

Micro-texture and mineralogy of Fe-Ti oxides from Qareaghaj mafic-ultramafic intrusion, NW Urmia

M. Mirmohammadi, A. Kananian

*School of Geology, University College of Science, Tehran University
Email: m_mirsaleh@yahoo.com*

(Received: 4/11/2006, received in revised form: 12/2/2007)

Abstract: Detailed studies on micro-texture and microprobe analysis of Fe-Ti oxides from Qareaghaj mafic-ultramafic intrusion (QMUI) is the basis of this investigation. The QMUI is mainly composed of non-mineralized mafic and Fe-Ti-P-rich ultramafic rocks (FTP). The FTP with high proportion of ilmenite (~11-19 modal %) and magnetite (~2-13 modal %) show an unusual bulk composition. Fe-Ti oxides are divided into three distinct generations on the basis of their micro-texture: 1) small-sized rounded to ellipsoid-shape inclusion in olivine and clinopyroxene, 2) coarse interstitial grains and 3) late stage veinlets. The ilmenite grains (0.1-2mm) commonly contain fine hematite lenses arranged in [0001] planes. Primary Ti-magnetites contain ilmenite lamellae along the [111] planes and exhibit wide variety of exsolution textures (e.g., trellis- and sandwich-types). Ilmenite in FTP show X_{ilm} range from 0.82-0.91 and has high MgO (0.82-2.38 wt %). Most Ti-magnetites (bulk composition) have low X_{usp} (0.03-0.13) and therefore high X_{mag} (0.79-0.93). Two oxide geothermobarometer in the ILMAT program, resulted in re-equilibration temperature range of 450-700°C and fO_2 (nearly -19±3) during subsolidus cooling for FTP rocks.

Keywords: Qareaghaj, Ilmenite, Magnetite, FTP rocks.



ریز بافت و کانی‌شناسی اکسیدهای Fe-Ti در توده نفوذی مافیک- اولترامافیک قره آغاج، شمال باختری ارومیه

میر صالح میر محمدی، علی کنعانیان

دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده زمین شناسی

پست الکترونیکی: m_mirsaleh@yahoo.com

(دریافت مقاله ۱۳۸۵/۸/۱۳، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۵/۱۱/۲۳)

چکیده: مطالعه دقیق ریزبافت و آنالیز ریزکاو اکسیدهای Fe-Ti از توده نفوذی مافیک-اولترامافیک قره آغاج، اساس این پژوهش را تشکیل می‌دهد. این توده از لحاظ سنگ‌شناسی از دو بخش اصلی شامل سنگهای مافیک بدون کانی‌سازی و سنگهای اولترامافیک غنی از (FTP) Fe-Ti-P تشکیل یافته است. سنگهای FTP حاوی مقادیر بالایی از ایلمنیت ($\sim 19 \text{ modal } \%$) و مگنتیت ($\sim 13-2 \text{ modal } \%$) هستند و ترکیب شیمیایی غیر عادی نشان می‌دهند. بر اساس شواهد ریزبافتی، اکسیدهای Fe-Ti در سه نسل یافت می‌شوند: (۱) میانبرهای گرد تا بیضی ریز در اولوین و کلینوپروکسن، (۲) درشت دانه‌های روزنه‌ای و (۳) رگچه‌های مرحله پسین. بلورهای ایلمنیت ($2-1 \text{ mm}$) به طور معمول دارای عدسی‌های ریز هماتیت آرایش یافته در صفحات [۰۰۱] می‌باشند. تیتانو مگنتیت‌های اولیه اغلب حاوی تیغه‌های ایلمنیت موازی با صفحات [۱۱۱] بوده و طیفی از ریزبافت‌های برون رستی مثل نوع ترلیس و ساندویچی را نشان می‌دهند. در ایلمنیت‌های سنگهای FTP، X_{ilm} از ۰/۸۲ تا ۰/۹۱ تغییر می‌کند و مقدار MgO قابل توجه است ($2/38 - 0/82 \text{ wt } \%$). بیشتر بلورهای تیتانو مگنتیت (ترکیب کلی) دارای X_{usp} پایین ($0/03 - 0/13$) بوده و از این رو X_{mag} بالایی ($0/79 - 0/93$) دارند. با استفاده از زمین دما-فشارسنج دو اکسیدی (ایلمنیت-مگنتیت) و به‌کارگیری نرم افزار ILMAT، معلوم شد که اکسیدهای Fe-Ti در گستره دمایی $450-700^\circ \text{C}$ و f_{O_2} نزدیک به 3 ± 19 ، به احتمال در طول سرد شدن به زیر نقطه ذوب، به تعادل دوباره رسیده‌اند.

واژه‌های کلیدی: قره آغاج، ایلمنیت، مگنتیت، سنگ‌های FTP.

مقدمه

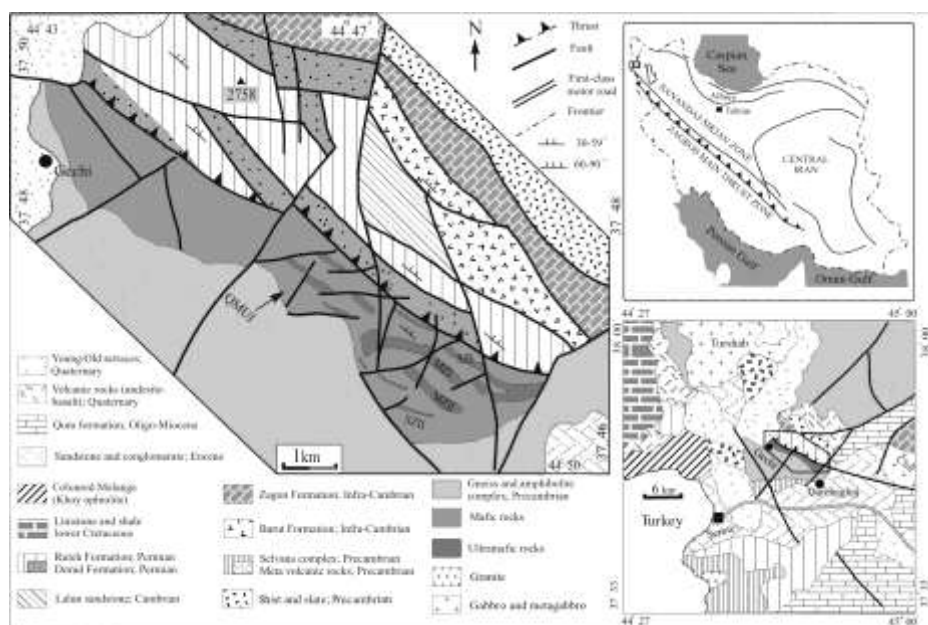
توده نفوذی قره آغاج بین طولهای جغرافیایی شرقی $44^{\circ}43'$ تا $44^{\circ}50'$ و عرضهای جغرافیایی شمالی $37^{\circ}46'$ تا $37^{\circ}50'$ و در فاصله ۳۶ کیلومتری شمال باختری شهرستان ارومیه قرار دارد (شکل ۱) [۱]. این توده به طور مشخص از دو واحد سنگی مافیک و اولترامافیک تشکیل یافته است. سنگهای اولترامافیک توده قره آغاج به عنوان کانسار تیتانیم- فسفات برای اولین بار در سال ۱۳۷۲ شناسایی و معرفی شدند [۲]. این کانسار طی سالهای ۱۳۷۴ تا ۱۳۷۸ تحت بررسی‌های اکتشافی و فرآوری مقدماتی (مقیاس آزمایشگاهی) قرار گرفته [۳-۵] و با توجه به ویژگی‌های خاص سنگ شناختی و کانی‌زایی در قالب رساله‌های کارشناسی ارشد مطالعه و مقالاتی نیز ارائه شده است [۶-۸].

درازای توده قره آغاج ۸-۱۰ کیلومتر و پهنای آن ۱-۱/۷ کیلومتر است و بین نهشته‌های پرمین و اینفراکامبرین در شمال و مجموعه دگرگونی وابسته به پرکامبرین در جنوب و خاور منطقه جای گرفته است (شکل ۱). روند عمومی این توده NW-SE است و شیب ساختارهای درونی آن مانند برگوارگی، و ۵۰-۶۵ درجه به سمت N-NE تمایل دارد. همبری توده با سنگ‌های پرمین به طور مشخص از نوع رورانده بوده و در میان آنها زون میلونیتی- اولترا میلونیتی برونزده است. همبری توده قره آغاج با مجموعه منسوب به پرکامبرین نیز اغلب به صورت گسل بوده و در مواردی نیز به صورت پوشیده است. سنگهای اولترا مافیک در توده قره آغاج را بخش مافیک به طور کامل در بر گرفته‌اند و با سنگهای رسوبی و دگرگون همبری ندارند. ترکیب غالب بخش مافیک، گابرویی است و به صورت موضعی در نتیجه دگرشکلی و دگرگونی به متاگابرو و اورتوآمفیبولیت تبدیل شده است.

سنگ‌های اولترامافیک در توده قره آغاج شامل تعداد زیادی لایه و توده‌های سیل مانند (با همبری تیز و موازی با میزبان گابرویی) به سبزی تا ۵ سانتیمتر تا چندین متر بوده و به دلیل غنی‌شدگی غیرعادی از فسفر (آپاتیت)، آهن و تیتانیم (ایلمنیت و مگنتیت) به اختصار سنگ‌های FTP خوانده می‌شوند. این سنگها علیرغم حجم و گسترش کم، به دلیل میزبانی کانسارهای فسفات، آهن، و تیتانیم، در مقایسه با سنگهای آذرین متعارف ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی غیر معمول دارند [۹] و به این دلیل از اهمیت و جذابیت علمی و اقتصادی قابل توجهی برخوردارند. در مورد خاستگاه سنگهای FTP و سازوکارهای تمرکز اکسیدهای آهن و

تیتانیم ($\pm$ آپاتیت) در آنها، فرضیه‌های مختلفی از جمله ناآمیختگی آبگونی^۱، محصول تفریق تأخیری آنورتوزیت‌ها، انباشته‌های بلوری، بلوری شدن دوباره در شرایط قرار گرفتن در زیر نقطه ذوب^۲، و جداسدگیهای مرحله تأخیری توده‌های مافیک-اولترامافیک لایه‌ای، ارائه شده است [۱۴-۱۰]، با این حال درباره سنگ‌زایی و ارتباط بین انواع سنگهای FTP اتفاق نظر وجود ندارد [۱۵].

سنگهای FTP توده قره آغاچ تنها برونزد این سنگها در ایران است، و افزون بر ۲۰۰ میلیون تن کانسنگ تیتانیم با عیار متوسط ۸/۲۵ درصد TiO_2 در این کانسار برآورد شده است [۷ و ۳]. با توجه به ویژگیهای صحرایی، ترکیب کانی شناسی و شیمیایی، سنگهای اولترامافیک قره آغاچ تفاوت‌های ویژه‌ای با انواع FTP شناخته شده در جهان دارند، به گونه‌ای که شاید بتوان آنها را در نوع خود منحصر به فرد و تیپ جدید دانست.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده از توده قره آغاچ با تغییرات کلی، اقتباس از [۱].

روش بررسی

1 - Liquid immiscibility

2 - Subsolvus

نمونه‌برداری به صورت سیستماتیک از رخنمونها، ترانشه‌ها و مغزه‌های حفاری اکتشافی انجام شد و تعداد ۱۰۰ نمونه (تیغه‌های نازک- صیقلی) با میکروسکوپ بازتابی- قطبشی تحت بررسی‌های سنگ‌نگاری و آنالیز مدال قرار گرفت. آنالیزهای ریزکاو با استفاده از دستگاه CAMECA SX-100 در موسسه کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی دانشگاه هامبورگ آلمان صورت گرفت و برای همسنجی دستگاه نیز از استانداردهای مصنوعی و طبیعی استفاده شد. برای آنالیز اکسیدهای Fe-Ti باریکه جریان^۳ برابر ۲۰ nA، ولتاژ شتاب‌دهنده^۴ در حدود ۲۰-۱۵ kv و قطر باریکه در حدود ۲-۳ μm بوده است. علاوه بر آنالیز نقطه‌ای، میانگین ترکیب کلی^۵ فازهای تیتانومگنتیت و نیز ایلمنیت حاوی هماتیت آزاد با پرتو کانونی نشده به قطر ۴۰ μm اندازه‌گیری شد.

ویژگیهای سنگ نگاری و ریزبافت

سنگهای بلوری اولترامافیک اغلب در اندازه ریز تا متوسط دیده می‌شوند و بافت اورتوکومولایی دارند به طوریکه شبکه‌ای از کانیهای اولیوین (۶۶-۴۱ modal%) با اکسیدهای Fe-Ti (در مجموع حدود ۳۲-۱۳ modal%) و آپاتیت (۱۶-۰/۱ modal%) در لابلای آن شکل گرفته است (شکل ۲ الف). با توجه به بررسیهای سنگ‌نگاری، دونیت و ورلیت غنی از اکسیدهای Fe-Ti و آپاتیت حداقل ۹۰ درصد بخش اولترامافیک توده قره آغاج را تشکیل می‌دهند، هرچند که دونیت فقیر از آپاتیت و همچنین کلینوپیروکسنیت نیز به مقدار کمتر یافت می‌شوند.

اکسیدهای Fe-Ti غالب در سنگ‌های FTP، شامل ایلمنیت (۱۹-۱۱ modal%) و مگنتیت (۱۳-۲ modal%) و در سه نسل یافت می‌شوند (شکل ۲ و ۳): ۱- میانبارهای^۶ گرد تا بیضی ریز در اولیوین و کلینوپیروکسن، ۲- به صورت قطعات درشت بین بلوری و ۳- پسا رگچه‌ها (با ستبرای در حدود ۳ cm و اغلب حاوی مگنتیت $\pm$ پیروتیت). نسل اخیر در صورت وجود، تمام سیلیکات‌ها و اکسیدهای Fe-Ti نسل اول و دوم را قطع می‌کند (شکل ۳ الف). فاز اکسیدی غالب در همه نمونه‌ها ایلمنیت بوده و نسبت مگنتیت/ایلمنیت معمولاً ۲-۴ (در محدوده ۸/۵-۱/۵) است. بیشتر ایلمنیت‌های اولیه (در ابعاد ۲-۰/۱ mm) حاوی عدسی‌های ریز هماتیت هستند (شکل ۳ ب و د) که به موازات [۰۰۰۱] آرایش یافته‌اند. بلورهای مگنتیت اولیه (تیتانومگنتیت) نیز اغلب دارای تیغه‌های برون‌رست^۷ ایلمنیت (با توزیع تقریباً همگون) به

3- Beam Current

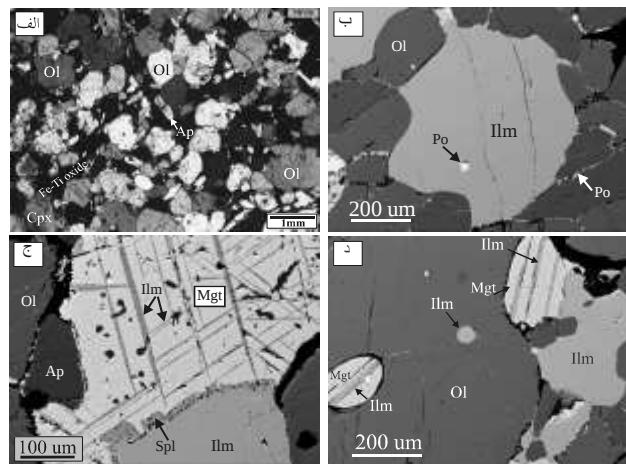
4- Acceleration voltage

5 - Bulk Composition

6 - Inclusion

7 - Exsolution

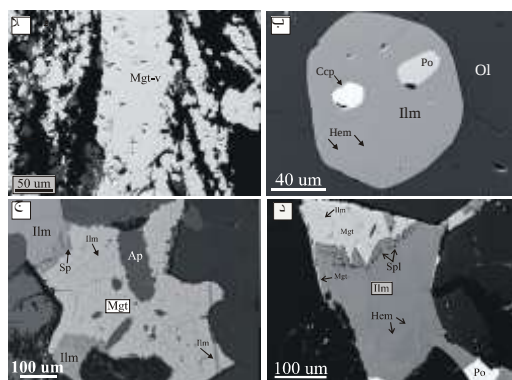
موازات [۱۱۱] بوده و طیفی از ریزبافتها را نشان می‌دهند (شکل ۲ ج و د، ۳ ج). در بیشتر نمونه‌ها نوع داربستی^۸ (انواع ریز تا درشت) فراوان بوده (شکل ۲ ج) ولی انواع ساندویچی (شکل ۲ د) و مرکب نیز دیده می‌شوند [برگرفته از اصطلاحات ۱۷ و ۱۶]. بر اساس شواهد سنگ نگاری اغلب ریزبافت‌های مرکب به احتمال زیاد اجتماع اکسیدهای Fe-Ti دوتایی اولیه هستند. برپایه مراحل بافتی C1 تا C5 ناشی از برون‌رستی در شرایط زیر نقطه ذوب با افزایش درجه اکسایش [۱۷]، بلورهای تیتانومگنتیت در سنگهای FTP قره آغاج مراحل C2 تا C3 را بدون آزاد شدن الویت^۹ نمایش می‌دهند. بلورهای تیتانومگنتیت، علاوه بر تیغه‌های ایلمنیت دارای اسپینل آزاد در داخل و نیز حاشیه غنی از اسپینل در همبری با ایلمنیت هستند (شکل ۳ ج و د). وجود اسپینل در تیغه‌های ایلمنیت داخل تیتانومگنتیت، نشانگر این است که بخش اعظم اسپینل‌ها همزمان با تیغه‌های ایلمنیت تشکیل شده‌اند. بلورهای تیتانومگنتیت اغلب به صورت قطعات کوچکتر در حاشیه بلورهای درشت‌تر ایلمنیت دیده می‌شوند و بلوری شدن آنها نسبت به ایلمنیت دیرتر صورت گرفته است.



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپیکی نمونه‌های FTP توده قره آغاج و ریزبافت‌های آن؛ الف) در نور عبوری، وضعیت CPL، ب تا د) تصاویر BSE، اولیون (Ol)، آپاتیت (Ap)، کلینوپیروکسن (Cpx)، ایلمنیت (Ilm)، مگنتیت (Mgt)، اسپینل (Spl)، پیروتیت (Po).

8 - Trellis

9 - Ulvite



شکل ۳ تصاویر BSE از نمونه‌های FTP توده قره آغاج و ریزبافت‌های آن. هماتیت (Hem)، مگنتیت رگچه‌ای (Mgt-V)، و مشابه آنها در شکل ۲.

علاوه بر اکسیدهای Fe-Ti، کانی‌های سولفیدی (در مجموع به مقدار $< 3\%$ modal) از نوع پیروتیت (کانه غالب)، و به مقدار کمتر کالکوپیریت و پنتلاندیت نیز در بیشتر نمونه‌های FTP در سه نسل میانبار، بین بلوری و پسا رگچه‌ای وجود دارند (شکل ۲، ۳ و ۴). برخلاف سنگهای اولترامافیک، ایلمنیت در سنگهای مافیک قره آغاج (ترکیب غالب گابرویی) تنها اکسید Fe-Ti بوده ($7.2-15.0\%$ modal) و جالب اینکه مگنتیت، اولیوین و آپاتیت حتی در مقادیر جزئی در آنها یافت نمی‌شود.

کانی‌شناسی

ایلمنیت در سنگ‌های مافیک (جدول ۱) نزدیک به ترکیب خالص و عضو پایانی $X_{ilm} \sim 0.96$ بوده، و دارای MgO پایین ($\leq 2\%$ wt) و MnO بالا ($1.6-1.92\%$ wt) است. ایلمنیت در سنگ‌های اولترامافیک با توجه به مقادیر قابل توجه هماتیت برون‌رستی، دارای $X_{ilm} (0.82-0.91)$ و $X_{hem} (0.09-0.18)$ متغیر بوده و در واقع آن را می‌توان هموایلمنیت نامید (جدول ۱). ایلمنیت در این سنگها آشکارا در مقایسه با انواع موجود در سنگهای مافیک از MgO غنی‌تر ($2.38-8.9\%$ wt) و از MnO فقیرتر ($0.58-0.93\%$ wt) است. تیغه‌های ایلمنیت آزاد در تیتانومگنتیت تقریباً دارای ترکیب نزدیک به ایلمنیت خالص بوده و ذرات و عدسی‌های هماتیت در ایلمنیت دارای TiO_2 بالایی است و X_{ilm} در آنها بین $0.26-0.30$ تغییر می‌کند (تیتانوهما تیت).

بلورهای مگنتیت اولیه در سنگهای اولترامافیک، غالباً برون‌رست و درهم رشدی ایلمنیت و اسپینل دارند و به درستی می‌توان آنها را چنانکه اشاره شد تیتانومگنتیت نامید. به همین دلیل ترکیب کلی آنها در بلورهای حاوی برون‌رست ریز و تا حدی همگن با پرتو کانونی نشده ($40\ \mu m$) اندازه‌گیری شده است. بیشتر تیتانومگنتیت‌ها (نسل اول و دوم) دارای X_{usp} پایین ($0.03-0.13$) هستند، و بنابراین X_{mag} بالایی ($0.79-0.93$) دارند (جدول ۲). مقادیر

MgO و MnO در این کانیها به ترتیب برابر است با ۰/۵۸-۱/۳۸ wt.% و ۰/۰۸ wt.% <. ترکیب مگنتیت موجود در پسا رگچه‌ها (نسل سوم) نزدیک به مگنتیت خالص ($X_{mag} \sim ۰/۹۹۸$) است. به هر حال تغییرات سیستماتیک در ترکیب بلورهای تیتانومگنتیت با توجه به موقعیت نمونه‌ها در ستون چینه‌شناسی بخش اولترامافیک، مشاهده نمی‌شود. مقدار Cr_2O_3 در تیتانومگنتیت اغلب ناچیز ($\leq ۰/۲۲$ wt.%)، ولی مقدار V_2O_5 در آنها قابل توجه است (۱/۹-۰/۹۳ wt.%). از طرف دیگر مقدار Al_2O_3 در آنها بالا ولی متغیر (۱/۲۱-۳/۵۳ wt/%) است که دلیل اصلی آن توزیع نامتجانس برون‌رست اسپینل است. تمام بلورهای اسپینل (میان بلوری و برون-رست) در نمونه‌های مورد مطالعه از نوع هرسینیتی است و در ترکیب آنها $Al_2O_3 = ۵۷-۶۰$ ، $FeO = ۲۸/۶-۳۲/۳$ ، $MgO = ۷-۱۱/۳$ و $TiO_2 \leq ۰/۱۵$ ، $Cr_2O_3 \leq ۰/۲۶$ بر حسب درصد وزنی اندازه‌گیری شده است.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته [۱۸]، در سنگهای FTP قره آغاج همخوانی خوبی بین مقدار MgO (یا $Mg \neq$) اولیوین، اکسیدهای Fe-Ti و اسپینل هرسینیتی وجود دارد و از طرف دیگر اسپینل موجود در سنگهای فقیر از آپاتیت، عدد منیزیم بالایی ($Mg \neq \sim ۴۳-۴۶$) در مقایسه با انواع غنی از آپاتیت ($Mg \neq ۳۰-۴۴$) نشان می‌دهند (شکل ۴الف).

جدول ۱ نتایج آنالیز ریزکاو معرف برای ایلمنیت (ilm) و هماتیت برون‌رست (hem-ex) در سنگ‌های مختلف توده قره آغاج.

Rock	mgb	cgb	ox-ub	ap-ox-ub					
Sample	BH14	TM18	TM62	TM65	TM134	TM61	TM27	TM147	TM138
Mineral	ilm	ilm	ilm	ilm	ilm	ilm	ilm	ilm	hem-ex
SiO ₂	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳
TiO ₂	۵۳/۱۷	۹۹/۵۲	۴۹/۸۱	۵۱/۰۱	۵۰/۱۱	۵۱/۱۸	۵۰/۳۴	۵۰/۲۱	۱۶/۹۹
Al ₂ O ₃	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۱	۱/۲۸	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۲/۰۷
FeO	۴۵/۷۱	۴۵/۱۸	۴۸/۰۷	۴۵/۱۴	۴۶/۹۴	۴۶/۳۱	۴۸/۳۳	۴۷/۵۸	۷۷/۲
MnO	۱/۰۳	۰/۹۲	۰/۵۸	۰/۷۴	۰/۹۳	۰/۸۶	۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۲۷
MgO	۰/۱۷	۰/۱۹	۲/۳۸	۱/۳۹	۱/۰۰	۱/۰۹	۰/۸۲	۰/۸۹	۱/۴۹
CaO	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳
Total	۱۰۰/۲۲	۹۹/۳۲	۱۰۰/۸۶	۹۹/۶۳	۹۹/۰۵	۹۹/۵۹	۱۰۰/۴۷	۹۹/۶۳	۹۸/۶۹
Cation									
Si	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
Ti	۱/۰۰۴	۱/۰۰۸	۰/۹۱۷	۰/۹۵۴	۰/۹۵۰	۰/۹۶۶	۰/۹۴۲	۰/۹۴۸	۰/۳۰۹
Al	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۳۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۵۹
Fe ³⁺	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۶۶	۰/۰۵۰	۰/۰۹۸	۰/۰۶۷	۰/۱۱۳	۰/۱۰۲	۱/۳۲۳
Fe ²⁺	۰/۹۶۰	۰/۹۵۶	۰/۸۱۸	۰/۸۸۹	۰/۸۹۳	۰/۹۰۴	۰/۸۹۳	۰/۸۹۷	۰/۲۴۹
Mn	۰/۰۲۲	۰/۰۲۰	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۲۰	۰/۰۱۸	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹	۰/۰۰۶
Mg	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۸۷	۰/۰۵۲	۰/۰۳۸	۰/۰۴۱	۰/۰۳۰	۰/۰۳۳	۰/۰۵۴
Ca	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱
ΣCatio	۱/۹۹۵	۱/۹۹۲	۲/۰۰۰	۲/۰۰۰	۲/۰۰۰	۱/۹۹۸	۲/۰۰۰	۲/۰۰۰	۲/۰۰۰
No of	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
X _{ilm}	۰/۹۷۲	۰/۹۷۳	۰/۸۱۸	۰/۹۰۸	۰/۸۹۴	۰/۹۰۷	۰/۸۹۴	۰/۸۹۷	۰/۲۷۹
X _{hem}	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۸۳	۰/۰۲۵	۰/۰۴۹	۰/۰۳۴	۰/۰۵۶	۰/۰۵۱	۰/۶۶۱
X _{Gk}	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۸۷	۰/۰۵۲	۰/۰۳۸	۰/۰۴۱	۰/۰۳۰	۰/۰۳۳	۰/۰۵۴
X _{py}	۰/۰۲۳	۰/۰۲۰	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۲۰	۰/۰۱۸	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹	۰/۰۰۶

ریزگابرو (mgb)، گابروی درشت دانه (cgb)، اولترامافیک غنی از اکسید و آپاتیت (ap-ox-ub)، اولترامافیک فقیر از آپاتیت (ox-ub)؛ $X_{ilm} = 1 - (X_{hem} + X_{GK} + X_{py})$ ، $X_{py} = X_{Mn}$ ، $X_{GK} = NMg$ ، $X_{hem} = 0.5 \times Fe^{3+}$ ؛

جدول ۲ نتایج آنالیز ریزکاو معرف برای تیتانو مگنتیت (mag) و مگنتیت رگجه‌ای (mag-V) در سنگهای FTP توده قره‌آغاچ.

Rock type	ox-ub		ap-ox-ub				ox-ub
Sample no.	TM62	TM65	TM134	TM61	TM27	TM147	TM13
Mineral	mag	mag	mag	mag	mag	mag	mag-v
SiO ₂	۰.۰۳	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۰۳	۰.۱۸	۰.۰۸	
TiO ₂	۳.۹۸	۴.۶۱	۱.۵۰	۳.۱۹	۱.۳۷	۰.۹۹	۰.۰۵۲
Al ₂ O ₃	۲.۷۵	۲.۲۳	۲.۴۲	۳.۵۳	۳.۳۹	۱.۲۱	۰.۰۱۷
Cr ₂ O ₃	۰.۲۲	۰.۰۷	۰.۰۹	۰.۰۰	۰.۱۲	۰.۱۱	۰
FeO	۸۴.۲۳	۸۴.۱۶	۸۷.۸۷	۸۴.۸۱	۸۵.۴۴	۸۹.۷۷	۹۲.۳۳۴
MnO	۰.۰۴	۰.۰۸	۰.۰۵	۰.۰۸	۰.۰۴	۰.۰۵	۰.۰۲۲
MgO	۰.۸۳	۰.۵۸	۰.۶۵	۰.۷۷	۱.۳۸	۰.۶۰	۰.۰۹
ZnO	۰.۰۷	۰.۱۲۱	۰.۰۳	۰.۱۲	۰.۰۷	۰.۰۹	
V ₂ O ₅	۱.۸۹۹	۱.۰۷۴	۰.۹۵	۰.۹۳۱	۱.۸۹۹	۰.۹۴۲	
Total	۹۴.۰۴	۹۲.۹۶	۹۳.۶۱	۹۳.۴۶	۹۳.۸۹	۹۳.۸۲	۹۲.۵۱۵
Cations							
Si	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۷	۰.۰۰۳	۰.۰۰۰
Ti	۰.۱۱۳	۰.۱۳۲	۰.۰۴۳	۰.۰۹۰	۰.۰۳۹	۰.۰۲۸	۰.۰۰۲
Al	۰.۱۲۲	۰.۱۰۰	۰.۱۰۸	۰.۱۵۷	۰.۱۴۹	۰.۰۵۴	۰.۰۰۱
Cr	۰.۰۰۷	۰.۰۰۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۰	۰.۰۰۴	۰.۰۰۳	۰.۰۰۰
Fe ³⁺	۱.۵۸۶	۱.۵۹۶	۱.۷۷۲	۱.۶۳۲	۱.۷۰۰	۱.۸۵۲	۱.۹۹۶
Fe ²⁺	۱.۰۶۴	۱.۰۹۵	۱.۰۰۵	۱.۰۴۲	۰.۹۶۵	۰.۹۹۳	۰.۹۹۶
Mn	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱
Mg	۰.۰۴۶	۰.۰۳۳	۰.۰۳۷	۰.۰۴۴	۰.۰۷۷	۰.۰۳۴	۰.۰۰۵
Zn	۰.۰۰۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	
V	۰.۰۵۷	۰.۰۳۳	۰.۰۲۹	۰.۰۲۸	۰.۰۵۷	۰.۰۲۹	
ΣCations	۳.۰۰۰	۳.۰۰۰	۳.۰۰۰	۳.۰۰۰	۳.۰۰۰	۳.۰۰۰	۳.۰۰۰
No of O	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
X _{mag}	۰.۷۹۳	۰.۷۹۸	۰.۸۸۶	۰.۸۱۶	۰.۸۵۰	۰.۹۲۶	۰.۹۹۸
X _{usp}	۰.۱۱۳	۰.۱۳۲	۰.۰۴۳	۰.۰۹۰	۰.۰۳۹	۰.۰۲۸	۰.۰۰۲

$X_{mag} = 0.5 \times Fe^{3+}$, $X_{usp} = NTi$ و مشابه آنها جدول ۱.

بحث

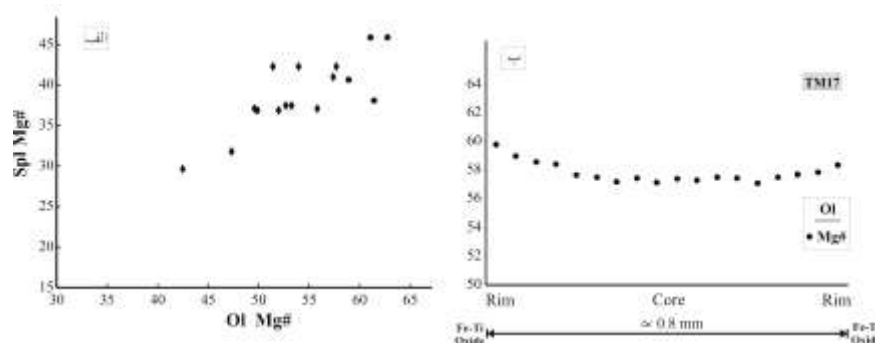
با استفاده از دماسنج زوج کانی ایلمنیت-کلینوپیروکسن [۱۹] گستره دمای بلوری شدن سنگهای اولترامافیک قره آغاچ از ۸۰۰ °C تا ۱۰۲۸ °C و بر اساس دماسنج کلینوپیروکسن [۲۰] بین ۹۳۶ °C تا ۱۰۰۴ °C به دست آمده است [۱۸]. از سوی دیگر استفاده از زمین دما-فشارسنج دو اکسیدی ایلمنیت-مگنتیت [۲۱] و با استفاده از نرم افزار ILMAT [۲۱] گستره دمای بازتوازنندی^{۱۰} نسبتاً گسترده‌ای (۷۰۰-۴۵۰ °C) را در شرایط فوگاسیته اکسیژن نسبتاً پایین (۱۹±۳ fO₂) نشان می‌دهد. این پذیرفته شده است که مگنتیت اولیه معمولاً در اثر واکنش درون اکسیدی^{۱۱} به تعادل دوباره می‌رسد، به طوریکه اولواسپینل در محلول جامد مگنتیت-اولواسپینل، در دمای متوسط اکسیده شده و تیغه‌ها یا ذرات برون‌رست ایلمنیت را در داخل و اطراف مگنتیت ایجاد می‌کند [۱۶ و ۱۷]. علاوه بر توزیع دوباره Fe و Ti بین فازهای

10 - Re-equilibration

11 - Intra oxide-reaction

اکسیدی هنگام سرد شدن، تبادل Fe-Mg پسا ماگمایی^{۱۲} نیز ترکیب اولیوین و کلینوپیروکسن را متأثر کرده و در نتیجه مقدار Mg در اکسیدهای Fe-Ti (به ویژه ایلمنیت) که با این فازهای سیلیکاتی احاطه شده‌اند، کاهش می‌یابد [۲۳]. به همین دلیل است که بلورهای سیلیکاته به ویژه اولیوین همجوار با اکسیدهای Fe-Ti در توده قره آغاج از لحاظ مقدار Mg در حاشیه بلور نسبت به هسته آن غنی‌ترند (شکل ۴ب) [۱۸].

وجود مجموعه کانی‌شناسی دو اکسیدی (Ilm+Mag) در اولترامافیکها در مقایسه با ایلمنیت به عنوان تنها اکسید Fe-Ti در سنگهای مافیک قره آغاج از جمله شواهدی است که می‌تواند در روشن شدن ارتباط بین این سنگها مفید باشد. اگر فرض کنیم سنگهای اولترامافیک و مافیک (میزبان) دارای ارتباط مستقیمی با یکدیگر و هم ماگما هستند، در این صورت تغییر از پاراژنر ایلمنیت در گابروها به مجموعه ایلمنیت و مگنتیت در اولترامافیکها بایستی توضیح داده شود. برخی از محققین [۹]، احتمالات ممکن را در این خصوص برای توده Labrieville کبک کانادا مورد بحث قرار داده و سازوکارهایی مثل: (۱) افزایش در نسبت Fe/Ti در fO_2 نسبتاً ثابت، (۲) کاهش در fO_2 در نسبت Fe/Ti تقریباً ثابت در طول تفریق و (۳) نتیجه واکنشهای مختلف که در آنها فازهایی مانند ایلمنیت، اورتوپیروکسن، کوارتز، و اولواسپینل درگیر هستند (بدون تغییر در fO_2). چنانکه این محققین نیز اشاره کرده‌اند بلوری شدن ایلمنیت ($Fe \approx Ti$) و پیروکسن ($Fe \leq Ti$) به نظر می‌رسد منجر به کاهش نسبت Fe/Ti شود (تأثیر وارون) و کاهش fO_2 در حالتی که Fe/Ti ثابت باشد، نیز می‌تواند بلوری شدن سیلیکاتهای غنی از Fe را در سنگهای FTP به جای بلوری شدن مگنتیت موجب شود. از طرف دیگر در توده قره آغاج به دلیل نبود کوارتز، اورتوپیروکسن، و مقدار اندکی ایلمنیت در گابروها، می‌توان گفت که احتمال سوم نیز صورت نگرفته است. علاوه بر موارد یاد شده، اگر معیار قضاوت ترکیب ایلمنیت در سنگهای مختلف توده قره آغاج باشد، با توجه به مقدار بالاتر Mg و پایین‌تر Mn در ایلمنیت اولترامافیکها در مقایسه با گابروها (جدول ۱) به نظر می‌رسد که انواع FTP نسبت به سنگ میزبان اولیه‌تر (کمتر تفریق یافته) هستند. از این رو با توجه به شواهد ارائه شده ارتباط ژنتیکی اولترامافیکها با سنگ میزبان گابرویی قابل قبول نیست.



شکل ۴ الف) نمودار تغییرات عدد منیزیم اولیوین ($Ol\ Mg\#$) نسبت به عدد منیزیم اسپینل ($Sp\ Mg\#$) برای سنگهای اولترامافیک غنی از آپاتیت (♦) و انواع فقیر از آپاتیت (●) (ب) نیمرخ تغییرات ترکیبی بلورهای اولیوین احاطه شده با اکسیدهای Fe-Ti بر اساس عدد منیزیم ($Mg\#$).

اگر چه حضور میانبارها و قطرکهای اکسید و سولفید در سنگهای FTP به صورت کلاسیک شاهدهی بر عملکرد فرایند ناآمیختگی آگونها تفسیر می‌شوند [۱۲]، با این وجود برخی این پدیده را ناشی از آرایش دوباره این فازها در زیر نقطه ذوب در نظر می‌گیرند [۱۳]. در هر صورت، وجود این میانبارها در فازهای سیلیکاته پیش بلوری شده (مثل اولیوین) در سنگهای اولترامافیک قره آغاج (شکل ۲ و ۳)، حداقل این موضوع را آشکار می‌سازد که ترکیبهای غنی از Fe-Ti-P-S در سیستم ماگمایی اولیه حضور داشته‌اند.

وجود ایلمنیت در سنگهای FTP قره آغاج به عنوان فاز اکسیدی غالب و بلورهای مجزا (شکل ۲) می‌تواند به تنهایی نشان دهنده شرایط fO_2 نسبتاً پایین باشد. به طور کلی علاوه بر مقدار Ti و شرایط fO_2 مناسب، مقدار فسفر در ماگما نیز عامل مهمی برای کنترل پاراژنز اکسیدهای Fe-Ti است. مقدار بالای P_2O_5 در ماگما می‌تواند بلوری شدن مگنتیت را در مقایسه با ایلمنیت محدود کند [۲۵ و ۲۴]. از سوی دیگر فسفر می‌تواند حلالیت ترکیبهای اکسیدی (Fe, Ti) را در سیلیکات مذاب کاهش داده و مانع از اشباع شدن مذاب باقی‌مانده از Fe و Ti شده و در نتیجه موجب تشکیل ذخایر با عیار بالا (به شکل لایه‌ای یا کپه‌ای) شود [۲۶ و ۱۳]، پدیده‌ای که در توده قره آغاج رخ نداده است.

برداشت

۱- با توجه به توزیع تقریباً همگن تیغه‌های برون‌رست ایلمنیت در تیتانومگنتیت سنگهای FTP، برخلاف آنچه از مدل اکسایش-برون‌رست [۱۶] استنباط می‌شود (آغاز اکسایش و برون‌رستی از حاشیه بلور)، به نظر می‌رسد تفسیر Mucke [۲۷] از این پدیده قابل قبول‌تر است.

۲- بافت کانی‌سازی در توده قره آغاج به دو صورت پراکنده^{۱۳} و مشبک^{۱۴} بوده و نوع کپه‌ای یا لایه‌ای (ذخایر با عیار بالا) مشاهده نمی‌شود.

۳- بر پایه شواهد صحرایی، ژئوشیمیایی [۱۸]، و کانی‌شناسی (از جمله ترکیب ایلمنیت و پاراژنز متفاوت اکسیدهای Fe-Ti)، به نظر می‌رسد باید شرایط متفاوتی از بلوری شدن و تکامل ماگمایی برای توصیف تفاوت کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی سنگهای مافیک و اولترامافیک قره آغاج (مثل ماگمای مادر و شرایط fO_2 متفاوت) در نظر گرفت، بدین معنی که این دو، گروه سنگی اصلی هم ماگما محسوب نمی‌شوند.

۴- بر اساس نوع کانی‌سازی در توده قره آغاج می‌توان به این نتیجه رسید که برای تشکیل کانسارهای با عیار بالای اکسید Fe-Ti، علاوه بر غنی‌شدگی ماگما از Fe و Ti، میزان P_2O_5 در ماگما و شرایط مناسب fO_2 (نسبتاً بالا) عملکرد سازوکارهای تمرکز دهنده‌ای مانند ناآمیختگی آگونها، پالایش فشاری، و در مواردی، دگرشکلی زیر نقطه ذوب نیز ضروری است.

۵- کانسار تیتانیم-فسفات قره آغاج با توجه به مقدار TiO_2 نسبتاً پایین (۴-۹ wt.%)، توزیع و تمرکز بخشی از Ti در ساختار تیتانومگنتیت (فاقد ارزش اقتصادی)، درجه آزادی پایین و متغیر کانه ارزش (ایلمنیت نسل دوم)، تناوب سنگ‌های غنی از آپاتیت با انواع فقیر از آپاتیت، در گروه کانسارهای کم‌عیار تیتانیم قرار گرفته و برای ادامه بررسی اکتشافی، توصیه نمی‌شود، با این وجود به دلیل حجم بالای ذخیره، ادامه تحقیقات با هدف بهینه‌سازی عملیات فرآوری می‌تواند راهگشا باشد.

۶- فراوانی ایلمنیت به شکل بلورهای مجزا، نسبت بالای ایلمنیت به مگنتیت، مقدار قابل توجه MgO در کل سنگ و اولیوین [۱۸]، نبود سنگ‌های نلسونیتی، آنورتوزیتی، فروگابرو، و فرودیوریت، همراهی سنگ‌های اولترامافیک غنی از آپاتیت و فقیر از آن و جایگیری دهها لایه و توده سیل مانند از سنگ‌های FTP در سنگ میزبان گابرویی بدون کانی‌سازی با همبری تیز و موازی، از جمله ویژگی‌های خاص توده نفوذی قره آغاج بوده و از این رو می‌توان این توده را به عنوان نوع جدیدی از سنگهای FTP معرفی کرد.

مراجع

[1] Haghipour A., Aghanabati A., "Geological quadrangle map of Iran No. A3. Serow sheet, Series 1:250000", Geological Survey of Iran (GSI), (1973) Tehran.

13- Disseminate

14- Net-texture

- [۲] کاوشگران، مهندسین مشاور، "گزارش پتانسیل یابی مواد معدنی در منطقه شمالغرب شهرستان ارومیه"، تهران (۱۳۷۱).
- [۳] کاوشگران، مهندسین مشاور، "گزارش طرح اکتشاف نیمه تفصیلی تیتان و فسفات در منطقه قره آغاج"، تهران (۱۳۷۵).
- [۴] کاوشگران، مهندسین مشاور، "گزارش مطالعه فرآوری تیتان و فسفات منطقه قره آغاج ارومیه (در مقیاس آزمایشگاهی)"، تهران (۱۳۷۶).
- [۵] کاوشگران، مهندسین مشاور، "گزارش طرح اکتشاف تفصیلی تیتان قره آغاج ارومیه (فاز یک)"، تهران (۱۳۷۷).
- [۶] علیپور اصل، م.، "بررسی زمین‌شناسی اقتصادی و پترولوژی مجموعه آذرین مافیک و اولترامافیک ایلمنیت - آپاتیت‌دار شمال قره آغاج ارومیه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۷۵) ۲۶۹ صفحه.
- [۷] امامعلی‌پور ع.، مسعودی ج.، عبداللهی شریف ج.، "بررسی زمین‌شناسی اقتصادی و کانه‌آرایی مقدماتی کانسار ایلمنیت-آپاتیت قره آغاج ارومیه"، سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران (۱۳۷۸)
- [۸] رحیم سوری ی.، "بررسی اکتشافی پتانسیل تیتانیم قره آغاج ارومیه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران (۱۳۸۰) ۱۵۴ صفحه.
- [9] Owens B. E., Dymek R. F., "Fe-Ti-P-rich rocks and massif anorthosite: problems of interpretation illustrated from the Labrieville and St-Urbain plutons, Quebec", Can Mineral 30 (1992) 163-190.
- [10] Kolker A., "Mineralogy and geochemistry of Fe-Ti oxide and apatite (nelsonite) deposits and evaluation of the liquid immiscibility hypothesis", Econ Geol 77 (1982) 1146-1158.
- [11] Morse S. A., "The differentiation of the Skaergaard intrusion. Discussion of Hunter and Sparks", (Contrib Min Petrol. 95:451-461), Contrib Min Petrol 104 (1990) 235
- [12] Force E. R., "Geology of titanium mineral deposit", Geological Society of America Special Paper 259 (1991) 112p
- [13] Duchesne J. C., "Fe-Ti deposits in Rogaland anorthosites (South Norway)", geochemical characteristics and problems of interpretation", Mineral Deposita 34 (1999) 182-198
- [14] Markl G., "REE constraints on fractionation processes of massive-type anorthosites on the Lofoten Islands, Norway", Mineral Petrol 72 (2001) 325-351.

- [15] Dymek H. F., Owens B. E., "Petrogenesis of apatite-rich rocks (nelsonites and oxide-apatite gabbro-norites) associated with massif anorthosites", *Econ Geol* 96 (2001) 797-815
- [16] Buddington A. F., Lindsley D. H., "Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents", *J. petrol* 5 (1964) 310-357
- [17] Haggerty S. E., "Oxide textures: A mini-atlas. In: Lindsley DH (ed) *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance*", *Reviews in Mineralogy* 25 (1991) 129-219
- [18] Mirmohammadi M., Kananian A., Tarkian M., "The nature and origin of Fe-P-Ti-rich rocks in the Qareaghaj mafic-ultramafic intrusion, NW of Iran", *Mineral Petrol*, in press
- [19] Bishop F. C., "The distribution of Fe²⁺ and Mg between coexisting ilmenite and pyroxene with applications to geothermometry", *Am J Sci* 280 (1980) 46-77
- [20] Kretz R., "Metamorphic Crystallization", John Wiley & Sons (1994) 507 pp
- [21] Andersen D. J., Lindsley D. H., "New (and final!) models for the Ti-magnetite/ilmenite geothermometer and oxygen barometer", *EOS* 66 (1985) 416.
- [22] Lepage L. D., "ILMAT: An Excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry", *Comp Geosci* 29 (2003) 673-678
- [23] Frost B. R., Lindsley D. H., "Equilibria among Fe-Ti oxides, pyroxenes, olivine and quartz: Part II. Application", *Am Mineral* 77 (1992) 1004-1020.
- [24] Toplis M. J., Dingwell D. B., Libourel G., "The effect of phosphorus on the iron redox ratio, viscosity and density of an emolalved ferro-basalt", *Contrib Mineral Petrol* 117(1994) 293-304
- [25] Zhou M. F., Robinson P. T., Leshner M., Keays R. R., Zhang C. J., Malpas J., "Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan province, SW China", *J. petrol* 46 (2005) 2253-2280
- [26] Kärkkäinen N. K., Appelqvist H., "Genesis of a low-grade apatite-ilmenite-magnetite deposit in the Kauhajärvi gabbro, Western Finland", *Mineral Deposita* 34 (1999) 754-769.
- [27] Mücke A., Younessi R., "Magnetite-apatite deposits (Kiruna-type) along the Sanandaj-Sirjan zone and in the Bafq area, Iran, associated with ultramafic and calcalkaline rocks and carbonatites", *Mineral Petrol* 50 (1994) 219-244.