز) که در نمونه‌های پیروکسنیتی تازه کند مشاهده می‌شود در دمای ۷۵۰-۹۰۰ پایدار بوده و بیشترین مقدار  $\log f_{\text{O}_2}$  احتمالی هنگام تبلور این مجموعه از -۸ تا -۱۴ در تغییر بوده است.

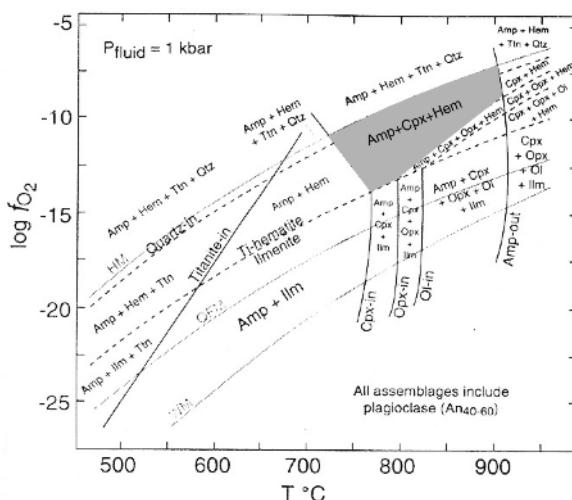
لگاریتم گریزندگی اکسیژن برابر ۱۲- تا ۱۵- برای پیروکسنیت-ها و گابروهای مورد بحث بست آمد این گسترهٔ عدد مذکور برای پیروکسنیت‌ها بزرگتر است. بررسی‌های تجربی اخیر تایید می‌کند که  $f_{\text{O}_2}$  ماقماً به مقدار منیزیم آمفیبول وابسته بوده [۳۳، ۳۴] و این برآورد نزدیک به واقعیت است. از طرف دیگر از گستره‌های پایداری مجموعه‌های کانیائی در



شکل ۱۰ نمودار T-X  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  برای نشان دادن منحنی سولوس بین هماتیت - ایلمنیت [۲۹]. به کمک این منحنی و کسر مولی هماتیت در سنگ‌های بررسی شده کمینه دمای تبلور هماتیت در نمونه‌های پیروکسنیت از محلول جامد بی‌نظم هماتیت - ایلمنیت، تعیین شده است ( $T_1$ ). همچنین با توجه به وجود تیغه‌های اکسولوشنی ایلمنیت در کانی هماتیت که با تصویر BSE مشخص شده، دمای جدایش این تیغه‌ها از کانی میزبان (هماتیت) طی فرایندهای ساب - سالیدوس مشخص شده است ( $T_2$ ). از نماد AF برای محلول جامد غنی از هماتیت استفاده شده است [۲۶]. خط چین ترکیب شیمیائی هماتیت را در پیروکسنیت‌های منطقه نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ نمودار ترکیب آمفیبول‌ها نسبت به گریزندگی اکسیژن که نشانگر تاثیر گریزندگی اکسیژن روی ترکیب آمفیبول‌هاست. این نمودار از بررسی‌های تجربی [۳۶] استخراج شده است. ترکیب آمفیبول‌های آنالیز شده در نمونه‌های پیروکسنیتی برای تعیین تقریبی گریزندگی اکسیژن ماقماً به کار رفته است. بر این اساس هنگام تبلور آمفیبول‌ها گریزندگی ماقماً بین ۱۲- تا ۱۵- ارزیابی می‌شود. لگاریتم گریزندگی اکسیژن در ماقماً هنگام تبلور آمفیبول‌ها در پیروکسنیت‌ها نسبت به گابروها عدد بزرگتری بوده است.



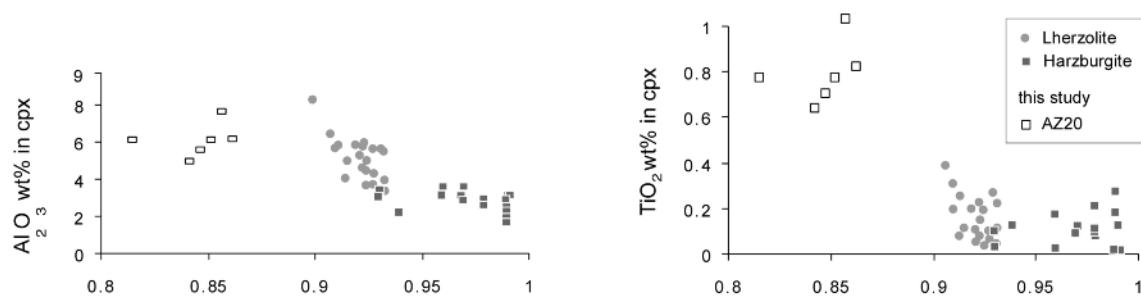
شکل ۱۲ نمودار  $\log f\text{O}_2$  نسبت به دما که گستره‌ی پایداری مجموعه‌های کانیائی مختلف در سنگ‌های مافیک را در شرایط تجربی مشخص کرده است [۳۶]. از این نمودار دو نتیجه بدست می‌آید: ۱) با توجه به مشاهده‌ی مجموعه آمفیبیول+کلینوپیروکسن+هماتیت (+ پلازیوکلاز) در نمونه اولترامافیک AZ20 دمای ۷۵۰-۹۰۰ درجه سانتی‌گراد برای تبلور سنگ ارزیابی می‌شود (گستره‌ی هاشور خورده). ۲) گریزندگی نسبی اکسیژن در ماگما در حدود ۸-۱۴ است.

غنى شده و يا آلايش با مواد پوسته‌اي است. پيروكسنيتهاي منطقه، بي‌هنجراري منفي از Th, Nb, P, Zr و غنى‌شدگي از Rb, Ba, U, K, Sr, Ti در ترکيب کانی‌شناسي آنها وابسته است [۳۸].

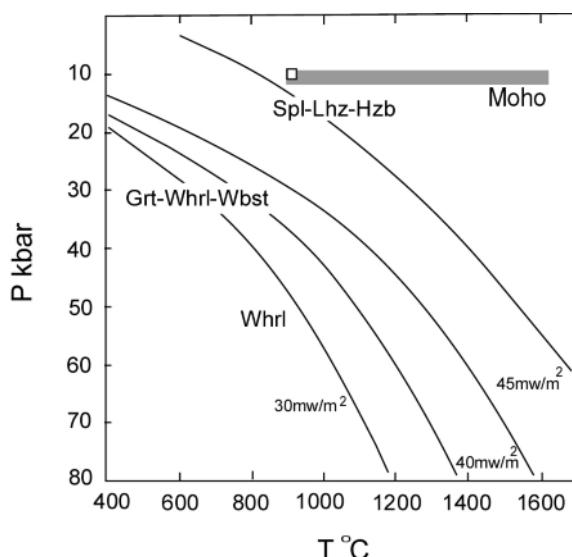
با در نظر گرفتن فشار محاسبه شده به روش‌های گوناگون برای تشكيل پيروكسنيتهاي تازه کند و چگالي سنگ‌هاي پوسته (فشار ليتواستاتيک) [سنگ ايستاسي] عمقی معادل ۳۰-۲۷ کيلومتر برای تبلور اين سنگ‌ها ارزیابی می‌شود. با پياده کردن ميانگين دما و فشار تشكيل بر نمودار PT، مشخص شد که، اين سنگ‌ها از عمقی نزديک مرز موهو ريشه گرفته‌اند (شکل ۱۴).

در خصوص محيط ژئوتكتونيكی اين مجموعه احتمال‌هاي مطرح عبارتند از: بقایای افيوليتي‌هاي وابسته به پوسته‌ي اقيانوسی پالئوتيس دوم، فعالیت‌هاي درون صفحه‌اي و پس از برخورد قاره - قاره، همبافت‌هاي حلقوی با نقاط داغ داخل صفحه‌اي است [۳۸]. با توجه به عدم تشابه ژئوشيمياي مجموعه‌ی سنگی مورد بحث با دنباله‌ی افيوليتي، دو مورد بعدی از مقبوليت بيشتری برخوردارند. با در نظر گرفتن کانی‌سازی مگنتیت همراه با پيروكسنيتها، به نظر می‌رسد ارتباط آنها با مجموعه‌های حلقوی و نقاط داغ داخل صفحه‌اي دارای شواهد مثبت بيشتری است [۳۸].

تعين نسبی نرخ ذوب بخشی و عمق تشكيل سنگ‌ها نمودار تغييرات دو اكسيد اصلی شامل  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  نسبت به  $\text{Mg}^{\#}$  در کلینوپيروكسن‌هاي موجود در نمونه‌هاي پيروكسنيتي برای اين سنگ‌ها ترسیم شد (شکل ۱۳). اين نمونه‌ها با دو سري داده‌ی وابسته به کلینوپيروكسن‌هاي لرزوليتی و هارزبورزیتی نوعی [۳۷-۳۵] مقایسه شده‌اند. از آنجاکه Al عنصر سازگاري است، فقط در صورت نرخ بالاي ذوب بخشی وارد گدازه شده و در نتیجه تفاله از اين عناصر تهی شود. به همين دليل مقدار اين عناصر در لرزوليت‌ها كه ذوب بخشی با نرخ پائين را تجربه کرده‌اند بالاتر از هارزبورزیت‌هاست. چنانکه در شکل ۱۳ نشان می‌ديد مقدار اين اكسيدها در پيروكسنيتهاي تازه کند تقریباً برابر با نمونه‌هاي لرزوليتی است که نشان می‌دهد اين سنگ‌ها تفاله‌اي هستند که به مقدار کم دستخوش ذوب بخشی شده‌اند. فروني اكسيد تيتانيوم در اين نمونه‌ها نسبت به سنگ‌هاي نوعی لرزوليتی وابسته به ماهیت اوليه‌ی سنگ خاستگاه بوده و بيانگر عمق زياد تشكيل است. بررسی‌هاي ژئوشيمياي قبلی بر روی اين مجموعه نشان داده است که مجموعه‌ی گابروئي دارای سرش آهکي قليابي با پتاسييم بالا و شوشونيتی بوده و دارای بي‌هنجراري منفي مشخصی از Nb, Ta هستند [۳۸]. غنى‌شدگي آنها از LILEs بيانگر نرخ ذوب بخشی اندک از خاستگاه گوشته‌ای



شکل ۱۳ نمودار تغییرات اکسیدهای آلومینیوم و تیتانیم نسبت به عدد منیزیم در کلینو پیروکسنها. رفتار و مقدار این اکسیدها در پیروکسنیتهای تازه کند تقریبا مشابه نمونه های لرزولیتی است.



شکل ۱۴ نمودار دما- فشار که در آن علاوه بر گرادیان زمین گرمائی نوع سنگهای الترامافیک به سمت اعماق زمین مشخص شده است. با توجه به این نمودار و دما و فشار براورد شده برای پیروکسنیتهای مورد بررسی (علامت مریع) به نظر می رسد که ماغماهای سازنده این سنگها از گسترهای نزدیک به مزموهو ریشه گرفته است.

رابطه‌ی مستقیم و با مقدار کاتیون Si در پیکره‌ی چهار وجهی سایت<sup>(VI)</sup> Al و سدیم در پیکره‌ی A رابطه‌ی معکوس دارد. ۴- فعالیت پارگازیت تابعی از مقدار سدیم در پیکره‌ی M4 است ۵- فعالیت ادنیت با مقدار کلسیم افزوده می‌شود. ۶- فعالیت اسپلیت با روش‌های گوناگون برای پیروکسنیت- دما - فشارسنجی با روش‌های سانتی‌گراد را نتیجه می‌دهد. چنین دما های مورد بررسی فشاری در حدود  $9-10 \pm 1$  kbar و دمای  $900 \pm 100$  °C درجه‌ی سانتی‌گراد را خاستگاه سنگ‌ها و فشاری، عمق معادل ۲۷-۳۰ km را برای خاستگاه سنگ‌ها پیشنهاد می‌کند. برای گابروهای همزیست با پیروکسنیت‌ها، فشار ۷-۸ کیلوبار (اندکی کمتر از فشار تبلور پیروکسنیت‌ها)

**برداشت**  
ترکیب آمفیبول در گابرو و کلینوپیروکسنیتهای منطقه‌ی تازه کند کلیبر، چرماکیت تا پارگازیتی است. کلینوپیروکسن از دیوپسید غنی بوده و مقدار هدنبرژیت و کلسیم چرماک در آن قابل توجه است. از بررسی دقیق‌تر چگونگی توزیع کاتیون‌ها در پیکره‌های بلوری و فعالیت اعضای نهائی کانی‌ها، موارد زیر نتیجه گرفته شده‌اند: ۱- بین مقدار  $Fe^{3+}$  و فعالیت آنورتیت در  $Al$  پلازیوکلаз رابطه‌ی عکس وجود دارد. ۲- با افزایش مقدار  $Al$  در ساختار کلینوپیروکسن فعالیت کلسیم چرماک اضافه می‌شود. ۳- فعالیت چرماکیت در آمفیبول با مقدار  $Al$  (IV)

*amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association*", Commission on New Minerals and Mineral Names. American Mineralogist (1997) 82: 1019–1037.

[9] Mogessie A., Ettinger K., Leake B.E., Tessadri R., "AMPH-IMA97: a hypercard program to determine the name of an amphibole from electron microprobe and wet analyses", Computers and Geosciences (2001) 27:1169–1178.

[10] Hawthorne F.C., "The crystal-chemistry of the amphiboles", The Canadian Mineralogist (1983) 21: 173-480.

[11] Holland T.J.B., Richardson S.W., "Amphibole zonation in metabasites as a guide to the evolution of metamorphic conditions", Contributions to Mineralogy and Petrology (1979) 70: 143-159.

[12] Kohn M.J., Spear F.S., "Empirical calibration of geobarometers for the assemblage garnet + hornblende + plagioclase + quartz", American Mineralogist (1989) 74:77-84.

[13] Kohn M.J., Spear F.S., "Two new barometers for garnet amphibolites with applications to southeastern Vermont", American Mineralogist (1990) 75:89-96.

[14] Triboulet C., Audren C., "Controls on P-T-t deformation path from amphibolite zonation during progressive metamorphism of basic rocks (estuary of the River Vilaine, South Brittany, France)", Journal of Metamorphic Geology (1988) 6: 117–133.

[15] Moazzen M., Droop G.T.R., "Application of mineral thermometers and barometers to granitoid igneous rocks: the Etive Complex, W Scotland", Mineralogy and Petrology (2005) 83:27-53

[16] Puga E., Nieto J.M., De Federico A.D., "Contrasting P-T paths in eclogites of the Betic Ophiolitic Association, Mulhacen Complex, southeastern Spain", The Canadian Mineralogist (2000) 38:1137–1161.

[17] Hammarstrom J.M., Zen E-an., "Aluminum in hornblende: an empirical geobarometer", American Mineralogist (1986) 71:1297-1313.

[18] Hollister L.S., Grissom G.C., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.B., "Confirmation of the empirical correlation of aluminum in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons", American Mineralogist (1987) 72: 231-239.

برآورد شده است. با توجه به روابط صحرائی و احتمال حاصل شدن هر دو گروه سنگی از ماقمای مشترک، به نظر می‌رسد گابروها در سطوح بالاتری از پیروکسنیت‌ها متبلور شده‌اند. Log f O<sub>2</sub> در این سنگ‌ها به‌طور متوسط کمیت ۱۱-۱ را به دست می‌دهد. حداقل دمای تبلور هماتیت ۶۷۰ °C بوده و تیغه‌های اکسلوشنی ایلمنیت در دمای حدود ۴۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد شروع به جدا شدن از کانی میزبان کرده‌اند. پیروکسنیت‌های تازه کند تفاله‌ای شبیه لرزولیتی هستند و دستخوش ذوب بخشی با نرخ پائین شده‌اند.

#### مراجع

- [1] Meherpartou M., Nazer N., Emami M.H., "1:100000 geological map of Kaleybar", Geological Survey of Iran (1999) no. 5467.
- [2] Streckeisen A., "To each plutonic rock its proper name", Earth Sciences Review (1976) 12: 1-33.
- [3] Holland T.J.B., Powell R., "An internally consistent thermodynamic dataset for phase of petrological interest", Journal of Metamorphic Geology (1998) 16:309-343.
- [4] Soto J.I., Soto V.M., "PTMAFIC: software package for thermometry, barometry and activity calculations in mafic rocks using an IBMcompatible computer", Computers and Geosciences (1995) 21, 619–652.
- [5] Holland T.J.B., Powell R., "Plagioclase feldspars:activity- composition relations based upon Darken's quadratic formalism and Landau theory", American Mineralogist (1992) 77:53-61.
- [6] Cawthon R., Collerson K.D., "The recalculation of pyroxene end-member parameters and the estimation of ferrous and ferric iron content from electron microprobeanalyses", American Mineralogist (1974) 59: 1203–1208.
- [7] Holland T.J.B., Blundy J., "Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry", Contributions to Mineralogy and Petrology (1994) 116:433-447.
- [8] Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G., "Nomenclature of

- Behrens H., Roux J., Neuville D., Siemann M., (2006) (Eds.) Quantification of dissolved H<sub>2</sub>O in silicate glasses using confocal microRaman spectroscopy. *Chemical Geology* (2006) 229: 96-112.
- [32] Spear F.S., "An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite", *American Journal of Sciences* (1981) 281:697-734.
- [33] Scaillet B., Evans B.W., "The 15<sup>th</sup> of June eruption of Mount Pinatubo, I, Phase equilibria and pre-eruption P-T<sub>fO2-fH2O</sub> conditions of the dacite magma", *Journal of Petrology* (1999) 40, 381-411.
- [34] Pichavant M., Martel C., Bourdier J.-L., Scaillet B., "Physical conditions, structure and dynamics of a zoned magma chamber: Mt. Pelée (Martinique, Lesser Antilles Arc)", *Journal of Geophysical Research* (2002) 107p.
- [35] Cannat M., Seyler M., "Transform tectonics metamorphic plagioclase and amphibolization in ultramafic rocks of the Vema transform fault (Atlantic Ocean)", *Earth and Planetary Science Letters* (1995) 133:283-298.
- [36] Ross K., Elthon D., "Extreme incompatible trace-element depletion of diopside in residual mantle from south of the Kane Fracture Zone", In: Karson J.A., Cannat M., Miller D.J., Elthon D. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Project Scientific Results* 153. ODP, College Station, (1997) TX, 277-284.
- [37] Bonatti E., Peyve A., Kepezhinskas P., Kurentsova N., Seyler M., Skolotnev S., Udintnev G., "Upper mantle heterogeneity below the Mid-Atlantic Ridges, 0-15 °N", *Journal of Geophysical Research* (1992) 97:4461-4476.
- [۳۸] مجرد م.، حسین زاده ق، مؤید م، "کانی شناسی، رئوژیمی و پترولوجی مجموعه مافیک - اولترامافیک کوههای هشت سر (جنوب کلیبر - شمالغرب ایران)"، مجموعه مقالات هفدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی شناسی ایران، دانشگاه بولنی همدان (۱۳۸۸).
- [19] Johnson M.C, Rutherford M.J., "Experimental calibration of the aluminium – in hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rocks", *Geology* (1989) 17: 837-841.
- [20] Ellis D.J., "Osumilite-sapphirine-quartz granulites from Enderby Land, Antarctica: P-T conditions of metamorphism, implications for garnet-cordierite equilibria and the evolution of the deep crust", *Contributions to Mineralogy and Petrology* (1980) 74: 201-210.
- [21] Holland T.J.B., Blundy J., "Non-ideal interactions in calcic amphibole and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry", *Contributions to Mineralogy and Petrology* (1994) 116: 433-447.
- [22] Kroll H., Evangelakis C., Voll G., "Two-feldspar geothermometry: a review and revision for slowly cooled rocks", *Contribution to Mineralogy and Petrology* (1993) 114:510-518.
- [23] Ernst W.G., Liu J., "Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-content of calcic amphibole in MORB—a semiquantitative thermobarometer", *American Mineralogist* (1998) 83: 925-969.
- [24] Spear F.S., "Metamorphic phase equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths", *Mineralogical Society of America Monoograph Series* 1(1993) 799 p.
- [25] Lindsley D.H. "Delimitation of the hematite-ilmenite miscibility gap", *Geological Society of America Bulletin* (1973) 84:657-662.
- [26] Spencer K.J., Lindsley D.H., "A solution model for coexisting iron-titanium oxides", *American Mineralogist* (1981) 66: 1189-1201.
- [27] Burton B.P., "The interplay of chemical and magnetic ordering", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* (1991) 25: 303-322.
- [28] Lindsley D.H., "Experimental studies of oxide minerals", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* (1991) 25:69-106.
- [29] Ghiorso M.S., Sack R.O., "Thermochemistry of the oxide minerals", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* (1991) 25: 265-302.
- [30] Carmichael I. S. E., "The redox states of basic and silicic magmas: A reflection of their source regions", *Contributions to Mineralogy and Petrology* (1991) 106: 129-141.
- [31] Behrens H., Gaillard F., "Geochemical aspects of melts: Volatiles and redox behavior", in