

بررسی کانی شیمی و شرایط حرارت و فشار تبلور سنگ‌های کوارتز-دیوریت منطقه تخت سلیمان در شمال باختر ایران

نوشته: رباب حاجی علی اوغلی*، احمد جهانگیری*، محسن مؤذن*، جابلز دروپ** و رومان بوسکو***

* دانشگاه تبریز، دانشکده علوم طبیعی، گروه زمین‌شناسی، تبریز، ایران

** دانشگاه علوم زمین، دانشگاه منچستر، انگلستان

*** مرکز تحقیقات علوم زمین، دانشگاه پتسدام، آلمان

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۱۱/۰۱

چکیده

سنگ‌های آذرین با ترکیب گرانودیوریت، مونزودیوریت، کوارتز-مونزودیوریت و کوارتز-دیوریت دارای برونزدهای کوچک و پراکنده در داخل مجموعه دگرگونی‌های تخت سلیمان هستند. مرز بین این سنگ‌ها با سنگ‌های دگرگونی قدیمی واضح است. پلاژیوکلاز و هورنبلند عمده‌ترین کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های آذرین مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. تیتانیت و اپیدوت در مقادیر فرعی حضور دارند. ترکیب شیمی کانی‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند، کینوپیروکسن و اپیدوت در سنگ‌های کوارتز-دیوریت توسط تجزیه EPMA تعیین شده است. مقادیر بالای Mg و Si همراه با مقادیر پایین Ti در ترکیب شیمی حاشیه کانی‌های آمفیبول، احتمالاً به دلیل تأثیر فرایندهای نیمه سالیدوس در طی سردشدگی این سنگ‌ها است. شرایط تعادلی دمای تبلور بر اساس ترکیب شیمی کانی‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول همزیست و همچنین با استفاده از حرارت سنخ مقدار Ti در ترکیب آمفیبول مشخص شد. شرایط فشار تبلور و ژرفای جایگیری ماگمای تشکیل دهنده بر اساس ترکیب شیمی کانی‌های کینوپیروکسن تعیین شد. مقادیر محاسبه شده دما و فشار تبلور سنگ‌های کوارتز-دیوریت مجموعه تخت سلیمان به ترتیب در حدود 750 ± 20 و 8 kbar به دست آمد. بر اساس ترکیب شیمی کانی‌های کینوپیروکسن تجزیه شده در سنگ‌های کوارتز-دیوریت، ترکیب ماگمای اولیه نیمه قلیایی با ویژگی‌های I-type تعیین می‌شود.

کلیدواژه‌ها: کمپلکس تخت سلیمان، دیوریت، ترکیب ماگما، ترکیب شیمی کانی‌ها، حرارت سنجی.

۱- مقدمه

پیچیده، توسط پژوهشگران مختلف در زون‌های ساختاری متفاوت ایران مرکزی (نوبی، ۱۳۵۵)؛ زون سلطانیه- میسو (افتخارنژاد، ۱۳۵۹) و محل برخورد سه زون ساختاری سندج- سیرجان، ایران مرکزی و البرز-آذربایجان (باباخانی و قلمقاش، ۱۳۷۱) واقع شده است؛ به‌تازگی Gilg et al. (2006) در مطالعات خود در منطقه تخت سلیمان، آن را به زون ساختاری سندج- سیرجان نسبت داده‌اند. انواع سنگ‌ها در کمپلکس تخت سلیمان عبارتند از سنگ‌های دگرگونی فیلیت، اسلیت، شیست سبز، اکتینولیت شیست، میکاشیست، گنیس، آمفیبولیت، کالک- سیلیکات و متاولترامافیک و انواع سنگ‌های آذرین شامل گرانیتویدهای S-type، گرانیتویدهای I-type و کوارتز-دیوریت.

سن انواع سنگ‌های دگرگونی و آذرین مجموعه تخت سلیمان تا حال به‌طور دقیق مشخص نشده است. سن پرکامبرین نسبت داده شده به سنگ‌های دگرگونی (باباخانی و قلمقاش، ۱۳۷۱)، بر اساس شواهد فسیل‌شناسی، چینه‌شناسی و ترکیب سنگ‌شناسی است. به تازگی Stockli (2004) با استفاده از سن‌یابی زیرکن (U/Pb)، سن نفوذ گنیس‌های گرانیتی ماه‌نشان را ۵۶۰ میلیون سال پیش تعیین کرده است. علوی و همکاران (۱۳۶۱) سنگ‌های گرانیتویدی منطقه تکاب را به پرکامبرین (معادل با گرانیت دوران) نسبت داده‌اند. باباخانی و قلمقاش (۱۳۷۱)، سن نسبی سنگ‌های آذرین کمپلکس تخت سلیمان را مزوزویک در نظر گرفته‌اند. با در نظر گرفتن این که در جنوب منطقه رسوبات ماسه‌سنگی لالون توسط توده‌های نفوذی قطع شده و رسوبات آهکی سازند قم به سن الیگومیوسن (با یک پی سنگ کنگلومرای روشن رنگ) در همبری بالایی این سنگ‌ها مشاهده می‌شوند، جایگیری سنگ‌های آذرین منطقه مورد مطالعه را می‌توان به زمان‌های پس از کامبرین تا پیش از الیگو-میوسن نسبت داد. برونزد سنگ‌های آذرین مورد مطالعه به صورت توده‌های نفوذی پراکنده و کوچک در داخل سنگ‌های آمفیبولیت و متابازیت مشاهده می‌شود. ترکیب اصلی

مجموعه تخت سلیمان در شمال خاور تکاب در حد فاصل عرض‌های جغرافیایی 30° و $30^{\circ}30'$ و 37° و $37^{\circ}30'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی 45° و 47° و 47° و 45° خاوری جای دارد. این مجموعه دارای طیف سنگ‌شناسی وسیعی از انواع سنگ‌های دگرگونی متابازیت، متابلیت، کالک-سیلیکات و متاولترامافیک و گرانیتویدهای I-type و S-type است. سن توده‌های آذرین متفاوت بوده و متعلق به زمان‌های مختلف از پرکامبرین (گنیس گرانیتویدی آق کند؛ Stockli, 2004)، تا تشریری (توده‌های گرانیتوید؛ حاجی علی اوغلی، ۱۳۸۶) است. سنگ‌های آذرین مورد مطالعه به صورت پراکنده در داخل سنگ‌های دگرگونی متابازیت برونزد دارند. در این پژوهش روابط سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی این سنگ‌ها بررسی شده و ترکیب شیمی کانی‌ها در سنگ‌های کوارتز-دیوریت توسط تجزیه EPMA مشخص شده است. شرایط حرارت و فشار تبلور سنگ‌های کوارتز-دیوریت در طی مرحله ماگمایی و شرایط نیمه سالیدوس با استفاده از ترکیب شیمی کانی‌های همزیست، تعیین شد. با در نظر گرفتن معیارهای کانی‌شناسی و ترکیب شیمی کانی‌های مافیک در سنگ‌های آذرین مورد مطالعه، منشأ این سنگ‌ها از نوع I-type ارزیابی می‌شود. ماهیت ماگمای تشکیل دهنده این سنگ‌ها با استفاده از ترکیب کانی‌های کینوپیروکسن در سنگ‌های کوارتز-دیوریت، نیمه قلیایی تعیین می‌شود. نتایج دقیق‌تر نیاز به مطالعات ایزوتوپی و داده‌های ژئوشیمیایی بیشتر در انواع سنگ‌های آذرین منطقه مورد مطالعه دارد. نتایج حاصل از این پژوهش همراه با نتایج مطالعات دقیق ژئوشیمیایی و سن سنجی ایزوتوپی انواع سنگ‌های آذرین و دگرگونی کمپلکس تخت سلیمان (حاجی علی اوغلی، ۱۳۸۶) در بازسازی جایگاه ژئودینامیک گذشته و حوادث تکتونو-ماگمایی منطقه تکاب در شمال باختر ایران مفید خواهد بود.

۲- زمین‌شناسی منطقه

کمپلکس تخت سلیمان از لحاظ داشتن ویژگی‌های ساختاری و سنگ‌شناسی

طی تبلور ماگمایی و شرایط سردشدگی نیمه سالیدوس (sub-solidus) است. کانی‌های تجزیه شده شامل پلاژیو کلاز، آمفیبول، کلینوپیروکسن، اپیدوت، تیتانیت و ایلمنیت است. نسبت Fe^{2+}/Fe^{3+} در کانی‌های فرومنیزین با استفاده از موازنه کاتیون‌ها در ساختمان کانی‌ها (Droop, 1987) محاسبه شده است. داده‌های معرف تجزیه میکروپروب کانی‌ها در سنگ‌های کوارتز-دیوریت در جدول ۱ نشان داده شده است. علائم اختصاری کانی‌ها از Kretz (1983) است.

۴-۱. فلدسپار: فرمول ساختمانی پلاژیو کلاز بر اساس ۳ کاتیون و ۱۸ اکسیژن محاسبه شده است (جدول ۱). ترکیب پلاژیو کلاز در مرکز ($X_{An}=0.55$) متفاوت از ترکیب حاشیه ($X_{An}=0.35$) است. مقدار K_2O در ترکیب کانی‌های پلاژیو کلاز تجزیه شده بسیار کم (۰/۰۳-۰/۰۵ a.p.f.u.) است. ترکیب شیمی کانی‌های پلاژیو کلاز تجزیه شده در سنگ‌های کوارتز-دیوریت تخت سلیمان در نمودار مثلثی Ab-An-Or، در محدوده لابرادوریت-آندزین واقع می‌شوند (شکل ۲).

۴-۲. آمفیبول: فرمول ساختمانی آمفیبول به ازای ۲۳ اکسیژن و ۱۳ کاتیون بدون منظور کردن کاتیون‌های Ca, Na, K (Leake et al., 1997) محاسبه شده است. جدول ۱ ترکیب شیمیایی کانی‌های آمفیبول معرف در سنگ‌های کوارتز-دیوریت منطقه تخت سلیمان را نشان می‌دهد. در نمودار (Na+K) (a.p.f.u.) در مقابل (Leake et al. (1997) Si(a.p.f.u.) ترکیب شیمی اغلب کانی‌های آمفیبول در محدوده چرماکیت و هورنبلند واقع می‌شوند (شکل ۳). مقادیر بالای Si و Mg همراه با مقادیر کم Na و Al در ترکیب اکتینولیت در اطراف هورنبلند و نیز لکه‌های پراکنده اکتینولیت در داخل کلینوپیروکسن، به دلیل تبلور نیمه سالیدوسی در شرایط سردشدگی است.

۴-۳. کلینوپیروکسن: ترکیب کلینوپیروکسن بر اساس ۴ کاتیون و ۶ اکسیژن محاسبه شده است $[M_1M_2T(2)]Al^{IV}$ در مقادیر (۰/۰۳-۰/۱۴ a.p.f.u.) در جایگاه چهاروجهی (T) است. تشکیل دهنده‌های Cr، Ti، Fe^۰ و Al^{VI} به همراه مقادیری از Mg جایگاه M_۱ ساختمان پیروکسن را پر کرده‌اند. تمامی Ca و Na به علاوه باقیمانده Mg در جایگاه M_۱ هستند.

ترکیب کلینوپیروکسن در هسته و حاشیه آن کم و بیش یکنواخت است. مقادیر Ti (۰/۰۰-۰/۲۶ wt%) و Na (۰/۲۲-۰/۷۲ wt%) است. ترکیب شیمیایی کانی‌های کلینوپیروکسن تجزیه شده در نمودار En-Fs-Di-Hd به‌طور اصلی اوژیت است (شکل ۴). ترکیب اعضای نهایی در کانی‌های کلینوپیروکسن تجزیه شده به صورت $Di_{0.23-0.77}Hd_{0.17-0.24}Ca-Ts_{0.00-0.20}$ است.

۴-۴. اپیدوت: فرمول اپیدوت برای ۸ کاتیون و ۱۲/۵ اکسیژن محاسبه شده است. تمام Fe در ترکیب اپیدوت‌های تجزیه شده به عنوان Fe³⁺ در نظر گرفته شده است. Al در مقادیر جزئی (۰/۰۶ a.p.f.u.) در جایگاه چهاروجهی قرار گرفته است. ترکیب اعضای نهایی کانی‌های اپیدوت تجزیه شده به طور متوسط $Cz_{13}Ep_{79}Fe-Ep_{11}$ است. نسبت $Al^{VI}/(Al^{VI}+Fe^{3+})$ در اپیدوت برابر با ۰/۶۹ است.

۴-۵. تیتانیت: تیتانیت کانی فرعی مهم در سنگ‌های کوارتز-دیوریت است. فرمول تیتانیت بر اساس ۳ کاتیون و ۵ اکسیژن محاسبه شده است $Si_2M_1M_2TO_4(O,OH,F)$ به‌طور ایده‌آل جایگاه چهاروجهی (T) را پر کرده است. مقدار Al_2O_3 کم، در حدود (۰/۰۶ a.p.f.u.) است. مقادیر کم Al^{VI} و Fe³⁺ (در جایگاه M_۲)، به دلیل جانشینی کاتیونی Ti است. جدول ۱ فرمول ساختاری و ترکیب شیمیایی کانی‌های تیتانیت در سنگ‌های کوارتز-دیوریت منطقه تخت سلیمان را نشان می‌دهد. ترکیب شیمی کانی‌های تیتانیت تجزیه شده در سنگ‌های مورد مطالعه کم و بیش یکنواخت است.

۴-۶. ایلمنیت: فرمول ایلمنیت بر اساس ۳ اکسیژن و ۲ کاتیون محاسبه شده است.

این توده‌ها گرانودیوریت، مونزودیوریت، کوارتز مونزودیوریت و کمتر گرانیت و کوارتزیدیوریت است (برای مثال توده‌های نفوذی کوچک کوارتزیدیوریت در اطراف روستای قره‌ناز، شکل ۱). سنگ‌های مورد مطالعه در نمونه‌های دستی به رنگ خاکستری روشن تا تیره بوده و دارای بافت دانه‌ای دانه متوسط تا دانه‌درشت هستند. پلاژیو کلاز+هورنبلند ± کوارتز عمده‌ترین کانی‌های این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. کانی‌های آمفیبول در نمونه‌های دستی مشخص بوده و طول آنها در بعضی از نمونه‌ها تا ۲ سانتی‌متر می‌رسد. کلینوپیروکسن محدود به سنگ‌های کوارتز-دیوریت بوده و اندازه آن تا چند میلی‌متر می‌رسد.

۳- مطالعات سنگ‌شناختی

هدف اصلی از مطالعه سنگ‌شناختی انواع سنگ‌های آذرین انتخاب نمونه‌های مناسب جهت مطالعات کانی شیمی و تعیین شرایط حرارت و فشار تبلور آنها است.

۳-۱. کوارتز-دیوریت: پلاژیو کلاز (۴۵-۳۵٪)، کلینوپیروکسن (۲۰-۱۵٪) و هورنبلند (۳۰٪) کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این سنگ‌ها هستند. اپیدوت و تیتانیت فازهای فرعی هستند. کوارتز در مجموعه کانی اغلب نمونه‌ها حضور دارد (>۷٪). پلاژیو کلاز در اندازه ۴ میلی‌متر دارای بافت پویکلیتیک با میان‌بارهای فراوان از کلینوپیروکسن است. اندازه کانی‌های کلینوپیروکسن همزیست با پلاژیو کلاز با بافت دانه‌ای تا ۰/۳ میلی‌متر می‌رسد. برخی از بلورهای کلینوپیروکسن ماکل دوقلویی دارند. کلینوپیروکسن در حاشیه و نیز به موازات رخ به آمفیبول (اورالیت) تجزیه شده است. آمفیبول ماگمایی در بافت دانه‌ای به رنگ سبز-قهوه‌ای بوده و اندازه آن تا ۰/۲۵ میلی‌متر می‌رسد. اپیدوت ماگمایی در تعادل بافتی با کانی‌های پلاژیو کلاز در زمینه دانه‌ای مشاهده می‌شود. اپیدوت ثانویه به صورت لکه‌های پراکنده در داخل پلاژیو کلاز مشخص است. تیتانیت اولیه و شکل دار تا اندازه ۰/۳۵ میلی‌متر در زمینه دانه‌ای تشکیل شده است.

۳-۲. گرانودیوریت: مجموعه کانی‌های اصلی در این سنگ‌ها شامل پلاژیو کلاز (۵۰-۳۵٪)، فلدسپار قلیایی (۲۰-۷٪)، هورنبلند (۴۵-۱۰٪) و کوارتز (۳۰-۱۵٪) است. اپیدوت و تیتانیت شکل‌دار در مقادیر فرعی تشکیل شده‌اند. زیرکن، آپاتیت و کانی‌های تیره فازهای کمیاب هستند. بافت معمول در این سنگ‌ها دانه‌ای (گرانولار) دانه متوسط تا دانه‌درشت است. کانی هورنبلند دارای میان‌بار زیرکن و کانی‌های تیره است. اکتینولیت در شرایط نیمه سالیدوس در حاشیه هورنبلند تشکیل شده است. پلاژیو کلاز تا اندازه ۰/۴۵ میلی‌متر دارای ماکل پلی‌سننتیک است. فلدسپار قلیایی بی‌شکل تا اندازه ۰/۲ میلی‌متر در زمینه دانه‌ای مشاهده می‌شود.

۳-۳. کوارتز-مونزودیوریت: آمفیبول (۴۰-۱۰٪)، پلاژیو کلاز (۵۰-۴۵٪)، فلدسپار قلیایی (۱۵-۷٪) تشکیل دهنده‌های اصلی سنگ‌های کوارتز-مونزودیوریت هستند. آمفیبول تا اندازه ۰/۷۵ میلی‌متر دارای ماکل دوقلویی است. پلاژیو کلاز (۲/۵ میلی‌متر)، ماکل پلی‌سننتیک داشته و اغلب به کلسیت تجزیه شده است. تیتانیت تا اندازه ۰/۲ میلی‌متر در مقادیر فرعی است.

۴- ترکیب شیمیایی کانی‌ها

ترکیب کانی‌های آذرین در نمونه معرف از سنگ‌های کوارتز-دیوریت که روابط بافتی و کانی‌شناسی آن پیش‌تر به‌طور دقیق مشخص شده بود توسط تجزیه میکروپروب CAMECA-SX100 در GFZ پتسدام (آلمان) شناسایی شد. هدف از تجزیه میکروپروب کانی‌ها در انواع سنگ‌های آذرین کمپلکس تخت سلیمان، تعیین ترکیب شیمی کانی‌ها، ماهیت ماگمای اولیه، محاسبه فعالیت اعضای نهایی به منظور تخمین شرایط فشار و دمای تبلور سنگ‌ها و بررسی تحولات P-T این سنگ‌ها در

کوارتز-دیوریت با استفاده از مقدار Ti در هسته کانی‌های هورنبلند تجزیه شده بر اساس کالیبراسیون (Ottens, 1984) 760°C تعیین شد.

۴-۵. ترکیب ماگما

مقدار بالای fO_2 از ویژگی‌های ماگماهای با ترکیب I-type است. مقدار فوگاسیته اکسیژن در ترکیب ماگمای اولیه، با استفاده از ترکیب شیمی کانی‌های کلینوپروکسن تجزیه شده در سنگ‌های کوارتز-دیوریت در نمودار $\text{Na}+\text{Al}^{IV}$ در برابر $\text{Al}^{VI}+2\text{Ti}+\text{Cr}$ (Schweitzer et al., 1979) تعیین شد (شکل ۵). برخی از شواهد کانی‌شناسی ترکیب I-type گرانیتوئیدهای کمپلکس تخت سلیمان عبارتند از:

(۱) در سنگ‌های آذرین منطقه مورد مطالعه آمفیبول عمده‌ترین کانی مافیک است. آمفیبول فاز فرومنیزین اصلی در توده‌های آذرین I-type است در صورتی که بیوتیت در هر دو نوع گرانیتوئیدهای I-type و S-type تشکیل می‌شود (Whalen and Chappell, 1988; Vyhnal et al., 1991).

(۲) مقادیر مودال پلاژیوکلاز در سنگ‌های مورد مطالعه بیشتر از کوارتز و فلدسپار قلیایی است.

(۳) در سنگ‌های مورد مطالعه تیتانیت و اپیدوت در مقادیر فرعی در تعادل با فازهای اصلی پلاژیوکلاز و هورنبلند در بافت دانه‌ای تشکیل شده‌اند. تیتانیت و اپیدوت با منشأ ماگمایی فازهای فرعی معمول در گرانیتوئیدهای I-type هستند (Whalen and Chappell, 1988; Vyhnal et al., 1991).

(۴) کانی‌های غنی از Al مانند گارنت و مسکوویت و نیز بیوتیت در مجموعه کانی‌های سنگ‌های مورد مطالعه حضور ندارند. مقادیر Ti و Al در ترکیب شیمی کلینوپروکسن رابطه مستقیم با فعالیت سیلیس ماگمای تشکیل دهنده دارد (Kushiro and Le Bas, 1962). بر اساس مطالعات (Verhoogen, 1962) کانی‌های کلینوپروکسن با مقادیر کم Ti از ماگماهای غنی از سیلیس تشکیل شده‌اند. به نظر می‌رسد مقادیر کم Ti و Al و مقادیر بالای Si در کانی‌های کلینوپروکسن تجزیه شده در سنگ‌های کوارتز-دیوریت تخت سلیمان، ویژگی نیمه قلیایی این سنگ‌ها را نشان می‌دهد. نسبت بالای Si و مقادیر کم Al و Ti در ماگماهای نیمه قلیایی در مقایسه با انواع قلیایی و فوق قلیایی به دلیل فعالیت بالای سیلیس a_{SiO_2} در ترکیب ماگماهای نیمه‌قلیایی است (Kushiro and Le Bas, 1962)، که باعث افزایش مقدار Si و کاهش Al در جایگاه چهاروجه کلینوپروکسن شده و در نتیجه تفاوت بار یونی توسط مقادیر کم Ti در جایگاه هشت‌وجهی جبران شده است.

ترکیب کانی‌های کلینوپروکسن در نمودار Al_2O_3 در مقابل سیرشدگی سیلیس ماگما، در محدوده نیمه‌قلیایی واقع می‌شوند (شکل ۶-a). موقعیت خطوط جداکننده محدوده ماگماهای نیمه‌قلیایی، قلیایی و تولیتی بر اساس Le Bas (1962) است. ترکیب ماگما در سنگ‌های بررسی شده همچنین در نمودار Ti (a.p.f.u.) در مقابل $\text{Ca}+\text{Na}$ (a.p.f.u.) در شکل ۶-b نشان داده شده است. ترکیب بیشتر کانی‌های تجزیه شده در محدوده های تولیتی و نیمه‌قلیایی واقع می‌شوند.

۶- نتیجه گیری

- پلاژیوکلاز و هورنبلند عمده ترین کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های گرانودیوریت، مونزودیوریت و کوارتز مونزودیوریت در کمپلکس تخت سلیمان هستند. کلینوپروکسن در مقادیر فراوان در کوارتز-دیوریت تشکیل شده است.
- فراوانی هورنبلند و پلاژیوکلاز، نبود کانی‌های آلومین‌دار، حضور اپیدوت ماگمایی، تیتانیت شکل‌دار و کانی‌های تیره شامل ایلمنیت و مگنتیت با مقادیر فرعی برخی از شواهد کانی‌شناسی دال بر منشأ I-type این سنگ‌ها هستند. مقادیر

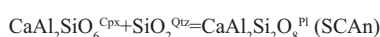
تمام Fe در ترکیب ایلمنیت‌های تجزیه شده به عنوان Fe^{3+} در نظر گرفته شده است. ترکیب شیمیایی ایلمنیت در سنگ‌های کوارتز-دیوریت منطقه مورد مطالعه به صورت $\text{Ilm}_{63}\text{Prh}_{36}$ است. اعضای نهایی ایلمنیت (FeTiO_3) و (MnTiO_3) Pyrophanite تشکیل دهنده‌های اصلی کانی‌های ایلمنیت تجزیه شده در سنگ‌های مورد مطالعه هستند.

۵- بحث

۱-۱. زمین‌دما فشارسنجی (ژئوترموبارومتري)

همان‌طوری که پیش‌تر اشاره شد، پاراژنز کانی‌های مهم در سنگ‌های کوارتز-دیوریت تخت سلیمان عبارتند از: پلاژیوکلاز + هورنبلند + کلینوپروکسن \pm کوارتز.

فشارسنجی (بارومتري) سنگ‌های کوارتز-دیوریت با استفاده از ترکیب کلینوپروکسن بر اساس روش (McCarthy and Patiño Douce, 1998) انجام گرفت. دو معیار مهم برای استفاده از این فشارسنج در سنگ‌های کوارتز-دیوریت تخت سلیمان عبارتند از (a) پاراژنز کانی‌های همزیست مناسب $\text{Cpx}+\text{Qtz}+\text{Pl}$ (b) شرایط P-T منطبق با معیارهای استفاده شده برای کالیبراسیون فشارسنج (McCarthy and Patiño Douce, 1998). واکنش تعادلی فشارسنج کلینوپروکسن به این صورت است:



فشار تبلور ماگمایی با استفاده از کالیبراسیون (McCarthy & Patiño Douce, 1998) از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$P(\text{kbar}) = \left[\frac{5.066 \pm 0.760 + [(1300 \pm 800) / T] - \text{Ln}k.T}{276 + 16} \right] \pm 2.5$$

$$K = \frac{a_{\text{Al}}^{\text{Pl}}}{a_{\text{Ca}}^{\text{Cpx}} a_{\text{Si}}^{\text{Qtz}}}$$

فعالیت کلینوپروکسن بر اساس مدل ایده‌آل محاسبه شد. جدول ۲ روابط کسر مولی و فعالیت ایده‌آل برای فشارسنج کلینوپروکسن (McCarthy and Patiño Douce, 1998) را نشان می‌دهد. فشار محاسبه شده کم و بیش برابر با ۸ kbar است که در این صورت با جایگیری توده‌های نفوذی در ژرفای حدود ۲۴ km مطابقت دارد.

مطالعات (Naney, 1983) و (Zen and Hammarstrom, 1984, 1988) نشان داده است اپیدوت در سنگ‌های آذرین در فشار ۶-۸ kbar متبلور می‌شود. با در نظر گرفتن حضور اپیدوت ماگمایی در پاراژنز سنگ‌های کوارتز-دیوریت مورد مطالعه، مقادیر فشار محاسبه شده با استفاده از کالیبراسیون (McCarthy and Patiño Douce, 1998) قابل قبول به نظر می‌رسد. بر اساس فشار محاسبه شده، ژرفای جایگیری این سنگ‌ها را به احتمال بتوان در حدود ۲۴-۱۸ km در نظر گرفت. هورنبلند فراوان‌ترین فاز فرومنیزین در سنگ‌های کوارتز-دیوریت تخت سلیمان است. حرارت سنجی سنگ‌های کوارتز-دیوریت بر اساس حرارت‌سنج‌های (Blundy and Holland, 1990) و (Ottens, 1984) انجام شده است. حرارت سنجی با استفاده از جانشینی $\text{Na}^{[A]}\text{Al}^{[4]}\text{Si}_1^{[4]}$ در آمفیبول-پلاژیوکلاز (Blundy and Holland, 1990) برای حرارت سنجی سنگ‌های آذرین مناسب است (Moazzen and Droop, 2005). مقدار Ca در ترکیب هسته کانی‌های هورنبلند تجزیه شده بیشتر از مقادیر آن در ترکیب حاشیه است. حرارت سنجی سنگ‌های کوارتز-دیوریت با استفاده از ترکیب هسته کانی‌های تجزیه شده پلاژیوکلاز و هورنبلند همزیست دماهای $T = 750 \pm 80^{\circ}\text{C}$ را مشخص می‌کند (مقدار خطا بر اساس کالیبراسیون (Blundy and Holland, 1990) برابر با $75^{\circ}\text{C} (\pm)$ است). مقدار Ti در ترکیب کانی‌های آمفیبول تجزیه شده در حاشیه کمتر از هسته است. دمای تبلور ماگمایی و شرایط نیمه سالیدوس سنگ‌های

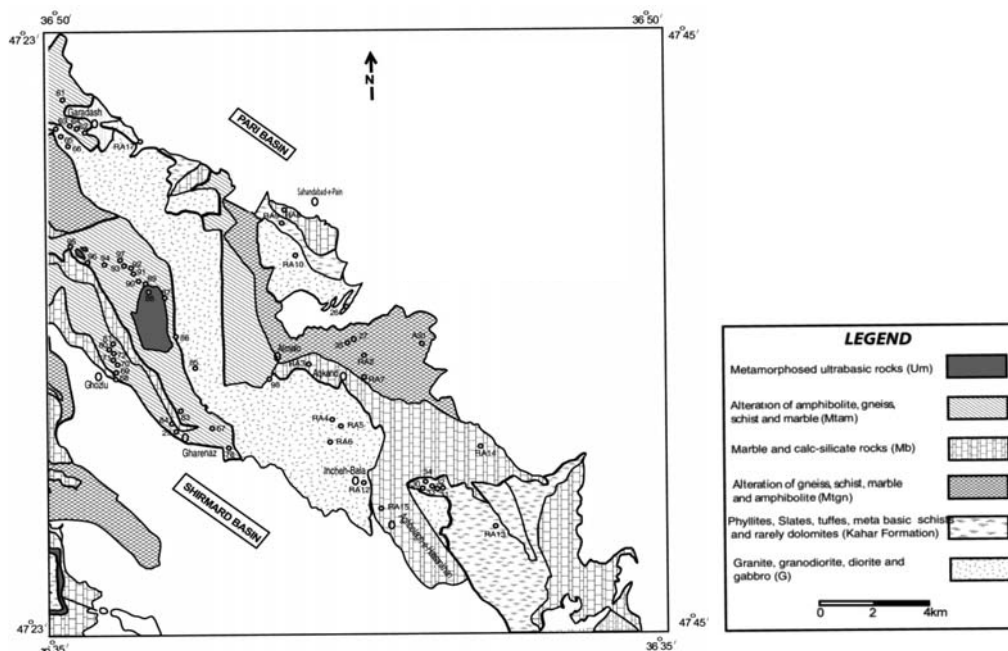
اساس ترکیب شیمی هسته کانی‌های در حال تعادل به ترتیب 75 ± 20 و Akbar~ محاسبه شد. مقادیر فشار محاسبه شده، جایگیری این سنگ‌ها در ژرفای ۲۴ کیلومتر را پیشنهاد می‌کند. مقادیر دما در شرایط نیمه سالدوس با استفاده از ترکیب شیمی حاشیه کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز در حدود 760°C تعیین شد.

سپاسگزاری

از پروفیسور R. Oberhansli در دانشگاه پتسدام آلمان به خاطر استفاده از دستگاه EPMA برای تجزیه نمونه‌ها تشکر می‌کنیم. همچنین از داوران محترم فصلنامه علوم زمین به خاطر ارائه نظرات سازنده قدردانی می‌شود.

بالای فوگاسیته اکسیژن بر اساس ترکیب شیمی کانی‌های کلینوپیروکسن در نمودار کاتیونی $(\text{Na}+\text{Al}^{\text{IV}})$ در برابر $(\text{Al}^{\text{VI}}+2\text{Ti}+\text{Cr})$ و همچنین ترکیب غنی از ایلمنیت (FeTiO_3) و Pyrophanite (MnTiO_3) ، کانی‌های ایلمنیت تجزیه شده در سنگ‌های آذرین مورد مطالعه، ترکیب I-type ماگمای تشکیل دهنده را تأیید می‌کنند. به نظر می‌رسد مقادیر کم Ti و Al و مقادیر بالای Si در ترکیب کانی‌های کلینوپیروکسن تجزیه شده، مرتبط با ترکیب نیمه‌قلیایی ماگمای اولیه باشد.

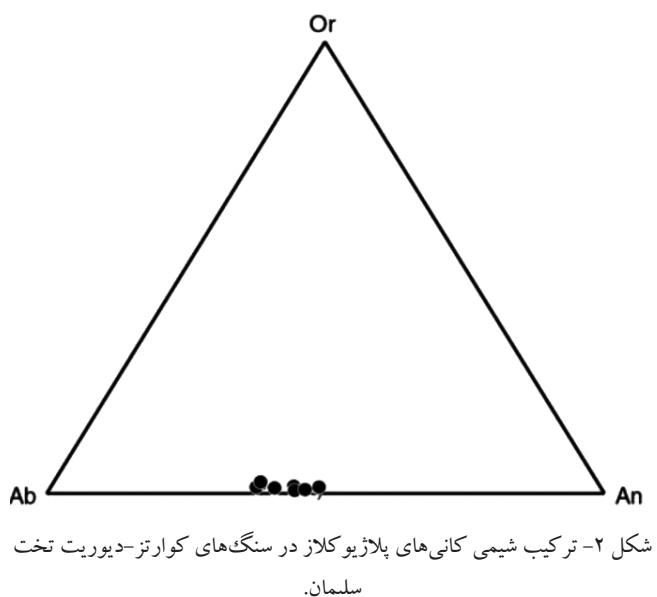
• مقادیر بالای Mg و Si همراه با مقادیر پایین Ti در ترکیب شیمی حاشیه کانی‌های آمفیبول، سرد شدگی این سنگ‌ها در طی فرایندهای نیمه سالدوس را نشان می‌دهد. شرایط P-T ماگمایی و نیمه سالدوس سنگ‌های کوارتز-دیوریت تخت سلیمان با استفاده از ترکیب شیمی کانی‌های همزیست مشخص شد. دما و فشار تبلور اولیه بر

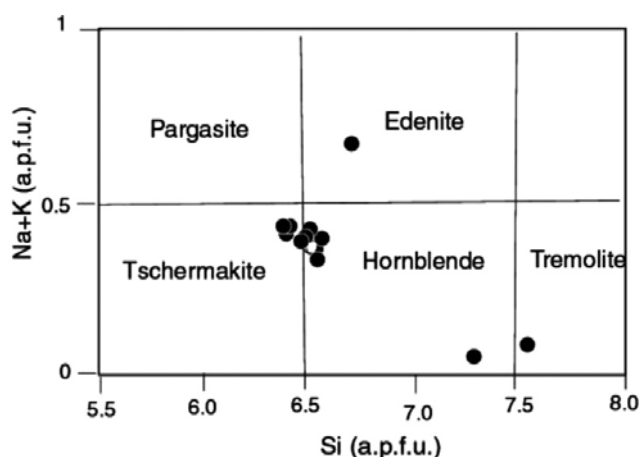


شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی کمپلکس تخت سلیمان. اقتباس از نقشه زمین‌شناسی تخت سلیمان (باباخانی و قلمقاش، ۱۳۷۱) و نقشه زمین‌شناسی ماه‌شان (لطفی، ۱۳۸۰) با تغییرات.

جدول ۱- ترکیب شیمی معرف کانی‌های تجزیه شده در سنگ‌های کوارتز-دیوریت تخت سلیمان.

Mineral	Qtz-diorite (sample R29-gb)							
	Am	Am	Pl	Pl	Cpx	Cpx	Tm	Ilm
SiO ₂	44.40	46.07	55.74	58.47	50.49	54.21	29.92	0.00
TiO ₂	5.38	0.58	0.00	0.02	0.26	0.24	36.80	53.01
Al ₂ O ₃	7.44	10.57	29.14	27.23	6.43	0.35	1.54	0.00
Cr ₂ O ₃	0.19	0.19	0.06	0.00	0.16	0.01	0.00	0.00
FeO	12.97	14.23	0.08	0.06	13.48	6.57	1.47	29.97
MnO	0.26	0.27	0.01	0.01	0.32	0.31	0.10	17.05
MgO	11.84	13.45	0.00	0.00	15.59	15.51	0.00	0.03
CaO	14.30	12.20	10.35	8.37	12.66	24.52	27.05	0.00
Na ₂ O	0.72	1.20	6.04	7.49	0.72	0.22	0.00	0.00
K ₂ O	0.67	1.02	0.19	0.18	0.31	0.01	0.00	0.00
Sum	98.47	99.81	101.60	102.00	100.42	101.71	96.88	100.05
F	0.26	0.12	0.27	0.00	0.24	0.19	0.00	0.00
Cl	0.04	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
(O)	23	23	8	8	6	6	5	3
Si	6.57	6.56	2.47	2.58	1.86	1.97	1.00	0.00
Al	1.33	1.77	1.52	1.41	0.28	0.02	0.06	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.72	0.00	0.00	0.05	0.07	0.06	0.00
Fe ²⁺	1.64	0.97	0.00	0.00	0.37	0.13	0.04	0.65
Ti	0.60	0.06	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	1.00
Cr	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	0.00
Mn	0.03	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.34
Mg	2.61	2.85	0.00	0.00	0.86	0.84	0.00	0.00
Ca	2.27	1.86	0.49	0.39	0.50	0.95	0.98	0.00
Na	0.21	0.33	0.52	0.64	0.05	0.02	0.00	0.00
K	0.13	0.18	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Sum	15.37	15.38	5.02	5.03	4.00	4.00	3.01	1.99
Al ^{IV}	1.29	1.44	-	-	0.14	0.02	0.00	-
Al ^{VI}	0.03	0.33	-	-	0.14	0.00	0.01	-
Mg/Mg+Fe	0.61	0.75	-	-	0.94	0.92	-	-
Al/(Al+Fe ³⁺ +Cr ³⁺)	0.98	0.71	-	-	0.85	0.22	-	-
(K+Na)	0.34	0.38	-	-	-	-	-	-
Na/(Na+K+Ca)	0.08	0.14	0.51	0.62	0.09	0.02	0.00	-
K/(K+Na)	0.05	0.08	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	-
Ca/(K+Na+Ca)	0.87	0.78	0.50	0.38	0.89	0.98	1.00	-

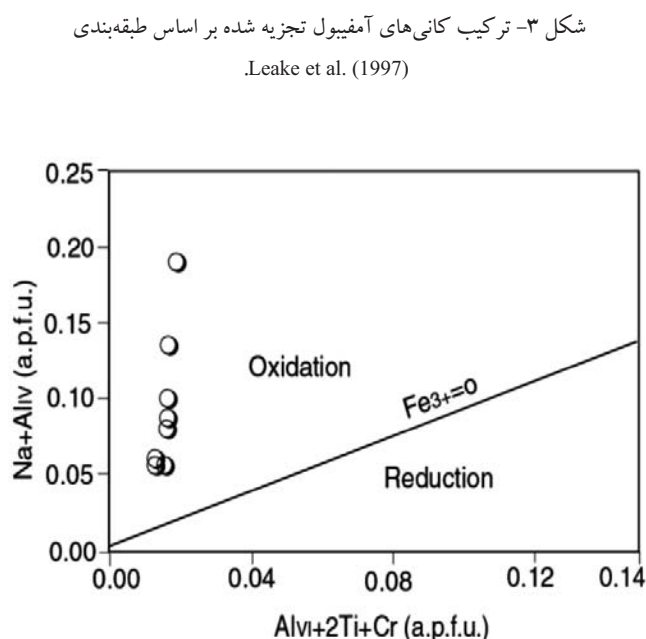




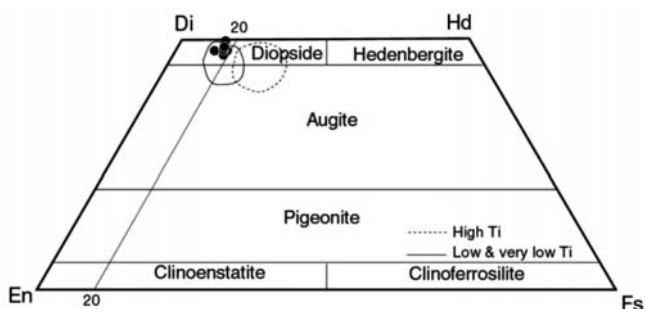
شکل ۲- تعیین مقادیر کسر مولی و فعالیت ایده آل کانی‌ها برای محاسبات ژرفاسنجی کلینوپیروکسن.

جدول ۲- تعیین مقادیر کسر مولی و فعالیت ایده آل کانی‌ها برای محاسبات ژرفاسنجی کلینوپیروکسن.

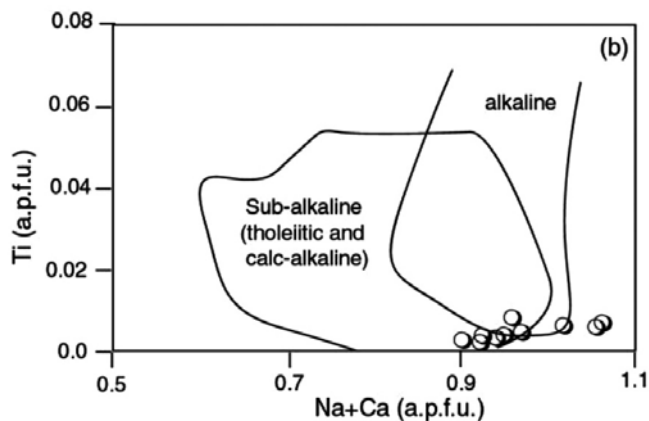
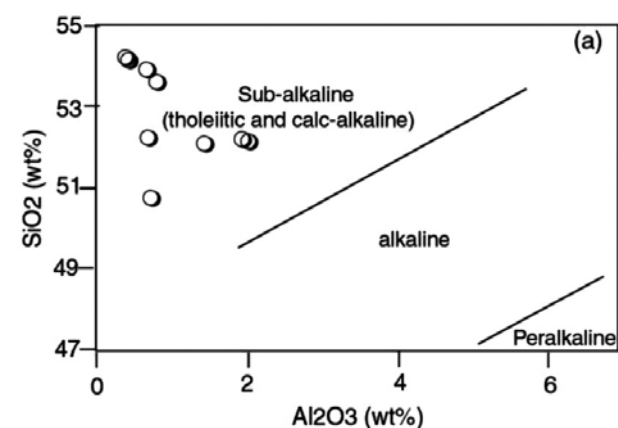
Clinopyroxene activity-composition relationships (Wood, 1979)
Cation assignment (recalculated on the basis of six oxygens)
$^{IV}Al=2-Si$
$X^{M1}Al=Al-^{IV}Al$
$X^{M2}Ca=Ca$
$X^{IV}Si=Si/2$
$X^{IV}Al=(2-Si)/2$
$a_{CaTs}Cpx=4.X^{M2}Ca.X^{M1}Al.X^{IV}Al.X^{IV}Si$
Plagioclase activity-composition relationships (Holland and Powell, 1992)
$X_{An}=Ca/(Ca+Na+K)$
$X_b=0.12+0.00038.T$
$X_{An(2Tmodel)}=[X_{An}(1+X_{An})^2]^{1/4}$
$I_{An}=-RTLn(X_{An(2T)}/X_{An})-(W_c-W_i)91-X_b^2$
$W_c=1070.0 \text{ J mol}^{-1}$, $W_i=9790.0 \text{ J mol}^{-1}$
$a_{An(2T)pl}=X_{An(2T)} \cdot \exp\{1/RT[W_c(1-X_{An})^2+I_{An}]\}$
T=temperature in K.



شکل ۳- ترکیب کانی‌های آمفیبول تجزیه شده بر اساس طبقه‌بندی Leake et al. (1997).



شکل ۴- تعیین فوگاسیته اکسیژن ماگمای اولیه سنگ‌های کوارتز-دیوریت بر اساس ترکیب شیمی کانی‌های کلینوپیروکسن (Schweitzer et al., 1979).



شکل ۵- تعیین فوگاسیته اکسیژن ماگمای اولیه سنگ‌های کوارتز-دیوریت بر اساس ترکیب شیمی کانی‌های کلینوپیروکسن (Schweitzer et al., 1979).

کتابنگاری

- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۵۹- طبقه بندی تکتونیکی ایران در ارتباط با حوضه‌های رسوبگذاری. مجله انجمن نفت ایران، شماره ۸۲، ۱۹-۲۸.
- باباخانی، ع. ر. قلمقاش، ج.، ۱۳۷۱- نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان. سازمان زمین شناسی ایران، تهران.
- حاجی علی اوغلی، ر.، ۱۳۸۶- بررسی پترولوژی سنگهای دگرگونی کالک-سیلیکات و متابازیک مجموعه تخت سلیمان در شمالشرق تکاب (غرب ایران). پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تبریز، ۱۷۰ ص.
- حمیدی، ب.، ۱۳۷۴- رسوبات پرکامبرین-کامبرین در ایران. هوشمند زاده، ع. (مؤلف) زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی ایران، شماره ۲۰، ۵۳۵ ص.
- علوی، م.، حاجیان، ج.، عمیدی، م.، بلورچی، ح.، ۱۳۶۱- زمین شناسی چهار گوش تکاب-شاهین دژ. وزارت معادن و صنایع ایران، تهران، ۱۰۰ ص.
- لطفی، م.، ۱۳۸۰- نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ ماه نشان. سازمان زمین شناسی ایران، تهران.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵- مقدمه‌ای بر زمین شناسی ایران. سازمان زمین شناسی ایران، ۱۰۹ ص.

References

- Alavi, M., 2004- Regional stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust belt of Iran and its proforelenad evolution. *American Journal of Science*, 304, 1–20.
- Blundy, J.D. and Holland, T.J.B., 1990- Calcic amphibole equilibria and a new amphibole plagioclase geothermometer. *Contributions to ineralogy and 4Petrology*, 104, 208–224.
- Droop, G.T.R., 1987- A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51, 431–435.
- Gilg, H. A., Boni, M., Balassone, G., Allen, C. R., Banks, D. and Moore, F., 2006- Marble-hosted sulfide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex. *Mineralum Deposita*, 41, 1–16.
- Holland, T. and Powell, R., 1992- Plagioclase feldspars: activity-composition relations based upon Darken's quadratic formalism and Landau theory. *American Mineralogist*, 77, 53-61.
- Kretz, R., 1983- Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68, 277-279.
- Le Bas, M.J., 1962- The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, 260, 267-288.
- Leake, B.E., Wooley, 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, Jo, Mandarino, J.A., Maresh, V.W., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W. and Youzhi, G., 1997- Nomenclature of Amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, commission on new minerals and mineral names. *Canadian Mineralogist*, 35 1, 219–246.
- Leterrie, J., Maury, C.R., Thonon, P., Girard, D. and Marchal, M., 1982- Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letter*, 59, 139-154.
- McCarthy, T. C. and Patiño Douce, A. E., 1998- Empirical calibration of the silica-Ca-tschermak's anorthite (SCAn) geobarometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 16, 675-686.
- Moazzen, M. and Droop, G. T. R., 2005- Application of mineral thermometers and barometers to granitoid igneous rocks: the Etive Complex, W Scotland. *Mineralogy and Petrology*, 83: 27-53.
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, D., 1988- omenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, 62, 53-62.
- Naney, M.T., 1983- Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems. *American Journal of Science*, 283, 993–1033.
- Otten, M.T., 1984- The origin of brown hornblende in the Artfjället gabbro and dolerites. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 86, 189-199.
- Schweitzer, E. L., Papike, J.J. and Bence, A.E., 1979- Statical analysis of clinopyroxenes from deep-sea basalts. *American Mineralogist* 64, 501-513.
- Stockli, D.F., Hassanzadeh, J., Stockli, L.D., Axen, G., Walker, J.D. and Dewane, T.J., 2004- Structural and geochronological evidence for Oligo-Miocene intra-arc low-angle detachment faulting in the Takab-Zanjan area, NW Iran. *Abstract, Programs Geological Society of America*, 36, 319.
- Verhoogen, J., 1962- Distribution of titanium between silicates and oxides in igneous rocks. *American Journal of Science*, 260, 211-220.
- Vyhnal, C.R., McSween, H.Y. and Speer, J.A., 1991- Hornblende chemistry in southern Appalachian granitoids: implications for aluminum in hornblende thermobarometry and magmatic epidote stability. *American Mineralogist*, 6, 176–188.
- Whalen, J. B. and Chappell, B. W., 1988- Opaque mineralogy and mafic mineral chemistry of I- and S-type granites of the Lachlan fold belt, southeast Australia. *American Mineralogist*, 73, 281-296.
- Wood, B. J., 1979- Activity-composition relationships in Ca (Mg, Fe) Si₂O₆-CaAl₂SiO₆ clinopyroxene solid solutions. *American Journal of Science*, 279, 854-875.
- Wyllie, P. J. and Wolf, M. B. 1993- Amphibolite-dehydration melting: sorting out the solidus. In *Magmatic processes and plate tectonics*, H. M. Pritchard, T. Alabaster, N. B. W. Harris, and C. R. Neary, eds. p. 405-416. *Geological Socioity Special Paper*, 76, London.
- Zen, E. and Hammarstrom, J. M., 1984- Magmatic epidote and its petrologic significance: *Geology*, 12, 515-518.
- Zen, E. and Hammarstrom, J. M., 1988- Plumbing the depths of plutons by magmatic epidote-hornblende association: A cautionary reviews and example from the Round Valley pluton, western Idaho. *Geological Society of American Abstracts with Programs* 20, 475-476.

Mountains has high angle and thrusts Precambrian rocks, cored a large Hangingwall anticline, over the Tertiary rocks accommodate footwall synclines. This geometry constrains the fault as a deep-seated basement fault which has been developed through inversion of an initial normal fault. The Taleqan fault consequently is analyzed as a back thrust to the Mosha fault and the mountain as a pop up zone between them. Detail kinematic analysis of the Taleqan fault show two different reverse movement with right and left lateral components. Given that the fault located on the Mosha fault hangingwall, it has been analyzed that the former movement direction to be related to the Mosha fault inversion from Late Cretaceous while the latter movement direction is the consequence of left lateral transpression tectonics in the range since late Pliocene.

Key words: Taleqan mountains, Central Alborz, Inversion Tectonic, Transpression Tectonics

For Persian Version see pages 127 to 134

Email: yassaghi@modares.ac.ir

The Study and Survey of Cranium and Maxillary of *Hipparion primigenium*

By: **A.H. Kokabi Nezhad ***, **Z. Purabrishami ****, **Kh. Tehrani ***

* Islamic Azad University, Science & Research Campus, Tehran, Iran

** Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

Received: 2008 October 19

Accepted: 2009 January 12

Abstract

One of Hipparion species which has complete characters of cranium and maxillary with teeth found during excavation is *H. primigenium*. Since this sample is the only complete one in the world, (of course without mandible) with special species characters we can call it Homeotype. Because of finding this species, pyroclastic sediments of Maragheh would be dated upper Astracian, so Maragheh informal formation which in the past was thought to be as old as vallencian- Trulain, seems a bit older. Because the mentioned samples were also found in Samus and Pikermi in Greece, so we can say these two regions have vertebrate familiarities in fossils fauna and other characters like paleogeography, biochronology and biogeography in late Miocene- early Pliocene.

Key words: Hipparion, *Hipparion primigenium*, Pyroclastic, Miocene, Pliocene, Homeotype

For Persian Version see pages 135 to 138

E-mail: amir_kokabi@yahoo.com

Mineral Chemistry and Crystallization Pressure and Temperature of the Quartz-Diorites from the Takht-e-Soleyman Area, NW Iran

By: **R. Hajialioghli ***, **A. Jahangiri ***, **M. Moazzen***, **G.T.R. Droop **** & **R. Bousquet *****

* Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

** School of Earth, Atmospheric and Environmental Sciences, University of Manchester, Manchester, British U. K.

*** Institut für Geowissenschaften, Universität Potsdam, Potsdam, Germany

Received: 2007 May 11

Accepted: 2008 January 22

Abstract

The igneous rocks of Takht-e-Soleyman area in the north western Iran crop out in association with the amphibolites. The contact between igneous rocks and amphibolites is sharp. Igneous rocks in the study area are mainly granodiorite, quartz-monzodiorite and quartz-diorite. Plagioclase and hornblende form dominant minerals of the igneous rocks. Titanite and epidote occur in rare amounts. Chemical compositions