



بررسی ساختار درونی، شیمی کانی‌ها و خاستگاه اکسید Fe-Ti در توده نفوذی مافیک - فرامافیک لایه‌ای غازان - خانیک، شمال غرب ارومیه

منیژه اسدپور^{۱*}، ثریا هویس^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

۲- گروه علوم زمین و محیط زیست، دانشگاه LM مونیخ، آلمان

(دریافت مقاله: ۹۶/۱۰/۹، نسخه نهایی: ۹۷/۱/۲۶)

چکیده: مجموعه غازان - خانیک یک توده نفوذی مافیک - فرامافیک لایه‌ای کوچک با سن پرمین هست که در انتهای شمال غربی پهنه سنج - سیرجان در سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین رخمون دارد. بررسی‌های صحرایی، شیمی کانی‌ها و مجموعه کانیایی نشان می‌دهد که این توده چهار پهنه دارد. پائین‌ترین پهنه گابروهای غیرلایه‌ای با ترکیب گابروهای نوریتی ریزدانه و بدون کانه‌زایی است. پهنه دوم فرامافیک‌های بدون آپاتیت غنی از اکسید Fe-Ti (۲۵-۳۰٪) شامل کلینوپیروکسنیت، ورلیت و اندکی دونیت است. کانه‌زایی اکسید Fe-Ti خالص (با بیش از ۹۰٪) بصورت بخش‌های انباشتی سیل‌مانند مجزا در این پهنه صورت گرفته است. گابروهای لایه‌ای، پهنه سوم را تشکیل می‌دهند. کانه‌زایی اکسید Fe-Ti (۵-۱۰٪) در این پهنه فقط در بخش‌های دربردارنده آپاتیت صورت گرفته است. بالاترین پهنه شامل آنورتوزیت و پگماتیت گابروهایی با ۲-۱۰٪ اکسید Fe-Ti است. بر پایه این بررسی‌ها، در تشکیل لایه‌های غنی از اکسید Fe-Ti، هر دو فرآیند (۱) غنی‌شدگی در مذاب‌های باقیمانده مشتق شده از یک ماگمای مادر فروبازالتی و (۲) تزریق یک سیال غنی از Fe-Ti حل نشده به داخل بخش مافیک - فرامافیک در حال تبلور دخیل هستند.

واژه‌های کلیدی: اکسید Fe-Ti؛ شیمی کانی؛ ساختار درونی؛ مافیک-فرامافیک لایه‌ای؛ غازان - خانیک.

مقدمه

دیگری فرآیند ناآمیختگی سیال‌هاست. در نظریه دوم اعتقاد بر این است که این کانسارها از مذاب‌های حل‌ناپذیر Fe-Ti جدا شده از ماگمای مافیک مادر نتیجه شده‌اند [۸، ۷، ۴]. فرضیه مایعات ناآمیخته طرفدار بیشتری دارد، زیرا می‌تواند پیدایش توده‌های ناهمشیب (مثل رگه‌ها، عدسی‌ها و دایک‌ها) و گاهی هم شیب از کانسارهای اکسید Fe-Ti خالص را توضیح دهد، ولی متأسفانه این فرآیند در جزئیات با اشکالات و ابهاماتی همراه است [۶-۲۴]. عملکرد فرآیند غنی‌شدگی مایعات باقیمانده بدون ایجاد مایعات ناآمیخته نمی‌تواند تشکیل کانسارهای اکسید Fe-Ti خالص را توضیح دهد، ولی برعکس شاید بتواند فرضیه‌ای برای تشکیل سنگ‌های غنی از اکسیدهای Fe-Ti دربردارنده فازهای سیلیکاته محسوب شود.

با وجود کانسارهای غنی از اکسیدهای Fe-Ti با یا بدون آپاتیت در مناطق مختلف دنیا، هنوز در مورد خاستگاه، چگونگی تمرکز و سازوکارهای تشکیل و تمرکز آنها اطلاعات زیادی وجود ندارد. ذخایر معدنی اکسیدی Fe-Ti معمولاً با نفوذی‌های لایه‌ای مافیک - فرامافیک و یا مجموعه‌های آنورتوزیتی همراه هستند [۳-۱]، و در این حالت بیشتر به صورت رگه، عدسی و یا بخش‌های محصور شده هستند [۵، ۴]. بحث‌ها و نظریه‌های مختلفی در مورد خاستگاه این کانسارها وجود دارد. دو فرضیه متداول با دو سازوکار متفاوت در این زمینه بیشترین طرفدار را دارد؛ یکی مربوط به غنی‌شدگی در مذاب‌های باقیمانده در نتیجه جدایش و ته‌نشست بلوری از ماگمای فروبازالتی [۶، ۵] و

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۳۴۳۳۲۰۲، نامبر: ۳۲۷۵۳۲۷۲-۰۴۴، پست الکترونیکی: m.asadpour@urmia.ac.ir

در یک مایع باقیمانده و دمای همگدازی، کانی‌های سیلیکاته می‌توانند همزمان با اکسیدهای Fe-Ti متبلور شوند. در سال‌های اخیر، حل‌ناپذیری سیال غنی از اکسیدهای Fe-Ti در ماگماهای تولیتی تکامل یافته، به ویژه در نفوذی‌هایی مانند اسکرگارد و سپت - ایلز (Sept Iles) مطرح گردیده است [۹-۱۱].

توده نفوذی مافیک و فرامافیک غازان - خانیک (GKMUC) در غرب دریاچه ارومیه، بین طول‌های جغرافیایی $38^{\circ} 44'$ تا $40^{\circ} 44'$ شرقی و عرض جغرافیایی $58^{\circ} 37'$ تا $00^{\circ} 38'$ شمالی قرار دارد (شکل ۱). این توده نفوذی بخشی از توده‌های نفوذی اوایل پرمین شمال غرب پهنه سنج - سیرجان است [۱۲]. این توده از نظر حجمی از نفوذی‌های لایه‌ای شناخته شده‌ای مانند بوشولد در آفریقای جنوبی [۱۳]، سپت ایلز در کانادا [۱۴] و اسکرگارد در گرینلند [۱۵] و حتی قره آغاج [۱۶] واقع در ۲۷ کیلومتری جنوب شرقی آن کوچکتر هست. با این حال، ویژگی مشخص این توده نفوذی کوچک، کانه‌زایی اکسید Fe-Ti در بخش‌های مختلف آن است. بیشتر ذخیره اکسید Fe-Ti در بخش فرامافیک و مقداری نیز در بخش مافیک قرار دارد. بررسی سنگ‌شناسی، شیمی کانی‌ها و همچنین بررسی ساختار درونی مجموعه GKMUC از نظر منطقه‌بندی واحدهای مختلف سنگی موضوع این پژوهش است. سرانجام نتایج به دست آمده تعیین خاستگاه چنین انباشتی از اکسید Fe-Ti در آن را ممکن می‌کند.

زمین شناسی

مجموعه GKMUC سن اوایل پرمین [۱۲] را داشته و داخل سنگ‌های دگرگونی شامل شلیست، گنایس و آمفیبولیت مربوط به پرکامبرین و آهک‌های دگرگون شده پالئوزوئیک [۱۲-۱۷] قرار دارند. این مجموعه شکل بیضی با ابعاد حدود ۳ در ۲ کیلومتر و با روند تقریبی شمالی- جنوبی دارد (شکل ۱). در سال‌های اخیر سن سنجی با روش U-Pb دانه‌های زیرکن، سن ~ 300 میلیون سال را برای گابروهای GKMUC تعیین کرده و به فعالیت‌های تنوره گوشته‌ای نسبت داده شده است [۱۲].

جز بخش جنوبی آن که توسط سنگ‌های آتشفشانی کواترنری پوشیده شده، سایر بخش‌ها با گابروهای غیرلایه‌ای هم‌سن محصور شده است [۱۷]. بهترین محل رخنمون واحدهای سنگی مجموعه متشکل از سنگ‌های مافیک- فرامافیک تا آنورتوزیت داخل دره‌ای در سه کیلومتری جنوب غربی روستای غازان است. بخش مافیک، شامل دو قسمت، گابروی لایه‌ای و گابروی غیرلایه‌ای است. بخش‌های لایه‌ای

بیشترین حجم برونزد را در مجموعه دارند که در شمال، غرب و جنوب توسط بخش گابروهای دانه‌ریز غیرلایه‌ای احاطه شده‌اند. در کل از نظر سنگ‌شناختی، ریزگابرو، گابروی درشت تا متوسط بلور، پگماتیت گابرو، گابروی لایه‌ای، لوکوگابرو و آنورتوزیت به ترتیب فراوانترین سنگ‌های بخش مافیک GKMUC را تشکیل می‌دهند. تبدیل بین این واحدها در رخنمون‌های مختلف متفاوت است، که اغلب موازی، تیز و گاهی تدریجی است. دایک‌های تونالیتی و دلریتی با ضخامت کمتر از ۳ متر این مجموعه را قطع کرده‌اند (شکل ۲). بخش گابروی غیرلایه‌ای، بافت دانه‌ریز با دانه‌های تقریباً هم‌اندازه و متوسط دارد. این گابروها با بافت غالب هم‌دانه‌ای بیشترین بخش مافیکی را بخود اختصاص داده‌اند و بندرت همبری مشخصی از آنها با سایر بخش‌ها قابل دسترسی است. چنین به نظر می‌رسد که این گابروها با بخش‌های دیگر توده در برخی رخنمون‌ها همبری نامنظم و در برخی دیگر همبری تیز است (شکل ۱). اکسید Fe-Ti به صورت بخش‌های بین بلوری در انواع سنگ‌های مافیکی دیده می‌شود.

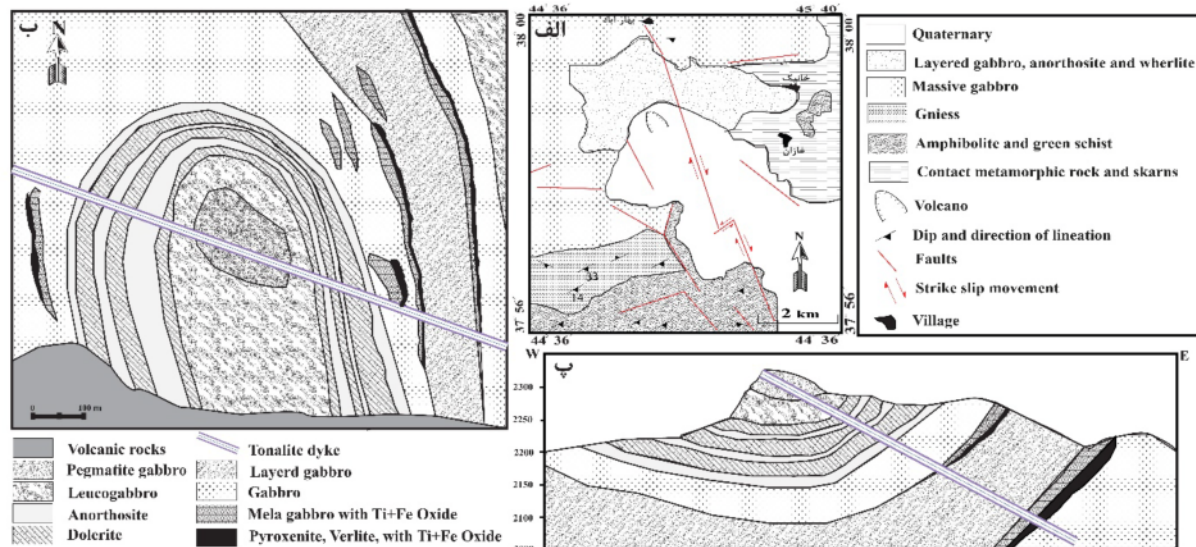
سنگ‌های فرامافیک بیشتر شامل وریلت، پیروکسنیت و کمی دونیت هستند که در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از حجم توده را تشکیل می‌دهند. رخنمون آنها محدود است و فقط در برخی قسمت‌ها، آنها به صورت بخش‌های سیل مانند موازی با بخش گابروهای غیر لایه‌ای هستند. آنورتوزیت‌ها بصورت لایه‌های روشن منظم و گاهی نامنظم و عدسی شکل، به ترتیب در بالای گابروهای لایه‌ای و در بخش گابروهای درشت دانه دیده می‌شوند. لایه‌های آنورتوزیتی به دو صورت آنورتوزیت خالص و آنورتوزیت پیروکسن‌دار یا آنورتوزیت خالدار رخنمون دارند. لایه‌های آنورتوزیتی از چند سانتی‌متر تا چندین ده متر ضخامت دارند و به تناوب چندین بار تکرار شده‌اند. دلریت‌ها به دو صورت ۱- لایه‌های تیره بطور متناوب همراه با لایه‌های آنورتوزیتی و ۲- دایک در گابروها دیده می‌شوند (شکل ۱). ضخامت بخش‌های دلریتی از ۳۰ سانتی‌متر تا یک متر متغیر هست. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که گابروهای لایه‌ای در دو مقیاس ماکروریتمی و میکروریتمی لایه‌بندی دارند (شکل ۲). لوکوگابروها و سپس پگماتیت گابروها آخرین لایه‌های مجموعه هستند که بر واحدهای پیشین در نزدیکی سقف مخزن ماگمایی قرار دارند. گاهی بخش‌های خالصی از اکسید- های Fe-Ti به صورت انباشت سیل مانند در نزدیک فرامافیک- ها دیده می‌شود که بخش‌های کنده شده از آن را بصورت قطعات بزرگ و کوچک پراکنده با قطر کمتر از یک متر در

نقطه‌ای کانی‌های مختلف انتخاب شدند. جهت بررسی نقطه‌ای کانی‌های سازنده سنگ‌های مختلف، تجزیه کمی کانیایی توسط دستگاه ریزپردازنده الکترونی (مدل CAMECA SX-100 با ولتاژ 12 kV و شدت جریان 10 nA) در آزمایشگاه ریزپردازنده الکترونی دانشگاه لودویک ماکسیمیلیان LMU، شهر مونیخ در آلمان انجام شد (جدول‌های ۱ تا ۵).

پایین ارتفاعات و در دره‌ها می‌توان دید. علاوه بر آن، در آبراهه-ها اکسیدهای Fe-Ti پلاستی نیز وجود دارد.

روش بررسی

حدود ۱۰۰ نمونه از انواع مختلف سنگ‌های GKMUC برداشت شد. از همه نمونه‌های جمع‌آوری شده، با استفاده از دستگاه برش سنگ، پس از تهیه مغزه تازه، ۵۰ مقطع نازک تهیه شد. پس از بررسی مقاطع نازک، ۲۶ نمونه برای تجزیه



شکل ۱ الف) نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه غازان (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سرو، سیزه‌ای و همکاران، ۱۳۷۸)، ب) جایگاه لایه‌های مختلف GKMUC نسبت به هم، و پ) نیمرخ مجموعه که بطور تقریبی جایگاه، راستا و شیب لایه‌ها در آن آورده شده است (ب و پ اقتباس از [۱۸]، با اندکی تغییرات).



شکل ۲ تصاویر صحرایی از GKMUC، الف) رخنمون گابروهای لایه‌ای ب) همبری بخش آنورتوزیتی با دایک دلریتی، پ) رخنمون همبری بخش‌های مختلف توده، ت) نمونه لوکوگابرویی با بخش‌های کانه‌زایی شده، ث) بخش‌های آنورتوزیتی در گابروها و ج) نمونه پگماتیت گابرو با بخش‌های کانه‌زایی شده.

جدول ۱ نتایج تجزیه ریزپردازشی کانی‌های اولیوین نمونه‌های انتخابی در دو نمونه ورلیت و دونیت.

سنگ	ورلیت					دونیت			
	1A81	2A08	2A10	2A18	2A30	2A58	2A59	2A61	2A62
نمونه	E:469760.22 N:4203480					E:469759 N:4203479			
مختصات									
SiO ₂	۳۵.۸۰	۳۶.۰۷	۳۳.۴۲	۳۶.۰۲	۳۵.۴۱	۳۵.۴۹	۳۶.۰۱	۳۵.۹۹	۳۶.۷۸
TiO ₂	۰.۱۹	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۶	۰.۰۰	۰.۰۳	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۸
Al ₂ O ₃	۱.۱۶	۰.۱۳	۱.۲۸	۰.۱۸	۰.۳۸	۰.۱۹	۰.۱۴	۰.۲۸	۰.۱۸
Cr ₂ O ₃	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
FeO	۳۵.۹۳	۳۵.۸۹	۴۰.۱۳	۳۶.۹۹	۳۶.۹۸	۵۹.۳۵	۳۷.۰۰	۳۸.۹۳	۳۴.۸۹
MnO	۰.۳۴	۰.۵۲	۰.۴۵	۰.۵۵	۰.۴۴	۰.۴۴	۰.۴۰	۰.۴۶	۰.۴۳
MgO	۲۷.۰۰	۲۶.۹۶	۲۳.۰۱	۲۵.۹۶	۲۵.۸۵	۲۷.۰۲	۲۶.۸۹	۲۳.۹۵	۲۷.۹۸
CaO	۰.۴۶	۰.۵۹	۰.۸۶	۰.۳۸	۰.۳۶	۰.۲۸	۰.۲۱	۰.۴۰	۰.۲۲
مجموع	۱۰۰.۹۱	۱۰۰.۱۶	۹۹.۱۷	۱۰۰.۱۳	۹۹.۴۵	۹۹.۰۳	۱۰۰.۶۵	۱۰۰.۰۳	۱۰۰.۵۷
Si	۰.۹۹	۱.۰۱	۰.۹۷	۱.۰۱	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۲	۱.۰۱
Ti	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Al	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۴	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱
Cr	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Fe(ii)	۰.۸۳	۰.۸۴	۰.۹۸	۰.۸۷	۰.۸۷	۰.۸۴	۰.۸۶	۰.۹۲	۰.۸۰
Mn	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱
Mg	۱.۱۱	۱.۱۲	۱.۰۰	۱.۰۹	۱.۰۹	۱.۱۴	۱.۱۲	۱.۰۱	۱.۱۵
Ca	۱.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱
مجموع	۳.۰۰	۳.۰۱	۳.۰۳	۳.۰۰	۳.۰۰	۳.۰۰	۳.۰۰	۲.۹۹	۲.۹۹
تعداد	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
Fo	۵۷.۰۲	۵۶.۸۹	۵۰.۲۷	۵۵.۲۲	۵۵.۱۸	۵۷.۲۱	۵۶.۱۷	۵۲.۰۱	۵۸.۵۴
Fa	۴۲.۵۷	۴۲.۴۹	۴۹.۱۷	۴۴.۱۲	۴۴.۲۸	۴۲.۲۶	۴۳.۳۵	۴۷.۴۲	۴۰.۹۴
Tr	۰.۴۰	۰.۶۲	۰.۵۶	۰.۶۶	۰.۵۳	۰.۵۲	۰.۴۷	۰.۵۷	۰.۵۲
#Mg	۵۷.۲۵	۵۷.۲۵	۵۰.۵۵	۵۵.۵۹	۵۵.۴۸	۵۷.۵۱	۵۶.۴۴	۵۲.۳۱	۵۸.۸۴

جدول ۲ نتایج آنالیز میکروپروپ کانی‌های پلاژیوکلاز انتخابی.

سنگ	فرامافیک			ریزگابرو			گابروی درشت			لوکوکابرو		
	10.2.16	11.2.16	10.2.16	241.1.2	241.1.4	241.1.5	1.2.12.11	1.312.11	1.412.11	1.4.1.9	3.4.1.9	4.4.1.9
نمونه	E:469760.22 N:4203479.88			E:469705.08 N:4204635.09			E:469420.38 N:4204377.19			E:469548.35 N:4204339.91		
مختصات												
SiO ₂	۵۴.۴۴۶	۵۶.۶۲۵	۵۴.۴۴۶	۵۶.۸۷۲	۵۷.۱۴	۵۷.۳۰۱	۵۴.۲۳۵	۵۳.۸۷۸	۵۷.۹۲۹	۳۹.۷۸۱	۶۲.۶۶۵	۴۴.۴۸۱
TiO ₂	۰.۰۵۸	۰.۰۷۰	۰.۰۵۸	۰.۰۵۸	۰.۰۵۳	۰.۱۶۰	۰.۰۰	۰.۰۱۰	۰.۰۱۲	۰.۰۸۶	۰.۰۶۹	۰.۰۶۲
Al ₂ O ₃	۲۹.۲۳۷	۲۶.۷۰۱	۲۹.۲۳۷	۲۶.۴۲۷	۲۶.۱۸۸	۲۶.۱۴۳	۲۸.۶۰۷	۲۹.۵۳۹	۲۶.۷۱۰	۲۷.۶۳۹	۲۴.۱۲۵	۲۶.۵۲۹
Fe ₂ O ₃	۰.۰۳۰	۰.۰۳۲	۰.۰۳۰	۱.۳۰۰	۰.۲۴۵	۰.۰۹۹	۰.۰۲۷	۰.۰۴	۰.۱۴۲	۷.۸	۰.۳۲۷	۰.۵۳۱
CaO	۹.۹۲۴	۱۰.۱۵۳	۹.۹۲۴	۹.۰۷۶	۹.۶۵۵	۹.۷۰۳	۱۲.۴۱۱	۱۲.۷۵۳	۹.۷۱۱	۲۴.۱۷	۲.۰۵۷	۱۹.۹۱
Na ₂ O	۷.۱۵۰	۵.۸۰۶	۷.۱۵۰	۵.۶۷۰	۶.۰۹۰	۵.۹۹۰	۴.۴۹۷	۴.۵۵۴	۵.۱۴۶	۰.۲۶۶	۷.۱۴۸	۲.۳۶۵
K ₂ O	۰.۰۱۵	۰.۰۶۸	۰.۰۱۵	۰.۰۸۳	۰.۰۰۵	۰.۰۰۳	۰.۰۱۶	۰.۰۱۳	۰.۰۱۷	۰.۰۲۵	۲.۷۹۵	۰.۰۳۳
Cr ₂ O ₃	۰.۰۰۲	۰.۰۰۹	۰.۰۰۲	۰.۰۱۸	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۲۴	۰.۰۲۲	۰.۰۲۵	۰.۰۲۰
MgO	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۵۱۶	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۴۲	۰.۰۰	۰.۷۱۷	۰.۰۰
MnO	۰.۰۰	۰.۰۲۵	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۲۱	۰.۰۰	۰.۰۴۴	۰.۰۰	۰.۱۴۶	۰.۰۰	۰.۱۵۳
NiO	۰.۰۰	۰.۰۱۶	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۴۸	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
مجموع	۱۰۰.۸۶	۹۹.۵۰۵	۱۰۰.۸۶	۱۰۰.۰۲	۹۹.۴۲۳	۹۹.۴۱۹	۹۹.۷۹۳	۱۰۰.۸۳	۹۹.۷۳۴	۹۹.۹۳۵	۹۹.۹۲۸	۱۰۰.۰۸۴
Si	۹.۷۷۴	۱۰.۲۳۰	۹.۷۷۴	۱۰.۲۸۷	۱۰.۳۲۴	۱۰.۳۳۹	۹.۸۲۰	۹.۶۸۰	۱۰.۳۷۸	۷.۸۹۵	۱۱.۱۹۰	۸.۶۲۴
Ti	۰.۰۰۸	۰.۰۱۰	۰.۰۰۸	۰.۰۰۸	۰.۰۰۷	۰.۰۲۲	۰.۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۱۳	۰.۰۰۹	۰.۰۰۹
Al	۶.۱۸۵	۵.۶۸۵	۶.۱۸۵	۵.۶۳۴	۵.۵۷۶	۵.۵۵۹	۶.۱۰۴	۶.۲۵۵	۵.۶۳۹	۶.۴۶۴	۵.۰۶۹	۶.۰۶۱
Fe(ii)	۰.۰۰۵	۰.۰۰۵	۰.۰۰۵	۰.۱۹۷	۰.۰۳۷	۰.۰۱۵	۰.۰۰۴	۰.۰۰۶	۰.۰۲۱	۱.۲۹۴	۰.۰۴۹	۱.۰۵۹
Ca	۱.۹۰۹	۱.۹۶۵	۱.۹۰۹	۱.۷۵۹	۱.۸۶۹	۱.۸۷۶	۲.۴۰۸	۲.۴۵۵	۲.۸۶۴	۵.۱۳۹	۰.۳۹۴	۴.۱۳۵
Na	۲.۴۸۸	۲.۰۳۳	۲.۴۸۸	۱.۹۸۸	۲.۱۳۳	۲.۰۹۵	۱.۵۷۹	۱.۵۸۶	۱.۷۸۷	۰.۱۰۲	۲.۴۷۴	۰.۸۸۹
K	۰.۰۰۳	۰.۰۱۶	۰.۰۰۳	۰.۰۱۹	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۴	۰.۰۰۳	۰.۰۰۴	۰.۰۰۶	۰.۶۳۵	۰.۰۸
تعداد اکسیدین	۲۰.۳۷۲	۱۹.۹۴۳	۲۰.۳۷۲	۱۹.۸۹۲	۱۹.۹۴۸	۱۹.۹۰۷	۱۹.۹۱۹	۱۹.۹۸۶	۱۹.۹۹۶	۲۰.۹۱۴	۱۹.۸۲۱	۲۰.۷۸۵
An	۴۳.۳۷۳	۴۸.۹۵۲	۴۳.۳۷۳	۴۶.۶۹۸	۴۶.۶۸۴	۴۷.۲۲۵	۶۰.۳۴۲	۶۰.۷۰۱	۵۰.۹۹۴	۹۷.۲۲۹	۰.۱۸۳	۸۲.۱۷۴
Ab	۵۶.۵۴۹	۵۰.۶۵۷	۵۶.۵۴۹	۵۲.۷۹۳	۵۳.۲۸۷	۵۲.۷۵۷	۳۹.۵۶۶	۳۹.۲۲۵	۴۸.۹۰۰	۱.۹۵۰	۹۸.۸۵۶	۱۷.۶۶۴
Or	۰.۰۷۸	۰.۳۹۰	۰.۰۷۸	۰.۰۵۸	۰.۰۲۹	۰.۰۱۷	۰.۰۹۳	۰.۰۷۴	۰.۱۰۶	۰.۱۲۱	۰.۹۶۰	۰.۱۶۲

جدول ۳ نتایج آنالیز میکروپروپ کانی های پیروکسن انتخابی تعدادی از سنگ های منطقه.

سنگ	ریزگابرو			فرامافیک			فرامافیک		
	241.1a.12	241.1a1211	241.2.2	0.21116	211.25	211.26	18.1a1	16.2.1	11.4.1
نمونه	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Cpx	Cpx	Cpx
کانی	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Cpx	Cpx	Cpx
مختصات	E:469705.08 N:4204635.09			E:469760.22 N:4203479.88			E:469760.22 N:4203479.88		
SiO ₂	۵۳.۱۷۵	۵۳.۱۹	۵۴.۱۴۱	۳۶.۰۳۲	۳۷.۳۹۹	۳۷.۶۶۹	۵۱.۱۸۱	۵۱.۳۵۱	۵۱.۰۹۳
Al ₂ O ₃	۱.۵۸۴	۱.۵۸۵	۱.۷۵۸	۰.۳۰۱	۰.۱۲۹	۰.۱۳۲	۴.۶۲۴	۴.۳۰۶	۴.۵۶۷
Cr ₂ O ₃	۰.۰۶۸	۰.۰۶۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۴	۰.۰۲۸	۰.۰۲۴
TiO ₂	۰.۲۴۱	۰.۲۲۳	۰.۰۶۳	۰.۰۲۸	۰.۰۲۳	۰.۰۰۴	۰.۰۰۷	۱.۰۲۴	۱.۰۳۷
MgO	۱۹.۵۰۴	۱۹.۶۸۵	۱۶.۸۸۳	۲۴.۴۱۶	۲۵.۱۲	۲۵.۵۵۶	۱۲.۵۱۶	۱۲.۳۱۳	۱۲.۹۴۶
FeO	۲۴.۰۳	۲۴.۰۳۱	۲۳.۹۲	۳۷.۱۱۸	۳۳.۹۰۵	۳۳.۷۹۳	۸.۵۹۳	۹.۴۶	۱۰.۲۶۹
MnO	۰.۶۱۳	۰.۶۱۳	۰.۶۷۸	۰.۳۸۶	۰.۳۹۸	۰.۴۱۸	۰.۲۱۵	۰.۳	۰.۲۹۲
CaO	۱.۱۵۹	۱.۱۶	۲.۶۲۶	۰.۵۹۳	۰.۲۸۲	۰.۲۸۸	۲.۱۶۲	۲.۰۶۲۲	۱.۹۳۹۹
Na ₂ O	۰.۰۰۵	۰.۰۰۵	۰.۰۲۱	۰.۰۲۳	۰.۰۴۲	۰.۰۳۳	۰.۷۶۹	۰.۸۴۸	۰.۷۲۲
K ₂ O	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۳۵	۰.۰۱۸	۰.۰۰۹	۰.۰۱۲	۰.۰۰	۰.۰۲۱	۰.۰۰
NiO	۰.۰۳۹	۰.۰۳۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱۹	۰.۰۴	۰.۰۰
مجموع	۱۰۰.۴۲۸	۱۰۰.۵۹۴	۱۰۰.۳۱۶	۹۸.۹۱۵	۹۷.۳۰۷	۹۷.۹۰۵	۱۰۰.۴۴۸	۱۰۰.۲۷۷	۱۰۰.۳۴۹
Si	۲.۰۱۲	۲.۰۰۹	۲.۰۳۹	۱.۴۳۵	۱.۴۱۲	۱.۴۳۶	۱.۸۹۶	۱.۹۱	۱.۹
Al	۰.۰۶۸	۰.۰۶۸	۰.۰۷۷	۰.۰۱۴	۰.۰۰۶	۰.۰۰۶	۰.۲۰۲	۰.۱۸۹	۰.۲
Cr	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱
Ti	۰.۰۰۷	۰.۰۰۶	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰	۰.۰۲۵	۰.۰۲۹	۰.۰۲۹
Mg	۱.۰۶	۱.۰۶۸	۰.۹۳۱	۱.۲۷۲	۱.۴۵۳	۱.۴۵۲	۰.۶۹۱	۰.۶۸۳	۰.۷۱۸
Fe ²⁺	۰.۷۳۳	۰.۷۳۲	۰.۷۴	۰.۲۱۲	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۲۵۵	۰.۲۹۴	۰.۳۱۹
Fe ³⁺	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۱.۱۱۶	۱.۱	۱.۰۷۷	۰.۰۱۱	۰.۰۰	۰.۰۰
Mn	۰.۰۱۹	۰.۰۱۹	۰.۰۲۱	۰.۰۱۳	۰.۰۱۳	۰.۰۱۳	۰.۰۰۷	۰.۰۰۹	۰.۰۰۹
Ca	۰.۰۴۵	۰.۰۴۵	۰.۱۰۴	۰.۰۲۵	۰.۰۱۲	۰.۰۱۲	۰.۸۵۸	۰.۸۲۲	۰.۷۷۲
Na	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱۵	۰.۰۰۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۵۵	۰.۰۶۲	۰.۰۵۲
K	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰
Ni	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
تعداد اکسیژن	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶
مجموع کاتیون	۳.۹۴۷	۳.۹۵	۳.۹۳۱	۴.۰۰	۴.۰۰	۳.۹۹۹	۴.۰۰	۴.۰۰	۴.۰۰

جدول ۴ نتایج آنالیز میکروپروپ کانی های ایلمنیت نمونه های انتخابی.

سنگ	فرامافیک				اکسید خالص				ریزگابرو			
	211.14.1	2.211	1.2113b	6.2113b	33.	53.	63.	73.	118.	1a9	1a91211	219.
مختصات	E:469760.22m N:4203479.88m				E:469692.39m N:4203462.54m				E:469705.08m N:4204635.09m			
SiO ₂	۰.۰۸۴	۰.۰۳۴	۰.۰۵۲	۰.۰۶۰	۰.۰۷۳	۰.۰۲۸	۰.۰۰۱	۰.۰۰۳	۰.۱۰۴	۰.۱۰۵	۰.۱۰۵	۰.۰۶۴
Al ₂ O ₃	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
Cr ₂ O ₃	۰.۰۶۷	۰.۰۰۰	۰.۰۳۵	۰.۰۱۴	۰.۰۰۰	۰.۰۱۴	۰.۰۲۶	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
TiO ₂	۵۳.۹۴۱	۵۷.۱۶۷	۵۳.۱۳۶	۵۳.۸۸۳	۵۱.۳۰۲	۵۱.۲۹۴	۵۱.۶۷۰	۵۲.۰۶۳	۵۲.۷۳۷	۵۲.۶۰۵	۵۲.۳۹۱	۵۲.۵۱۶
MgO	۱.۷۱۷	۰.۶۹۵	۱.۸۷۶	۱.۸۰۲	۰.۳۷۱	۰.۳۸۸	۰.۲۹۹	۰.۴۱۵	۰.۱۴۷	۰.۱۲۳	۰.۱۲۵	۰.۱۳۶
FeO	۴۴.۲۰۲	۴۱.۴۵۲	۴۳.۶۷۵	۴۳.۸۵۹	۴۵.۷۹۰	۴۵.۹۹۸	۴۶.۲۰۳	۴۶.۱۹۸	۴۵.۷۴۷	۴۵.۳۸۰	۴۵.۴۰۴	۴۵.۸۹۳
MnO	۰.۷۴۰	۰.۵۹۸	۰.۷۲۸	۰.۷۷۵	۰.۸۳۴	۰.۸۲۲	۰.۸۷۵	۰.۸۹۰	۱.۰۰۹	۱.۰۱۵	۱.۰۱۲	۱.۳۰۱
CaO	۰.۰۰۰	۰.۰۳۵	۰.۰۰۹	۰.۰۰۰	۰.۰۰۸	۰.۰۲۴	۰.۰۰۵	۰.۰۰۰	۰.۰۴۵	۰.۰۴۴	۰.۰۴۴	۰.۰۸۹
Na ₂ O	۰.۰۲۰	۰.۰۰۴	۰.۰۴۸	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۳۱	۰.۰۰۳	-	-	-	-
K ₂ O	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۷	۰.۰۰۰	۰.۰۰۴	۰.۰۰۰	۰.۰۰۵	-	-	-	-
NiO	۰.۰۰۰	۰.۰۱۶	۰.۰۱۷	۰.۰۱۱	۰.۰۰۰	۰.۰۶۵	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	-	-	-	-
مجموع	۱۰۰.۷۷	۱۰۰.۲۷	۹۹.۵۷۹	۱۰۰.۴۱۰	۹۸.۳۷۹	۹۸.۶۳۸	۹۸.۱۱۱	۹۹.۵۷۵	۹۹.۷۸۹	۹۹.۲۷۲	۹۹.۰۸۱	۹۹.۹۹
Si	۰.۰۰۲	۰.۰۰۷	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۵	۰.۰۰۵	۰.۰۰۵	۰.۰۰۳
Al	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۵	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
Cr	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
Ti	۱.۰۰۱	۱.۰۵۰	۰.۹۹۸	۱.۰۰۳	۰.۹۸۶	۰.۹۸۴	۰.۹۸۷	۰.۹۸۹	۲.۰۰۱	۲.۰۰۵	۲.۰۰۲	۱.۹۹۳
Mg	۰.۰۶۳	۰.۰۲۵	۰.۰۷۰	۰.۰۶۷	۰.۰۱۴	۰.۰۱۵	۰.۰۱۱	۰.۰۱۶	۰.۰۱۱	۰.۰۰۹	۰.۰۰۹	۰.۰۱۰
Fe ₂	۰.۹۱۲	۰.۸۴۷	۰.۹۰۹	۰.۹۰۸	۰.۹۵۶	۰.۹۴۹	۰.۹۵۳	۰.۹۵۴	۱.۹۳۰	۱.۹۳۳	۱.۹۲۳	۱.۹۳۶
Fe ₃	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۳	۰.۰۰۰	۰.۰۲۳	۰.۰۳۱	۰.۰۲۸	۰.۰۲۲	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
Mn	۰.۰۱۵	۰.۰۱۲	۰.۰۱۵	۰.۰۱۶	۰.۰۱۸	۰.۰۱۸	۰.۰۱۹	۰.۰۱۹	۰.۰۴۳	۰.۰۴۴	۰.۰۴۴	۰.۰۵۶
Ca	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۵
Na	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۰	-	-	-	-
K	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	-	-	-	-
Ni	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	-	-	-	-
تعداد اکسیژن	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
Xhem	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۰	۰.۰۱۲	۰.۰۱۶	۰.۰۱۴	۰.۰۱۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
XGk	۰.۰۶۳	۰.۰۲۵	۰.۰۷۰	۰.۰۶۷	۰.۰۱۴	۰.۰۱۵	۰.۰۱۱	۰.۰۱۶	۰.۰۰۵	۰.۰۰۴	۰.۰۰۵	۰.۰۰۵
Xpy	۰.۰۱۵	۰.۰۱۲	۰.۰۱۵	۰.۰۱۶	۰.۰۱۸	۰.۰۱۸	۰.۰۱۹	۰.۰۱۹	۰.۰۱۱	۰.۰۱۱	۰.۰۱۲	۰.۰۲۶
Xilm	۰.۹۲۲	۰.۹۶۳	۰.۹۱۴	۰.۹۱۷	۰.۹۵۷	۰.۹۵۲	۰.۹۵۶	۰.۹۵۴	۰.۹۷۴	۰.۹۷۵	۰.۹۷۳	۰.۹۶۹

جدول ۵ نتایج آنالیز میکروپروپ کانی‌های مگنتیت نمونه‌های انتخابی.

ریزکابرو	خالص Fe-Ti اکسید						فرامافیک						سنگ
241.2a10	210.13.3	210.20.3	210.27.3	210.29.3	210.31.3	210.41.3	10.5.1211	15.4.1211	2.1.3211	9.12	11.12	25.12	نمونه
E:469705.08m N:4204635.09m	E:469692.39m N:4203462.54m						E:469760.22m N:4203479.88m						مختصات
۱,۳۴	۰,۰۳	۰,۱۱	۰,۰۵	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۸	۰,۰۴	۰,۱۲	۰,۰۴	SiO ₂
۱,۰۵	۰,۲۱	۰,۱۶	۰,۴۷	۰,۱۵	۰,۳۲	۰,۱۴	۰,۷۳	۰,۶۷	۰,۷۲	۲,۳۶	۰,۸۷	۱,۳۶	TiO ₂
۱,۱۴	۰,۳۷	۰,۵۱	۰,۶۱	۰,۴۰	۰,۳۵	۰,۴۷	۰,۷۳	۰,۷۹	۰,۴۵	۰,۹۷	۱,۳۶	۰,۷۱	Al ₂ O ₃
۱,۹۵	۰,۰۶	۰,۰۸	۰,۰۱	۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۱۰	۰,۱۱	۰,۰۱	۰,۰۷	۰,۱۲	۰,۰۹	Cr ₂ O ₃
۶۰,۸۹	۶۷,۹۰	۶۷,۵۳	۶۷,۰۲	۶۷,۹۵	۶۷,۸۳	۶۸,۰۴	۶۶,۸۸	۶۶,۸۰	۶۶,۶۸	۶۳,۳۰	۶۵,۰۹	۶۵,۸۱	Fe ₂ O ₃
۳۲,۸۳	۳۱,۱۸	۳۱,۰۲	۳۱,۴۹	۳۱,۰۳	۳۱,۲۸	۳۱,۲۲	۳۱,۶۳	۳۱,۶۲	۳۱,۶۰	۳۲,۸۶	۳۱,۴۷	۳۲,۴۲	FeO
۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۱۳	۰,۰۰	۰,۰۶	MnO
۰,۲۰	۰,۰۶	۰,۱۱	۰,۰۴	۰,۰۶	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۲۲	۰,۲۰	۰,۰۹	۰,۳۰	۰,۳۸	۰,۱۱	MgO
۰,۸۰	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۵	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۲	CaO
۱۰۰,۲۰	۹۹,۸۴	۹۹,۶۲	۹۹,۷۱	۹۹,۷۱	۹۹,۹۰	۹۹,۹۷	۱۰۰,۳۱	۱۰۰,۲۳	۹۹,۶۶	۱۰۰,۰۲	۹۹,۴۱	۱۰۰,۶۳	مجموع
۰,۴۱	۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۱	Si
۰,۲۴	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۱۱	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۰۳	۰,۱۷	۰,۱۵	۰,۱۷	۰,۵۴	۰,۲۰	۰,۳۱	Ti
۰,۴۰	۰,۱۳	۰,۱۸	۰,۲۲	۰,۱۵	۰,۱۳	۰,۱۷	۰,۲۶	۰,۲۹	۰,۱۶	۰,۳۵	۰,۴۹	۰,۲۶	Al
۰,۴۷	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۲	Cr
۱۳,۸۴	۱۵,۷۳	۱۵,۶۶	۱۵,۵۲	۱۵,۷۶	۱۵,۷۱	۱۵,۷۴	۱۵,۳۶	۱۵,۴۵	۱۴,۵۳	۱۵,۰۰	۱۵,۰۸	۱۵,۰۸	Fe(iii)
۸,۲۹	۸,۰۳	۷,۹۹	۸,۱۱	۸,۰۰	۸,۰۵	۸,۰۳	۸,۰۷	۸,۰۸	۸,۱۴	۸,۳۸	۸,۰۶	۸,۲۵	0Fe(ii)
۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۲	Mn
۰,۰۹	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۱۰	۰,۰۹	۰,۰۴	۰,۱۴	۰,۱۷	۰,۰۵	Mg
۰,۲۶	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	Ca
۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	۲۴,۰۰	مجموع
۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	تعداد اکسیژن
۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۰,۹۹	۰,۹۹	۱,۰۰	Fe/Fe+Mg
۰,۵۳	۰,۱۰	۰,۰۹	۰,۰۱	۰,۰۸	۰,۰۵	۰,۰۲	۰,۰۸	۰,۰۸	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۶	۰,۰۸	Cr/Cr+Al
۸,۲۹	۸,۰۳	۷,۹۹	۸,۱۱	۸,۰۰	۸,۰۵	۸,۰۳	۸,۰۷	۸,۰۸	۸,۱۴	۸,۳۸	۸,۰۶	۸,۲۵	Fe(ii)
۱۳,۸۴	۱۵,۷۳	۱۵,۶۶	۱۵,۵۲	۱۵,۷۶	۱۵,۷۱	۱۵,۷۴	۱۵,۳۶	۱۵,۴۵	۱۴,۵۳	۱۵,۰۰	۱۵,۰۸	۱۵,۰۸	Fe(iii)
۰,۳۸	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۵	۰,۳۷	۰,۳۵	۰,۳۵	Fe ²⁺ (Fe ²⁺ +Fe ³⁺)
۰,۶۳	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۵	۰,۶۳	۰,۶۵	۰,۶۵	Fe ³⁺ (Fe ³⁺ +Fe ²⁺)

نتایج و بحث

سنگ‌نگاری

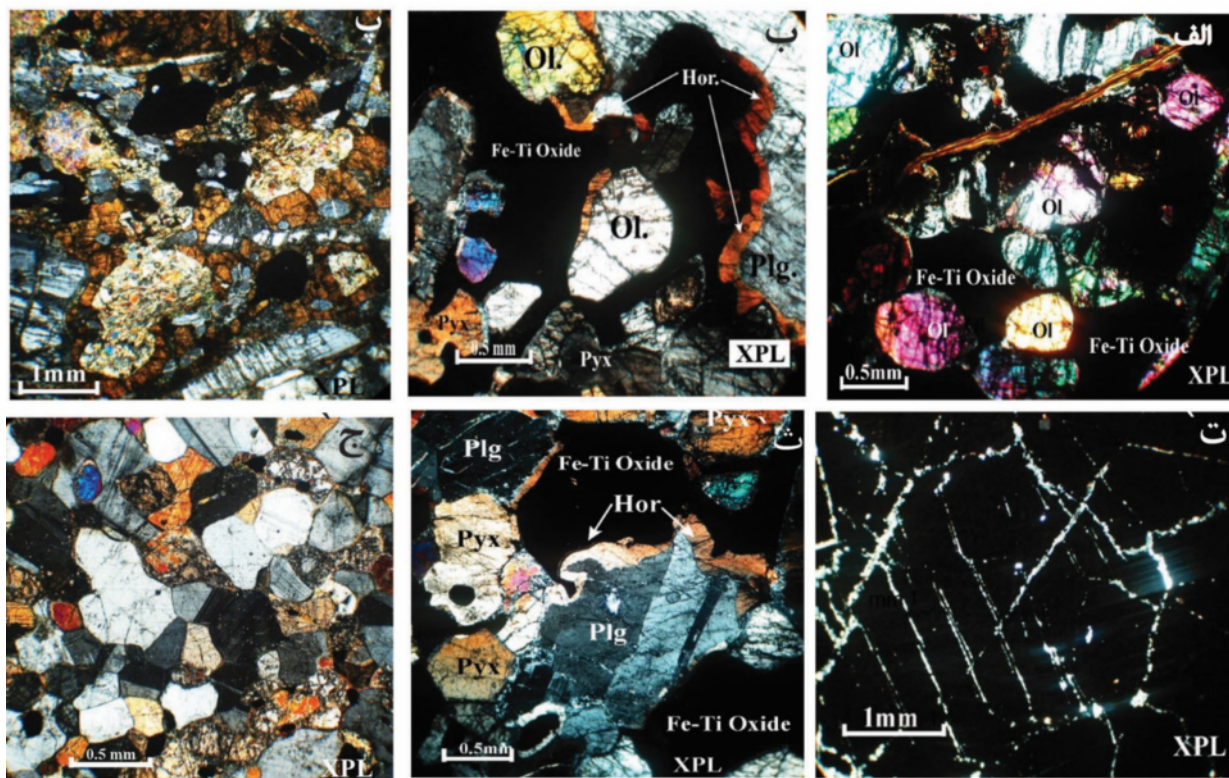
گابروهای غیر لایه‌ای بیشتر دانه‌ریز تا متوسط بوده، بافت غالب آنها دانه‌ای نیمه خود ریخت است. پلاژیوکلاز، کلینوپروکسن (با ترکیب دیوپسید و اورتیت) و ارتوپروکسن همراه با مقداری آمفیبول بیشترین حجم کانی‌ها را تشکیل می‌دهند. زیرکن، آپاتیت و کانی کدر بعنوان کانی فرعی در این سنگ‌ها حضور دارند. پلاژیوکلاز بعنوان متداول‌ترین کانی با دانه‌های تقریباً هم اندازه مسطح نیمه شکل‌دار و گاهی شکل‌دار دیده می‌شود. پلاژیوکلازها بدون منطقه‌بندی نوسانی و بیشتر دارای ماکل آلبیتی هستند و در مقاطع مختلف ترکیب آندزین تا

لابرادوریت دارند و در برخی نمونه‌ها، تا حد زیادی سوسوریتی و کلریتی شده‌اند. پیروکسن‌ها بصورت دانه‌های چند وجهی نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار هم اندازه با پلاژیوکلازها دیده می‌شوند که به مقدار زیادی به ترمولیت-آکتینولیت تبدیل شده‌اند. اکسیدهای آهن بیشتر از نوع ایلمنیت و کمی مگنتیت به صورت کانی فرعی و بی‌شکل بین کانی‌های سیلیکاتی قرار گرفته‌اند و مقدار آنها کمتر از ۱٪ است. در بخش غیر لایه‌ای، مناطق غنی از آپاتیت وجود دارد (۵ تا ۸ درصد مودال) که کانه‌زایی در آنها بیشتر از بخش مافیک بدون آپاتیت است. این آپاتیت‌ها به شکل دانه‌های منشوری طویل شکل‌دار تا بی‌شکل با طول ۱۰۰ تا ۳۵۰ میکرومتر هستند (شکل ۳). در بخش

پلاژیوکلاز تا حدی سوسوریتی شده‌اند، در این قسمت‌ها ترکیب پلاژیوکلازها به طرف آل بیت تغییر یافته است. کانی‌های فرعی اسفن و کانی‌های ثانویه شامل آمفیبول، زوئیزیت، کلریت و اپیدوت است. در این سنگ‌ها اندکی کانی اکسید Fe-Ti وجود دارد که بصورت بلورهای بی‌شکل و با ابعاد تا چند سانتی‌متر در بین دانه‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن قرار گرفته‌اند (شکل ۲). در مقاطع نازک دایک‌های دلریتی بافت پوست ماری را که مشخصه این دایک‌هاست بخوبی نشان می‌دهند. در این دایک‌ها علاوه بر پلاژیوکلاز و پیروکسن، کانی‌های ثانویه ترمولیت، آکتینولیت، کلریت، کلسیت، زوئیزیت و اکسیدهای آهن نیز دیده می‌شود.

بخش فرامافیک شامل وولیت، پیروکسنیت و به مقدار کمی دونیت است که اغلب دانه‌متوسط تا دانه‌ریز هستند و بیشتر بافت انباشتی دارند که در آن کانی‌هایی مثل پیروکسن، اولیوین و پلاژیوکلاز توسط اکسیدهای Fe-Ti بین بلوری احاطه شده‌اند (شکل ۳). در یک مقیاس کوچک و حتی در یک مقطع نازک، تبدیل این نمونه‌ها به یکدیگر بخوبی دیده می‌شود.

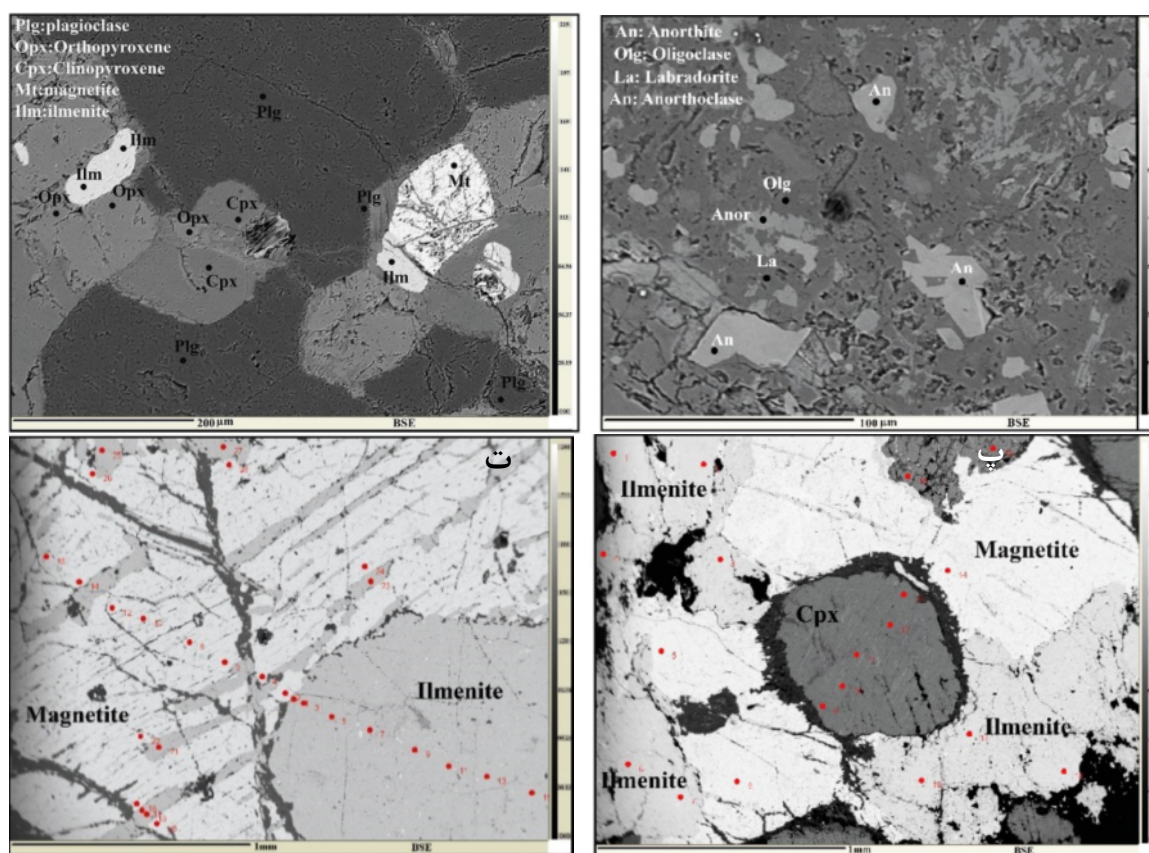
گابروهای لایه‌ای، بر اساس مقدار کانی‌ها در سنگ‌های مافیک تنوعی از سنگ‌های ملاگابرو تا آنورتوزیت دیده می‌شود. این بخش دارای ترکیب کانی‌شناسی ساده‌ای شامل پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن (دیوپسید و اوژیت) و کمی ارتوپیروکسن بوده و اندازه دانه‌ها متوسط تا درشت است. پلاژیوکلازها فاقد منطقه-بندی نوسانی هستند و ماکل آل‌بیتی دارند و معمولاً به شکل قطعات نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل در اندازه‌های ۱ تا ۳ میلی-متری دیده می‌شود. کلینوپیروکسن‌ها بیشتر اورالیتی شده‌اند. در برخی نمونه‌ها سوزن‌های ریزی از ایلمنیت در سطوح تورق پیروکسن‌ها وجود دارد که دارای نظم خاصی هستند. لبه واکنشی دربردارنده هورنبلند بصورت بافت تاج خروسی در محل تماس اکسیدهای آهن و تیتان با پلاژیوکلاز و پیروکسن در برخی نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۳). پگماتیت گابروها دارای بلورهای درشت پیروکسن، آمفیبول و پلاژیوکلاز هستند. اندازه این بلورها گاهی به چندین سانتی‌متر می‌رسد (شکل ۲). در این سنگ‌ها، پیروکسن‌ها بیشتر به آمفیبول (ترمولیت و آکتینولیت) تبدیل شده‌اند. گاهی شدت تبدیل‌شدگی بحدی است که اثری از کانی اولیه باقی نمانده است. بلورهای



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از سنگ‌های GKMUC (الف) دونیت کانه‌زایی شده، (ب) نمونه وولیت کانه‌زایی شده همراه با لبه واکنشی از هورنبلند، (پ) نمونه‌های مافیک آپاتیت‌دار کانه‌زایی شده، (ت) نمونه انباشت خالص اکسید Fe-Ti، (ج) نمونه پیروکسنیت پلاژیوکلازدار کانه زایی شده، و (چ) گابروهای غیرلایه‌ای با کانی‌های تقریباً هم‌بعد. Pyx: پیروکسن، Plg: پلاژیوکلاز، Hor: هورنبلند، Ol: اولیوین.

مقداری سرپانتینی شده‌اند. در برخی قسمت‌ها مقدار اولیوین به حدی می‌رسد که می‌توان آنرا یک دونیت نامید. جهت یافتگی ترجیحی بصورت لایه‌بندی ماگمایی یا کانیایی به مقدار خیلی کم در قسمت‌های دونیتی دیده می‌شود. اولیوین‌ها گاهی شامل قطره‌های اکسید Fe-Ti به شکل میانبار هستند (شکل ۳). در مجاورت بخش فرامافیک، قسمت‌های خالص و غنی از اکسید Fe-Ti بصورت سیل و یا رگه وجود دارد که تقریباً فقط از تیتانومگنتیت و ایلمنیت تشکیل شده‌اند. ایلمنیت و تیتانومگنتیت در بخش فرامافیک معمولاً به سه شکل مختلف که در واقع سه نسل متفاوت را بازگو می‌کنند، دیده می‌شوند: نسل اول بصورت میانبارهای کوچک تقریباً کروی شکل در کانی‌های سلیکاته، نسل دوم بصورت فاز بین کومه‌ای در بین فازهای کانیایی سلیکاته و نسل سوم بصورت رگه‌های کوچک (شکل ۳). درصد اکسیدهای نوع اول و سوم در توده غازان کمتر است. در تصاویر الکترونی پس پراکنده (BSE) گرفته شده از کانه‌های اکسید Fe-Ti، معمولاً در ایلمنیت برون رست اکسید Fe-Ti بصورت تیغه‌ای و یا عدسی وجود دارد (شکل ۴).

فرامافیک‌های GKMUC از نوع بدون آپاتیت هستند. هورنبلند قهوه‌ای فراوانترین کانی فرعی است. در بیشتر نمونه‌ها، این کانی بصورت یک لبه واکنشی در اطراف کانی‌های سلیکاته و اکسیدهای Fe-Ti دیده می‌شود. مقداری بیوتیت و اسپینل هرسنیتی نیز بعنوان کانی فرعی وجود دارد. رنگ اسپینل‌ها در زیر میکروسکوپ سبز است. پیروکسنیت‌ها دارای بلورهای کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن، آمفیبول و مقدار فراوانی کانی‌های تیتانومگنتیت هستند. مقدار کمی پلاژیوکلاز نیز در این سنگ‌ها وجود دارد. پیروکسن‌ها معمولاً نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل بوده و اندازه آنها بین ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر متغیر است. میانبارهایی از اکسیدهای Fe-Ti هم بصورت قطره مانند و هم بصورت سوزنی شکل به موازات سطوح تورق منشوری در کانی‌های سلیکاته دیده می‌شود. پلاژیوکلازها معمولاً به شکل قطعات نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل در اندازه‌های ۱ تا ۳ میلی‌متری هستند. در نمونه‌های ورلیتی و دونیتی، بلور اولیوین سالم کم هستند و بیشتر تبدیل به ایدنگزیت شده‌اند. در ورلیت‌ها اولیوین بصورت کانی‌های شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار کوچک و معمولاً بصورت بلورهای هم بعد دیده می‌شود که



شکل ۴ تصاویر BSE در الف) پگماتیت آنورتوزیت، ب) گابروی ریز دانه، پ) فرامافیک و ت) کانه خالص.

درصد اکسیدهای Fe-Ti در فرامافیک‌ها ۲۵-۳۰ مقدار است در حالیکه در بخش تقریباً خالص درصد آن تا بیش از ۹۰ درصد نیز می‌رسد. نسبت ایلمنیت به مگنتیت در سنگ‌های فرامافیک کانه‌زایی شده منطقه حدود ۴ به ۲ و در نمونه‌های خالص کانه‌زایی شده این نسبت حدود ۵ به ۲ است. با توجه به جدول‌های ۴ و ۵، درصد حجمی ایلمنیت در سنگ‌های فرامافیک غنی از کانه، ۱۱-۱۹، در سنگ‌های مافیک ۵-۰/۵ و در نمونه‌های خالص کانه‌زایی شده نزدیک به ۶۰ است. کانی‌های ایلمنیت، بیشتر به شکل بلورهای نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل بیشینه ابعاد ۲ تا ۴ میلی‌متر در بین کانی‌های سلیکاته دیگر قرار گرفته‌اند. در فرامافیک‌های کانه‌زایی شده، ایلمنیت بصورت دانه‌های مجزا در کنار تیتانومگنتیت‌ها وجود دارند. همچنین مگنتیت‌های رگچه‌ای تاخیری در آنها بیشتر از نمونه‌های خالص اکسیدهای Fe-Ti است. تیغه‌های ایلمنیت، ترکیبی تقریباً مشابه با بلورهای ایلمنیت مجزا دارند. در نمونه‌های خالص کانه‌زایی شده، ایلمنیت علاوه بر بافت دانه‌ای بصورت تیغه‌های نازکی در تیتانومگنتیت نیز قرار گرفته‌اند (شکل ۴).

شیمی کانی‌ها

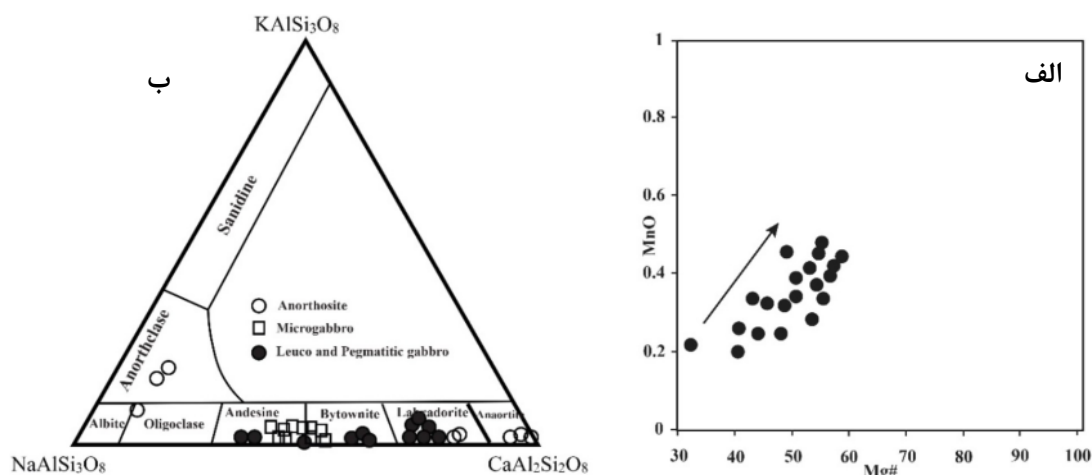
اولیون: نتایج تجزیه ریزپردازشی اولیون نقاط انتخابی از دو نمونه ورلیتی و دونیتی در جدول ۱ آورده شده است. درصد فورستريت اولیون در ورلیت‌ها از Fo₄₀ تا Fo₅₀ متغیر است. در مواردی که بلورهای اولیون در نزدیکی اکسیدهای Fe-Ti قرار دارند، مقدار فورستريت در لبه بلور بیشتر از مرکز آن است، بطوریکه اختلافی حدود ۲ تا ۳ درصدی بین درصد فورستريت لبه و مرکز بلورها دیده می‌شود. این نسبت در اولیون‌هایی که توسط اکسیدهای Fe-Ti احاطه شده‌اند بیشتر است. در حالیکه چنین اختلافی در بلورهای اولیونی که در نزدیکی کانی‌های سلیکاته مثل پیروکسن قرار دارند یا دیده نمی‌شود یا بسیار کم است. علت آن شاید تعادل دوباره در حالت زیر خط انجماد باشد و نشان‌دهنده ترکیب اولیه بلور اولیون است. مقدار MnO در اولیون‌ها از ۰/۳۳ تا ۰/۴۷ متغیر است و با Mg[#] (با گستره ۵۰ تا ۵۷ درصد) رابطه مستقیم دارد (شکل ۵ الف). نتایج تجزیه ریزپردازشی نشان می‌دهد که تغییرات ترکیبی تا حدی اصولی در درصدهای Fo و Fa بلورهای اولیون وجود دارد. البته تغییرات ترکیبی بلورهای اولیون بیش از آنکه به معنای منطقه‌بندی ترکیبی به معنای واقعی و اولیه باشد، مربوط به تبادلات کاتیونی در حالت تعادل دوباره طی فرآیند

سرد شدگی ماگما در مرحله زیر خط انجماد و یا فرایندهای آرایش و دگرسانی بعدی است، بطوریکه تبادل کاتیونی منیزیم از طرف مرکز به سمت لبه بلورهای اولیون بیشتر صورت می‌گیرد [۱۶-۱۹]. در بلورهای اولیون درصد فورستريت بیشتر از فیالیت است.

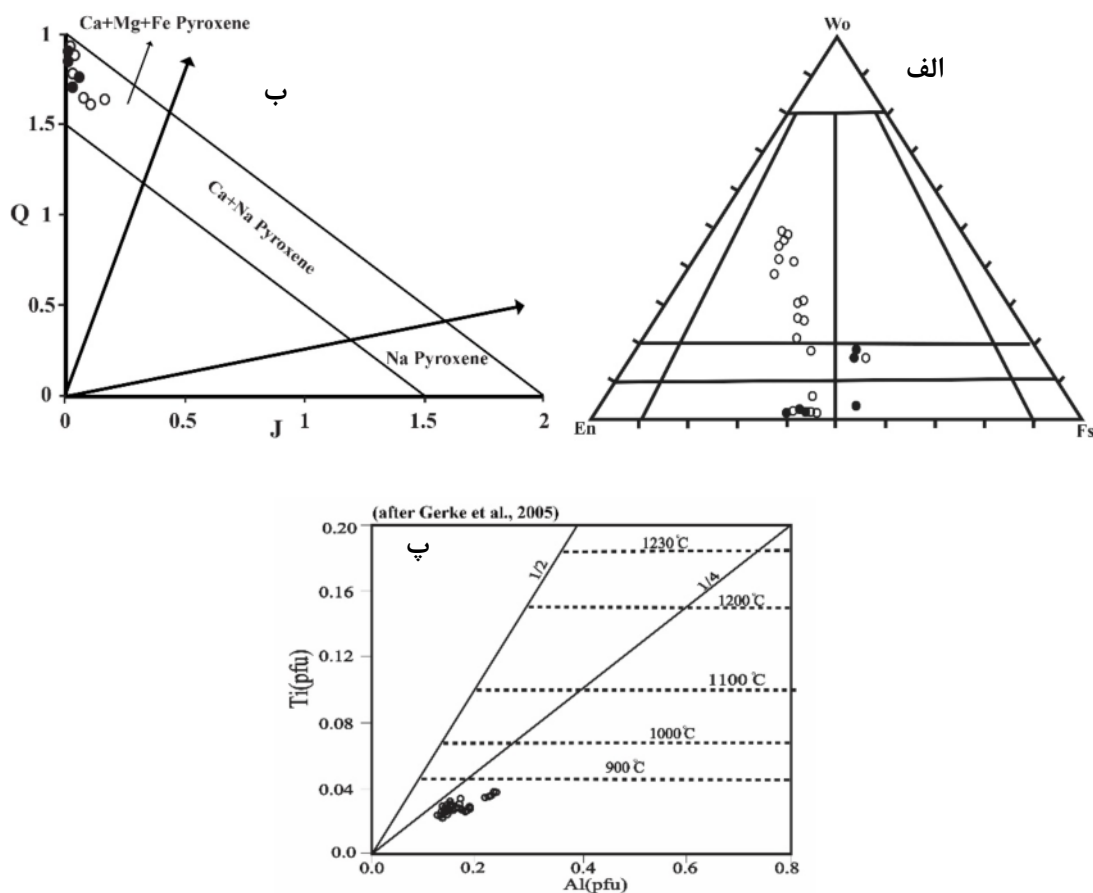
پلاژیوکلاز: در آنورتوزیت‌ها GKMUC، فلدسپات‌ها از نوع آنورتوکلاز، لابرادوریت و آنورتیت هستند. گستره ترکیبی پلاژیوکلازها در ریزگابروها از آندزین تا بیتونیت و در لوکوگابروها از آندزین تا لابرادوریت است (جدول ۲ و شکل ۵ ب). در شکل ۴ الف، تصویر BSE یک نمونه پگماتیت آنورتوزیتی دیده می‌شود که نشان می‌دهد که ظاهراً کل فلدسپات نخست از نوع آنورتوزیت بوده و در اثر دگرگونی‌های شیمیایی و ورود Na اضافی به ساختار این کانی، (دگرنهادی سدیمی) ترکیب آنها به سمت آل بیت، اولیوکلاز و آنورتوکلاز تغییر ماهیت داده است، زیرا بخش‌هایی از آنورتوزیت اولیه بصورت لکه‌های باقی‌مانده در بلورهای تبدیل یافته دیده می‌شود. در لوکوگابروها، بخش‌های آنورتوزیتی دگرنهاد شده دارای ترکیب آندزین-بیتونیت هستند، در حالیکه قسمت‌های کمتر تغییر یافته ترکیب لابرادوریت دارند. این قسمت‌های با درصد آنورتیت بالا در واقع پلاژیوکلازهای با ترکیب اولیه هستند که بصورت لکه‌هایی در بخش‌های تغییر یافته پلاژیوکلاز باقی مانده‌اند. بررسی داده‌های تجزیه نقطه‌ای نشان می‌دهد که پلاژیوکلاز در همه سنگ‌های مورد بررسی، تقریباً فاقد منطقه‌بندی ترکیبی است و یا تغییرات بسیار ناچیزی دارد. **پیروکسن:** گستره ترکیبی پیروکسن‌ها گسترده بوده و شامل اوژیت، دیوپسید، کلینوانستاتیت و پیژونیت است (شکل ۶ الف). باتوجه به جدول ۳، ترکیب کانی‌های کلینوپيروكسن در انواع سنگ‌های GKMUC در گستره ترکیبی Wo₂₈₋₄₅En₃₄-Wo₁₅₋₂₄Fs₁₅₋₄₈ تا Wo₄₅₋₄₈En₃₆₋₄₀Fs₁₅₋₁₇ یعنی در گستره اوژیت تا دیوپسید قرار می‌گیرند. گستره ترکیبی ارتوپيروكسن‌ها از Wo_{0.1-2}En₅₇₋₈₇Fs₁₃₋₄₀ تا Wo₇₋₁₅En₇₀₋₇₈Fs₁₄₋₁₆ یعنی در گستره ترکیبی کلینوانستاتیت تا پیژونیت قرار دارند. بررسی‌های انجام شده شواهد آشکاری از منطقه‌بندی ترکیبی قابل توجه در پیروکسن‌ها نشان ندادند. برخی از کلینوپيروكسن‌ها مقدار En بیشتری دارند که نشان دهنده برون رست و تبدیل به ارتوپيروكسن است. معمولاً اوژیت‌ها یا بصورت برون رست در دیوپسیدها و یا بصورت لبه واکنشی بین

Al (شکل ۶ پ)، از نظر مقدار Ti، اختلاف اندکی بین نمونه-های مافیک و فرامافیک وجود دارد و تغییر Ti در آنها تدریجی است که به ترتیب تبلور کانی‌ها در ماگما بستگی دارد.

دیوپسیدها و اولیوین‌ها قرار گرفته‌اند. در شکل ۶ ب، همه نمونه‌های GKMUC در گستره پیروکسن‌های Fe-Mg-Ca قرار دارند و مجموع کاتیون‌های $\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}$ آنها حدود ۲ بوده و از Na (پارامتر J) فقیر هستند. در نمودار Ti نسبت به



شکل ۵ الف) تغییرات $\text{Mg}^\#$ (عدد منیزیم) کانی‌های اولیوین نسبت به MnO پیکان روند جدایش بلوری را نشان می‌دهد، و ب) تغییرات ترکیبی فلدسپارها در نمودار Ab-An-Or.

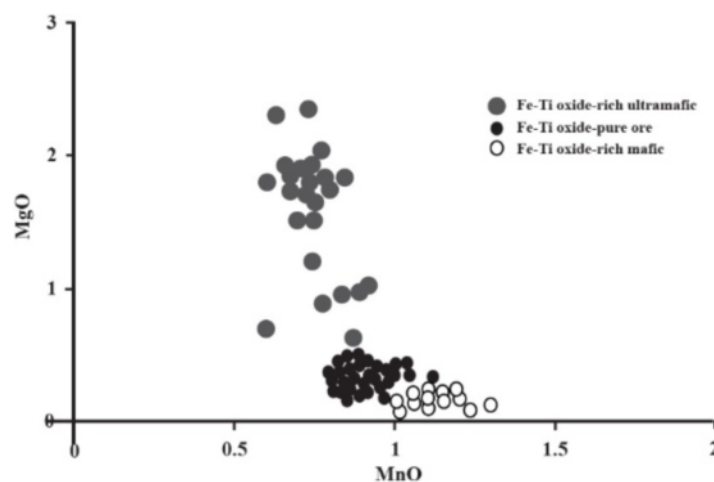


شکل ۶ تغییرات ترکیبی پیروکسن‌ها در سنگ‌های مافیک (دایره‌های توپر) و فرامافیک (دایره‌های توخالی) بر الف) نمودار مثلثی Wo-En-Fs، ب) نمودار Q-J [۲۰] و پ) نمودار تغییرات Al نسبت به Ti [۲۲، ۲۱].

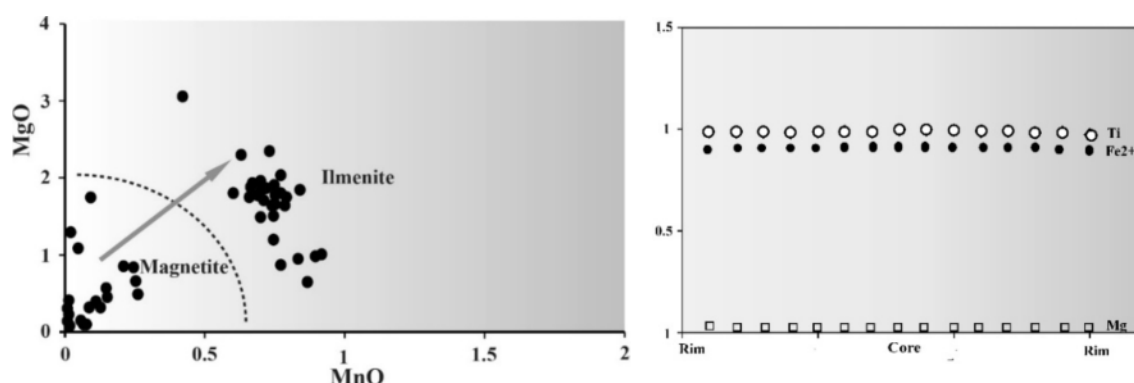
اکسیدهای آهن و تیتان

ایلمنیت: برای بررسی و تعیین ترکیب شیمیایی ایلمنیت، حدود ۵۰ تجزیه نقطه‌ای از نقاط مختلف لبه و مرکز بلورهای ایلمنیت و تعداد ۱ نیمرخ خطی لبه-لبه با ۱۰ نقطه انجام شد. بر اساس نتایج (جدول ۴)، ایلمنیت در سنگ‌های مافیکی ترکیب خالص و عضو انتهایی ($X_{ilm} \sim 0.99\%-1.00\%$) را دارد. در کانه‌های خالص اکسیدی این ترکیب حدود $X_{ilm} \sim 0.92\%-0.95\%$ و در فرامافیک‌های کانه‌زایی شده $X_{ilm} \sim 0.90\%-0.91\%$ است. مقدار MgO ایلمنیت در فرامافیک‌های کانه‌سازی شده کمتر ($0.19\%-2.44\%$) و MnO بیشتر ($1.12\%-0.19\%$) از کانه‌های خالص اکسیدی ($MgO_{0.19}$) (۲.۴۴٪) و بیشتر از مافیکی‌هاست. مقداری هماتیت به صورت برون رست در ایلمنیت وجود دارد، بطوریکه مقدار آن در فرامافیک‌های کانه‌زایی شده $X_{hem} \sim 0.00\%-0.97\%$ در کانه‌های خالص اکسیدی حدود $0.00\%-0.089\%$ و در گابروهای غیر لایه‌ای ریز دانه تقریباً ۰.۰۰٪ است. در سنگ‌های فرامافیک کانه‌زایی شده توده GKMUC مقدار TiO_2 بین ۴۶ تا ۵۷/۵ و FeO بین ۴۱ تا ۴۷ درصد است. باتوجه به شکل ۷، هر چه خلوص ایلمنیت بیشتر می‌شود مقدار MgO کمتر و مقدار MnO بیشتر می‌گردد. مقدار MgO در ایلمنیت می‌تواند معیاری برای درجه جدایش سنگ‌های آذرین با خاستگاه یکسان در یک مجموعه باشد، زیرا مقدار MgO تابع دما و مقدار MgO ماگمای مادر بازالتی است که از آن متبلور شده است [۲۳]. مقدار MgO در نمونه‌های اکسید Fe-Ti تقریباً خالص ($0.19\%-0.48\%$) که باید آنها را بعنوان باقی‌مانده ماگمای مادر بازالتی فرض کرد، کمی بیشتر از MgO

نمونه‌های اکسید Fe-Ti مافیکی‌ها ($0.102\%-0.138\%$) است و هر دو کمتر از نمونه‌های فرامافیک کانه‌زایی شده ($\sim 0.87\%-2.5\%$) هستند (شکل ۷). اینکه مقدار MgO در فرامافیک کانه‌زایی شده بیشتر از نمونه‌های مافیکی و اکسیدهای Fe-Ti خالص است نیاز به بررسی بسیار دارد و احتمالاً خاستگاه جداگانه آنها را نشان می‌دهد. مقدار CaO ایلمنیت‌ها معمولاً کمتر از ۰.۱٪ و مقدار SiO_2 نیز کمتر از ۰.۳٪ است. چنین بنظر می‌رسد که روند کلی این تغییرات توسط فرآیندهایی مثل تبلور بخشی و جدایش در فرامافیکی‌ها کنترل می‌شود. توزیع و تعادل دوباره Fe و Ti بین اکسیدهای Fe-Ti ضمن سرد شدن و توزیع دوباره Fe و Mg (بین ایلمنیت و اولیوین) در مرحله پس از ماگمایی، ترکیب اولیوین و کلینوپیروکسن را متأثر می‌سازد، بطوریکه از Mg ایلمنیت و مگنتیت همزیست با این کانی‌ها کاسته می‌شود [۲۴]. نیمرخ خطی (شکل ۸ الف) بصورت لبه - مرکز - لبه بلورهای ایلمنیت نشان می‌دهد که تغییرات ترکیبی بسیار محدود است که دلالت بر تاثیر و عملکرد فرآیندهای زیر خط انجماد و باز تعادل ترکیبی در ایلمنیت‌ها دارد [۶]. نتایج تجزیه نقطه‌ای بیانگر وجود رشد داخلی ماگمایی بین مگنتیت و تیتانومگنتیت در برخی نمونه‌هاست، بطوریکه در یک دانه مگنتیت قسمت‌هایی با درصد بالای Ti وجود دارد. در اثر اکسایش، مگنتیت به ویژه در لبه‌ها که در مجاورت ایلمنیت قرار دارند به دو فاز با Ti بالا و Ti پائین تفکیک می‌شود. برخی پژوهشگران [۲۵، ۲۴] معتقدند که رشد همزمان تیتانومگنتیت و مگنتیت ممکن است بیان‌کننده شرایط حاکم در اتاق ماگمایی باشد.



شکل ۷ نمودار تغییرات MnO نسبت به MgO در ایلمنیت‌های GKMUC.

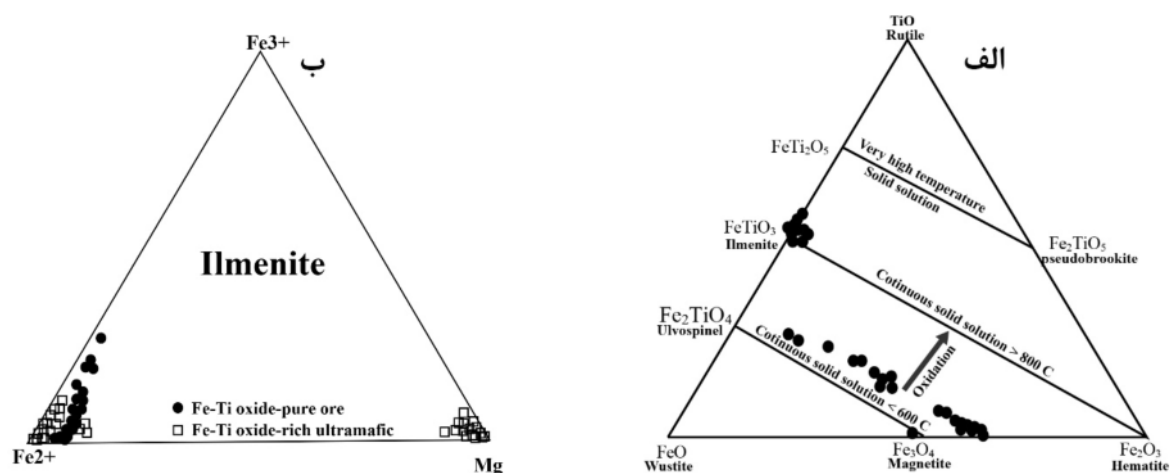


شکل ۸ الف) نمودار نیمرخ در کانی ایلمنیت از لبه تا لبه و ب) نمودار تغییرات MnO نسبت به MgO در ایلمنیت و مگنتیت.

مجزا و هم بصورت تیغه‌ای داخل بلورهای مگنتیت تبلور یافته- اند (شکل ۴). مقدار Al_2O_3 در تیتانومگنتیت‌های منطقه متغیر ولی بیش از نمونه‌های ایلمنیت است که می‌توان آنرا به تفکیک شدن اسپینل هرسنیتی موجود در آنها ربط داد. در فرامافیک کانه‌زایی شده اسپینل هرسنیتی یک کانی فرعی است. چنانکه در شکل ۸ ب دیده می‌شود، نمونه‌هایی که در گستره ایلمنیت رسم شده‌اند دارای مقادیر بیشتری از MnO نسبت به نمونه‌های مگنتیت هستند و گستره تغییرات MgO در آنها بیش از مگنتیت‌هاست. هر چه مقدار ایلمنیت (و در پی آن، مقادیر MgO و MnO) بیشتر باشد، جدایش ماگمای حامل در جهت پیکان بیشتر است. در فرامافیک‌های کانه‌زایی شده مقدار کمی اسپینل (کمتر از ۱٪) وجود دارد. این کانی معمولاً بصورت میانبار و یا بین بلوری بوده و بیشتر با مگنتیت همزیست است. نتایج تجزیه نقطه‌ای نشان می‌دهد که گستره تغییرات اسپینل بین ۳۷/۴ تا ۴۹/۹ و هرسنیت بین ۴۹/۷ تا ۶۲/۲ درصد است.

شکل ۹ الف تعادل اکسیدهای $TiO_2-Fe^{2+}-Fe^{3+}$ در شرایط متفاوت دمایی را نشان می‌دهد. چنانکه دیده می‌شود ترکیب متوسط ایلمنیت‌ها تقریباً شامل مقادیر مساوی از TiO_2 و FeO است و همه انواع نمونه‌های ایلمنیت (دانه‌های ایلمنیت و تیغه‌های برون رست داخل مگنتیت) بر روی و نزدیک خط ایلمنیت فران در شرایط محلول جامد در دمای بیش از $800^\circ C$ قرار گرفته‌اند. نمونه‌های مگنتیت و تیتانومگنتیت در نمودار ۹ الف در گستره بین دو سری مگنتیت-الواسپینل و ایلمنیت-هماتیت قرار دارند که نشان از محلول جامد بین این دو است. همچنین، مگنتیت‌ها روی خط اتصال $FeO-Fe_2O_3$ و نزدیک به جایگاه مگنتیت (Fe_3O_4) دیده می‌شوند، در حالیکه نمونه‌های تیتانومگنتیت به دلیل داشتن مقداری Ti در شبکه، به موازات و بالای خط محلول جامد بیش از $600^\circ C$ قرار دارند.

مگنتیت: در GKMUC، کانی مگنتیت را می‌توان هم در سنگ‌های مافیک (در مقادیر کم) و هم در سنگ‌های فرامافیک مشاهده کرد. مقدار آن در نمونه‌های کاملاً خالص اکسید $Fe-Ti$ ، ۳۰-۴۵٪ است و در سنگ‌های فرامافیک کانه‌زایی شده ۴ تا ۱۵ درصد حجم کل را تشکیل می‌دهد. برای تعیین ترکیب شیمیایی بلورهای مگنتیت و تیتانومگنتیت حدود ۵۰ تجزیه نقطه‌ای از لبه‌ها و مراکز انجام شد (جدول ۵). بر اساس نتایج تجزیه ریزپردازشی، تیتانومگنتیت و مگنتیت‌های موجود در نمونه‌های اکسیدهای $Fe-Ti$ خالص بیشتر از نوع نسل اول و دوم بوده و دارای Xusp پائین (۰/۰۴ تا ۰/۰۲ درصد) و Xmag بالایی (۰/۹۷ تا ۰/۹۹ درصد) هستند. در صورتیکه مقدار تیتانومگنتیت‌های نسل اول و دوم در فرامافیک‌های کانه‌زایی شده ۰/۷۹-۰/۹۳ درصد است. مقادیر Xmag در مگنتیت و تیتانومگنتیت‌های تاخیری پائین (۰/۵۰-۰/۱۴۳ درصد) است. این بدین معنی است که بلورهای اولیه غنی از Ti در نتیجه فرآیندهای باعث ایجاد تیغه‌های ایلمنیتی در بلورهای مگنتیت دربردارنده آنها شده‌اند. بلورهای مگنتیتی که به صورت رگچه‌ای در شکستگی کانی‌های دیگر و یا در فضای بین بلوری تشکیل شده‌اند، دارای خلوص بالایی هستند (Xmag حدود ۰/۹۹٪). این را می‌توان بدین صورت تعبیر کرد که Ti در مراحل پیشین و در دماهای بالاتر بصورت تیغه‌های ایلمنیتی خارج شده و مایع باقی مانده تقریباً خالی از Ti است. به ظاهر تغییرات اصولی آرمانی در ترکیب بلورهای مگنتیت سنگ‌های مختلف وجود ندارد. با این حال یک تغییر اصولی ضعیف در ترکیب بلورهای ایلمنیت، تیتانومگنتیت و مگنتیت در نمونه‌های تقریباً خالص اکسیدی $Fe-Ti$ تا فرامافیک‌های کانه‌زایی شده در GKMUC دیده می‌شود. در فرامافیک کانه‌زایی شده معمولاً ایلمنیت و مگنتیت بصورت تیغه‌های ریزی در پیروکسن‌ها و یا بصورت بلورهای مجزا حضور دارد (شکل ۴)، در حالیکه در نمونه‌های خالص ایلمنیت، هم بصورت بلورهای



شکل ۹ الف) نمودار سه تایی سیستم جامد TiO_2 -FeO- Fe_2O_3 که خطوط اتصال انحلال جامد بین کانی‌ها را نشان می‌دهد، ب) جایگاه اکسیدهای Fe-Ti در نمودار مثلثی Mg - Fe^{2+} - Fe^{3+} [۲۷، ۲۶].

از: ۱) پائین‌ترین قسمت شامل یک پهنه قاعده‌ای متشکل از گابروهای غیر لایه‌ای ریز دانه و بدون کانه‌زایی اکسید Fe-Ti. ۲) پهنه دوم شامل بخش فرامافیک کانه‌زایی شده است. در بخش پایینی آن مقدار کمی دونیت وجود دارد. به سمت بالا با افزایش مقدار پیروکسن، سنگ به ورلیت و سپس به پیروکسنیت تغییر می‌کند. بخش عمده کانسار اکسید Fe-Ti (۳۰-۲۵٪) در این سنگ‌ها وجود دارد. در این پهنه، بخش‌های سیل یا رگه‌مانندی از کانسارهای اکسید Fe-Ti خالص (بیش از ۹۰٪) دیده می‌شود. ۳) پهنه میانی شامل گابروهای لایه‌ای متشکل از نوارهای تیره غنی از اولیوین، پیروکسن و مگنتیت و نوارهای روشن غنی از پلاژیوکلاز است. نوارها معمولاً چند سانتی‌متر ضخامت دارند و چند بار تکرار شده‌اند. کانه‌زایی اکسیدهای Fe-Ti در این پهنه (۵-۱۰٪) به صورت نوارهای باریک فقط در بخش‌های غنی از آپاتیت صورت گرفته است. ۴) پهنه بالایی شامل لایه‌های آنورتوزیت و گابروهای درشت بلور یا پگماتیت گابروهاست که ۲-۰٪ اکسید Fe-Ti دارند. این گابروها احتمالاً طی گسترش پهنه‌های لایه‌ای اصلی و در سقف اتاق ماگمایی تبلور یافته‌اند.

که پیدایش توده‌های ناهمشیب (مانند دایک‌ها، رگه‌ها) و گاهی هم‌شیب (مانند سیل‌ها) متشکل از کانسارهای اکسید Fe-Ti خالص با فرضیه مایعات ناآمیخته قابل توضیح است. از طرف دیگر، وجود میانبراهای کروی از اکسید Fe-Ti در اولیوین و پیروکسن نشان دهنده قطرک‌های مایع به دام افتاده ناشی از ناآمیختگی مایعات طی رشد کانی‌های سیلیکاته انباشتی است [۲۹]. در حالیکه برخی دیگر از پژوهشگران [۶-۲۶] وجود این

لذا در حالت کلی می‌توان گفت که در دماهای بالا Ti به مقدار بیشتری در مگنتیت جای می‌گیرد. در دماهای پائین به دلیل پائین آمدن حل‌پذیری، مقدار Ti در مگنتیت پائین می‌آید، بنابراین Ti در شکستگی‌ها و نقایص بلوری رها شده و برون رست‌هایی مانند ایلمنیت را تشکیل می‌دهد [۲۷، ۲۶]. در شکل ۹ ب تغییر ترکیب نمونه‌های ایلمنیت، سنگ‌های خالص اکسید Fe-Ti و فرامافیک‌های کانه‌سازی شده بخوبی دیده می‌شود. باتوجه به این شکل، نمونه‌های ایلمنیت در فرامافیک‌های غنی از اکسیدهای Fe-Ti دو نوع هستند: نمونه‌های با MgO بالا و نمونه‌های با MgO پائین. مشخص است که طی تبلور ماده مذاب باقیمانده در دماهای بالا (بالتر از $800^\circ C$) ابتدا محلول جامد کاملی بین تیتانومگنتیت و ایلمنیت تشکیل شده که با کاهش دما و پیشرفت عمل جدایش در دماهای بالاتر از $600^\circ C$ ، فازهای ایلمنیت و مگنتیت به صورت تیغه‌های برون رست از یکدیگر تفکیک شده و همزمان از فاز تیتانومگنتیت جدا می‌شوند.

بر اساس توضیحات بالا می‌توان مجموعه GKMUC را از نظر ساختار درونی به ۴ منطقه یا سری تفکیک کرد که عبارتند از: در مورد خاستگاه اکسیدهای Fe-Ti مجموعه GKMUC دو نظریه را می‌توان مطرح کرد: ۱) غنی شدگی در مذاب‌های باقیمانده برآمده شده از ماگمای مادر فروبازالتی و ۲) تزریق یک سیال غنی از Fe-Ti ناآمیخته به داخل بخش مافیک-فرامافیک. شواهد متعددی وجود دارد که نشان می‌دهد که نظریه دوم، عامل اصلی تشکیل افق‌های غنی از اکسیدهای Fe-Ti خالص در منطقه است. برخی پژوهشگران [۶-۲۸] معتقدند

قطرک‌های اکسیدی را فقط نتیجه مایعات ناآمیخته طی دگرگونی این سنگ‌ها نمی‌دانند بلکه معتقدند که این قطرک‌های میانبار مانند نشان دهنده وجود سازنده‌های Fe و Ti در ماگمای اولیه این سنگ‌هاست. اکسیدهای Fe-Ti نسل سوم (حالت رگه‌ای) در GKMUC احتمالاً ناشی از ماهیت انعطاف پذیری و مهاجرت بوسیله خزش این کانی‌ها در حالت دگرشکلی جامد دمای بالا (ناکشان) است. در نتیجه این فرآیند در دماهای بالا این امکان بوجود می‌آید که اکسیدهای Fe-Ti بتوانند در پهنه‌های کم تنش تمرکز یابند و کانسارهای نوع رگه‌ای را در مقیاس‌های میکروسکوپی تا رگه‌های بزرگ تشکیل دهند [۱۵، ۳۰، ۳۱]. با وجود اینکه شواهد دگرشکلی ناکشان دما بالا در منطقه مورد بررسی و پیرامون آن زیاد است [۱۲-۱۷]، ولی در سنگ‌های کانه‌زایی شده به ویژه در فرامافیک‌ها و بخش‌های خالص کانه‌زایی شده شواهدی از دگرشکلی مانند جابجایی و خمیدگی در بلورها یا وجود ندارد و یا کم است. احتمال دارد که در این سنگ‌ها بیشتر کرنش به وسیله خمیره بین‌بلوری مستهلک شده باشد [۱۴، ۱۶، ۳۲]. از این رو فرض می‌شود که سیال غنی از Fe-Ti طی یک دگرشکلی ناکشان دما بالا به داخل میزبان مافیک-فرامافیک پیشتر تبلور یافته و یا نیمه متبلور نفوذ کرده است. بخشی از این سیال بصورت انباشت خالص سیل مانند از ایلمنیت و تیتانومگنتیت تبلور یافته و بخشی نیز داخل مافیک و فرامافیک‌های نام برده همراه کانی‌های سیلیکاته تبلور می‌یابد. وجود آپاتیت همراه با کانه‌زایی Fe-Ti در قسمتی از گابروها و عدم وجود آن در بیشتر بخش‌ها، همچنین بزرگی عدد منیزیم اولیوین‌ها و وجود اسپینل نوع هرسینیتی غنی از Mg را می‌توان ناشی از نفوذ تپ‌های ماگمایی متعدد با درجه‌های جدایش متفاوت به داخل مخزن ماگمایی در حال تبلور در دماهای بالا در نظر گرفت [۱۹]. به عبارتی، توده نفوذی GKMUC با پر شدن‌های متوالی چندین تپ ماگمایی همراه بوده است. ماهیت لایه‌ای و وجود لایه‌های مودال تناوبی در برخی قسمت‌ها به صورت بسیار جزئی گویای آن است. تغییرات ترکیبی بلورها، حتی در یک مقطع نازک بیانگر آن است که بیشتر کانی‌ها دستخوش باز تعادل کامل شده‌اند [۱۶]. برای مثال، این فرآیند باعث کاهش آلومین پیروکسن‌ها و تغییر پلاژیوکلازها و تا حدی آمفیبول‌ها شده است. بیشتر آمفیبول‌های مورد بررسی از گروه آمفیبول‌های نوع پارگاسیت هستند. قرار گرفتن در گستره پارگاسیت به معنی فقیر بودن از Ti است، زیرا Ti به جای ورود

به شبکه آمفیبول، وارد ساختار ایلمنیت که زودتر از آمفیبول تشکیل شده است می‌شود. علاوه بر آمفیبول‌های اولیه، انواع آمفیبول‌های ثانویه نیز وجود دارد که مربوط به دگرسانی تاخیری یا واکنش پیروکسن با سیلیکات‌های دیگر (بصورت لبه واکنشی) است. هورنبلند چرماکیتی به مقدار قابل توجهی در نمونه‌ها دیده می‌شود.

نظریه سیال‌های حل ناپذیر و نفوذ تپ‌های ماگمایی جدید از فرآیندهای مهم در دگرگونی GKMUC است، بطوریکه پس از تبلور بخش فرامافیک از ماگمای اولیه اصلی، گروه‌های جدیدی از ماگما به اتاق ماگمایی وارد شده و باعث گسترش اتاق ماگمایی و تشکیل سری میانی و بالایی شده است. داجرن [۶] نقش مهم فرآیند ناآمیختگی مایعات را تنها در مورد کانسارهای Fe-Ti رگه‌ای خالص می‌داند و برای تشکیل کانسارهای اکسید Fe-Ti همراه با فازهای سیلیکاته یعنی در سنگ‌های مافیک و فرامافیک عملکرد مجموعه‌ای از فرآیندهایی مانند جدایش بلوری، انباشت بلوری، جدایش در شرایط زیرخط انجماد دمای بالا و همراه با دگرشکلی را پیشنهاد داده است. با این وجود، او عقیده دارد که وجود پدیده‌هایی مانند دایک و رگه با همبری تیز و نفوذی در توده‌های دارای اکسیدهای Fe-Ti به معنی تزریق به صورت مذاب نیست، بلکه می‌تواند بیانگر نفوذ یک توده مملو از بلور (crystal mush) باشد. وجود لبه واکنشی متشکل از یک لایه نازکی از هورنبلند در مزر بین برخی کانی‌های چون اولیوین، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز با اکسیدهای Fe-Ti بین‌بلوری در سنگ‌های کانه‌زایی شده نشانه خوبی برای ورود یک مذاب آبدار بین‌بلوری و واکنش با کانی‌های سیلیکاته پیشتر متبلور شده طی جریان ماگمایی و دگرشکلی همزمان و پس جاییگری این سنگ‌ها هست [۱۹]. کانی‌های سیلیکاته می‌توانند همزمان با اکسیدهای Fe-Ti و آپاتیت در یک مایع باقیمانده در دمای همگذاری متبلور شوند [۳۰، ۳۱، ۳۳]، مانند بخش مافیک آپاتیت‌دار مجموعه GKMUC، ولی تشکیل کانسارهای خالص ایلمنیت و تیتانومگنتیت با این روش قابل توجیه نیست. چنانکه بخش اکسیدی خالص Fe-Ti در GKMUC نبود شاید این فرضیه می‌توانست تشکیل مجموعه کانه‌سازی شده مورد بررسی را توضیح دهد. برخی پژوهشگران [۲۳، ۳۱، ۳۴] معتقدند که برای نهشته شدن تقریباً همزمان اکسیدهای Fe-Ti و سیلیکات‌های فرومنیزین مثل اولیوین و کلینوپیروکسن طی تبلور، باید گریزندگی اکسیژن بالا باشد، زیرا وجود ایلمنیت

های کانه‌زایی شده، هر دو فرآیند غنی‌شدگی از Fe-Ti در مذاب‌های باقیمانده برآمده از ماگمای مادر بازالتی و تزریق یک سیال غنی از Fe-Ti ناآمیخته به داخل بخش مافیک - فرامافیک دخالت داشته است.

مراجع

- [1] Eales H.V., Cawthorn R.G., "The Bushveld complex", In: Cawthorn, R.G. (Ed.), Layered Intrusions. Elsevier, Amsterdam (1996) 181-232.
- [2] Ashwal L.D., "The temporality of anorthosites", Canadian Mineralogist 48(2010) 711-728.
- [3] Cawthorn R.G., "The Bushveld Complex, South Africa. In: Charlier, et al. (Eds.), Layered Intrusions", Springer Geology (2015) 517-588.
- [4] Kolker A., "Mineralogy and geochemistry of Fe-Ti oxide and apatite (nelsonite) deposits and evaluation of the liquid immiscibility hypothesis", Economic Geology 77(1982) 1146-1158.
- [5] Dymek R.F., Owens B.E., "Petrogenesis of apatite-rich rocks (nelsonites and oxide-apatite gabbro-norites) associated with massif anorthosites", Economic Geology 96(2001) 797-815.
- [6] Duchesne J.C., "Fe-Ti deposits in Rogalandth Norway): geochemical characteristics and problem of interpretation", Mineralium Deposita 34(1999) 182-198.
- [7] Lister G.F., "The composition and origin of selected iron-titanium deposits", Economic Geology 61(1966) 275-310.
- [8] Reynolds I.M., "Contrasted mineralogy and textural relationships in the uppermost titaniferous magnetite layers of the Bushveld Complex in the Bierkraal area north of Rustenburg", Economic Geology 80(1985) 1027-1048.
- [9] Von Gruenewaldt G., "Ilmenite-apatite enrichments in the Upper Zone of the Bushveld Complex: A major titanium-rock phosphate resource", International Geology Review 35(1993) 987-1000.
- [10] Zhou M.F., Robinson P.T., Leshner C.M., Keays R.R., Zhang C.J., Malpas J.M., "Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua Gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China", Petrology 46(2005) 2253-2280.
- [11] Veksler I.V., "Extreme iron enrichment and liquid immiscibility in mafic intrusions: Experimental evidence revisited", Lithos, 111(2009) 72-82.

بعنوان فاز اکسیدی Fe-Ti غالب با گریزندگی بالای اکسیژن همخوانی ندارد، بلکه بیانگر گریزندگی پائین اکسیژن است. از این رو، فازهای سیلیکاتی در GKMUC نمی‌توانسته‌اند همزمان با فازهای اکسیدی تبلور یافته باشند. از طرفی، وجود تیغه‌های نازک ایلمنیت در کانی‌های پیروکسن نشان دهنده وجود یک ماگمای اولیه غنی در Fe و Ti یعنی بیانگر ماگمای فروبازالتی و نه یک ماگمای تولیتی است. در تولیت‌ها، غنی‌شدگی از Fe-Ti و SiO_2 در دوره‌های حدواسط رخ می‌دهد و فراورده‌های بعدی و نهایی از این اجزاء غنی نیستند. در صورتیکه ماگمای فروبازالتی در اثر جدایش بلوری می‌تواند فراورده‌های کانه‌زایی شده غنی از Fe-Ti تولید کند. در منطقه مورد بررسی، ماگمای فرو بازی با ردیف تبلور اولیون + کلینوپیروکسن $\pm$ ارتوپیروکسن + پلاژیوکلاز باعث تشکیل انواع سنگ‌های مجموعه GKMUC با یا بدون کانه‌زایی اکسید Fe-Ti در اتاق ماگمایی شده است.

در مجموع می‌توان چنین نتیجه گرفت که هر دو فرآیند جدایش از یک ماگمای فروبازالتی و فرآیند تشکیل سیال‌های ناآمیخته غنی از اکسیدهای Fe-Ti می‌توانند در تشکیل سنگ‌های مافیک-فرامافیک غنی از اکسید Fe-Ti و بخش‌های خالص اکسیدی Fe-Ti مجموعه GKMUC دخیل باشند. بطوریکه در نتیجه آمیختگی ماگمای فروبازالتی با یک سیال آهن-تیتان دار و ناآمیخته بخش کانه‌زایی ناخالص بوجود آمده و تبلور بخش ناآمیخته سیال، سیل‌ها و رگه‌های کانه‌زایی خالص اکسید Fe-Ti را تشکیل داده‌اند. تعیین دقیق خاستگاه و سازوکار کانه‌زایی اکسید Fe-Ti در GKMUC و نقش هریک از این فرآیندها نیازمند بررسی‌های دقیقی با استفاده از داده‌های ایزوتوپی در سنگ‌های منطقه است.

برداشت

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مجموعه GKMUC یک مجموعه توده نفوذی مافیک-فرامافیک لایه‌ای است که دارای چهار پهنه شامل پهنه قاعده‌ای گابروهای غیر لایه‌ای، پهنه فرامافیک، پهنه میانی با گابروهای لایه‌ای و پهنه بالایی با لایه‌های آنورتوزیت و پگماتیت گابروهاست. کانه‌زایی اکسیدهای Fe-Ti به دو صورت کانه‌زایی خالص و کانه‌زایی همراه با کانی‌های سیلیکات، هم در بخش مافیک و هم در بخش فرامافیک به نسبت‌های مختلفی صورت گرفته است. شیمی کانی‌ها نشان می‌دهد که همه واحدهای سنگی سیلیکاتی مجموعه از یک ماگمای مادر فروبازالتی تشکیل شده‌اند ولی در تشکیل بخش-

- equilibria in ferro-basaltic systems*", journal of petrology 36(1995) 1137–1170.
- [24] Frost B. R., Lindsey D.H., "Equilibria among Fe-Ti oxides, pyroxenes, olivine, and quartz: Part II", Application: American Mineralogist 77(1992) 1004–1020.
- [25] Lindsley D.H., Epler N., "Do Fe-Ti oxide magmas exist? Probably not! American Mineralogist (MSA)", DOI: <http://dx.doi.org/10.2138/am-2017-6091>, in press, (2017) p 46.
- [26] Buddington A.F., "Lindsley DH Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents", journal of petrology 5(1964) 310–357.
- [27] Broska I., Uher P., Ondrejka M., "Geochemical and mineralogical characterization of the Fe-Ti oxide paragenesis in the magmatic and hydrothermal systems", Slovak Academy of Sciences (2003) Web page: geol.sav.sk.
- [28] Vernon R.H., "Metamorphic Processes: Reactions and Microstructure Development", London: George Allen and Unwin (1976).
- [29] Force E.R., "Geology of titanium mineral deposits", Geological Society of America Special Paper 259(1991) 112.
- [30] Charlier B., Namur O., Duchesne J.C., Wiszniewska J., Parecki A., Vander Auwera J., "Cumulate origin and polybaric crystallization of Fe-Ti oxide ores in the Suwalki anorthosite, Northeastern Poland", Economic Geology 104(2009) 205–221.
- [31] Charlier B., Namur O., Bolle O., Latypov R., Duchesne J.C., "Fe-Ti-V-P ore deposits associated with Proterozoic massif-type anorthosites and related rocks", Earth Science 141(2015) 56–81.
- [32] Nicolas A., "Kinematics in magmatic rocks with special reference to gabbros", Journal Petrol 33(1992) 891–915.
- [33] Charlier B., Skår Ø., Korneliussen A., Duchesne J.C., Vander Auwera J., "Ilmenite composition in the Tellnes Fe-Ti deposit, SW Norway: fractional crystallization, postcumulus evolution and ilmenite-zircon relation", Contributions to Mineralogy and Petrology 154(2007) 119–134.
- [34] Snyder D., Carmichael I.S.E., Wiebe R.A., "Experimental study of liquid evolution in an Fe-rich, layered mafic intrusion: Constraints of Fe-Ti oxide precipitation on the T-fO₂, and T-p paths of tholeiitic magmas", Contributions to Mineralogy and Petrology, 113(1993) 73 – 86.
- [12] Asadpour M., Heuss S., Pourmoafi S.M., "New Evidences of Precambrian and Paleozoic Magmatism in the Gharebagh Intrusive, NW Iran (in Persian)", Scientific Quarterly Journal, Geosciences 89(2013) 129–142.
- [13] Cawthorn R.G., Molyneux T.G., "Vanadiferous magnetite deposits of the Bushveld Complex C.R. Anhaeusser, S. Maske (Eds.), Mineral Deposits of South Africa", Geological Society of South Africa, Johannesburg (1986) 1251–1266.
- [14] Higgins M.D., "A new model for the structure of the Sept Iles Intrusive suite", Canada Lithos, 83(2005) 199–213.
- [15] Namur O., Charlier B., Toplis M.J., Higgins M.D., Liégeois J.P., Vander Auwera J., "Crystallization sequence and magma chamber processes in the ferrobaltic Sept Iles layered intrusion, Canada", Journal of Petrology 51(2010) 1203–1236.
- [16] Mirmohammadi M., Kananian A., Tarkian M., "The nature and origin of Fe-Ti-P-rich rocks in the Qareaghaj mafic-ultramafic intrusion", Mineralogy and Petrology 91(2007) 71–100.
- [17] Haghipour A., Aghanabati A., "Geological Quadrangle Map of the Serow, 1/100,000" Geological Survey of Iran, Tehran, Series Sheet 4965 (1988).
- [18] Ajdary K., "Petrology of mafic and Ultramafic rocks of Ghazan Complex in Sero Quadrangle", MSc thesis, Research Institute of Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian) (1997) 134p.
- [19] Parlak O., Delaloye M., Bingol E., "Mineral chemistry of ultramafic and mafic cumulates as an indicator of the arc-related origin of the Mersin ophiolite (Southern Turkey)", Geologischen Rundschau 85(1996) 647–661.
- [20] Morimoto N., "Nomenclature of pyroxenes", Canadian Mineralogist 27(1989) 143–156.
- [21] Bence A.E., Papike J.J., "Pyroxenes as recorders of lunar basalt petrogenesis: Chemical trends due to crystal-liquid interaction", Proc. 3rd Lunar Sci. Conf. (1972) 431–469.
- [22] Schweitzer E.L., Papike J.J., Bence A.E., "Statistical Analysis of Clinopyroxenes from Deepsea Basalts", American Mineralogist 64(1979) 502–513.
- [23] Toplis M.J., Carroll M.R., "An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt