

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

منیژه اسدپور^{*}؛ 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 سندج – سیرجان در سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین رخنمون دارد. بررسی‌های صحرایی، شیمی کانی‌ها و مجموعه کانی‌ای 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 (۳۰-۲۵٪) 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 (۰/۵-۵٪) در این پهنه فقط در بخش‌های دربردارنده آپاتیت صورت گرفته است. بالاترین پهنه شامل آنورتوزیت و پگماتیت گابروهایی با ۰-۲٪ اکسید Fe-Ti است. بر پایه این بررسی‌ها، در تشکیل لایه‌های غنی از اکسید Fe-Ti، هر دو فرآیند (۱) غنی‌شدنی در مذاب‌های باقیمانده مشتق شده از یک مagma مادر فروبازانلتی 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.

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

مقدمه 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 معنی اکسیدی Fe-Ti عموماً با نفوذی‌های لایه‌ای مافیک – فرامافیک و یا مجموعه‌های آنورتوزیتی همراه هستند [۱-۳]، و در این حالت بیشتر به صورت رگه، عدسی و یا بخش‌های محصور شده هستند [۴، ۵]. بحث‌ها و نظریه‌های مختلفی در مورد خاستگاه این کانسارها وجود دارد. دو فرضیه متداوی با دو سازوکار متفاوت در این زمینه بیشترین طرفدار را دارد؛ یکی مربوط به غنی‌شدنی در مذاب‌های باقیمانده در نتیجه جدایش و تهنشست بلوری از magma فروبازانلتی [۵، ۶] و

بیشترین حجم برونز 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 رخمنون‌های 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 رخمنون‌ها 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 ورلیت، پیروکسنتیت و کمی دونیت هستند که در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از حجم توده را تشکیل می‌دهند. رخمنون آنها محدود است و فقط در برخی قسمت‌ها، آنهم به صورت بخش‌های سیل مانند موازی با بخش گابروهای غیر لایه‌ای هستند. آنورتوزیتها بصورت لایه‌های روش 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 پیروکسن دار یا آنورتوزیت خالدار رخمنون 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 است. 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 ماقمایی قرار دارند. گاهی بخش‌های خالصی از اکسید-های دیده می‌شود که بخش‌های کنده شده از آن را بصورت قطعات بزرگ و کوچک پراکنده با قطر کمتر از یک متر در

در یک مایع باقیمانده و دمای همگذاری، کانی‌های سیلیکاته می‌توانند همزمان با اکسیدهای Fe-Ti متبلور شوند. در سال -های اخیر، حل ناپذیری سیال غنی از اکسیدهای Fe-Ti در ماقماهای تولئیتی تکامل یافته، به ویژه در نفوذی‌هایی مانند اسکرگار و سپت - ایلس (Sept Iles) مطرح گردیده است [۱۱-۹].

توده نفوذی مافیک و فرامافیک غازان - خانیک (GKMUC) در غرب دریاچه ارومیه، بین طول‌های جغرافیایی $۳۸^{\circ} ۳۸' \text{ تا } ۴۰^{\circ} ۴۴'$ شرقی و عرض جغرافیایی $۳۷^{\circ} ۵۸' \text{ تا } ۳۸^{\circ} ۰'$ شمالی قرار دارد (شکل ۱). این توده نفوذی بخشی از توده‌های نفوذی اوایل پرمین شمال غرب پنهان سندج - سیرجان است [۱۲]. این توده از نظر حجمی از نفوذی‌های لایه‌ای شناخته شده‌ای مانند بوشولد در آفریقای جنوبی [۱۳]، سپت ایلس در کانادا [۱۴] و اسکرگار در گرینلند [۱۵] و حتی قره آغاج [۱۶] واقع در ۲۷ کیلومتری جنوب شرقی آن کوچکتر است. 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 سنگ‌شناختی، 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 شیست، 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 ~۳۰۰ میلیون سال را برای گابروهای GKMUC تعیین کرده و به فعالیت‌های تنوره گوشه‌ای نسبت داده شده است [۱۲].

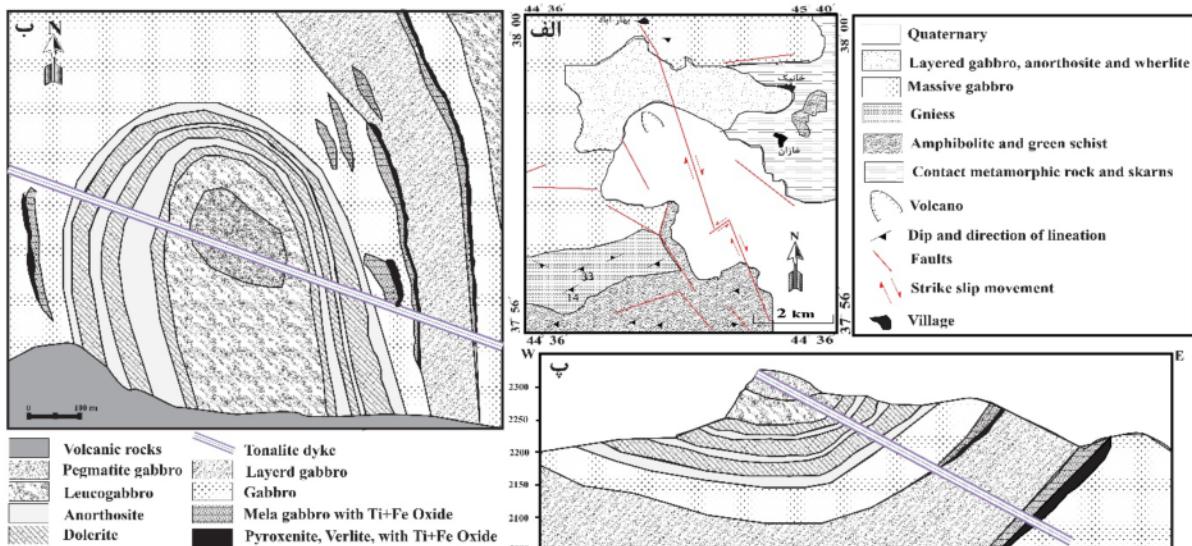
جز بخش جنوبی آن که توسط سنگ‌های آتشفشاری کواترنری پوشیده شده، سایر بخش‌ها با گابروهای غیرلایه‌ای همسن محصور شده است [۱۷]. بهترین محل رخمنون واحدهای سنگی مجموعه متشكل از سنگ‌های مافیک-فرامافیک تا آنورتوزیت داخل دره‌ای در سه کیلومتری جنوب غربی روستای غازان است. بخش مافیک، شامل دو قسمت، گابروی لایه‌ای و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

نقطه‌ای کانی‌های مختلف انتخاب شدند. جهت بررسی نقطه‌ای کانی‌های سازنده سنگ‌های مختلف، تجزیه کمی کانی‌ای توسط دستگاه ریزپردازنده الکترونی (مدل CAMECA SX-100) با ولتاژ ۱۲ kV و شدت جریان ۱۰ 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 آبراهه‌ها اکسیدهای Fe-Ti پلاسربی 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 (برگفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سرو، سبزه‌ای 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) همبrij بخش آنورتوزیتی با دایک دلریتی، (پ) رخنمون همبrij بخش‌های مختلف توده، (ت) نمونه لوکوگابروی 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			
نمونه	1A81	2A08	2A10	2A18	2A30	2A	2A59	2A61	2A62	
مختصات	E:469760.22 N:4203480					E:469759 N:4203479				
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	۰,۰۲	۰,۴۵	۰,۰۵	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۰	۰,۴۶	۰,۴۳	
MgO	۲۷,۰۰	۲۶,۹۶	۲۲,۰۱	۲۵,۹۶	۲۵,۸۵	۲۷,۰۲	۲۶,۸۹	۲۳,۹۵	۲۷,۹۸	
CaO	۰,۴۶	۰,۰۹	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	۱۰۰,۸۵	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	۲۹۹	۲۹۹	
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	۵۸,۰۴	
Fa	۴۲,۵۷	۴۲,۴۹	۴۹,۱۷	۴۴,۱۲	۴۴,۲۸	۴۲,۲۶	۴۳,۳۵	۴۷,۴۲	۴۰,۹۴	
Tp	۰,۴۰	۰,۶۲	۰,۵۶	۰,۶۶	۰,۵۳	۰,۵۲	۰,۴۷	۰,۵۷	۰,۵۲	
#Mg	۵۷,۲۵	۵۷,۲۵	۵۰,۰۵	۵۵,۰۹	۵۵,۴۸	۵۷,۵۱	۵۶,۴۴	۵۲,۳۱	۵۸,۸۴	

جدول ۲ نتایج آنالیز میکروپرپوپ کانی‌های پلاژیوکلاز انتخابی.

سنگ	فرامافک			ریزگاپرو			گاپرو درشت			لوکوگاپرو		
نمونه	10.2.16	11.2.16	10.2.16	241.1.2	2411.4	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
مختصات	E:469760.22 N:4203479.88											E:469548.35 N:4204339.91
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	۰,۰۱	۰,۰۱۲	۰,۰۸۶	۰,۰۶۹	۰,۰۸۲
Al ₂ O ₃	۲۹,۲۳۷	۲۶,۷۰۱	۲۹,۲۳۷	۲۶,۴۷۷	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	۰,۰۰۲۷	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	۰,۳۲۳
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	۰,۰۰۴	۰,۰۰	۰,۱۴۶	۰,۰۰	۰,۱۵۳
NiO	۰,۰۰	۰,۰۱۶	۰,۰۰	۰,۰۴۸	۰,۰۰	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	۱۰۰,۸۴
Si	۹,۷۷۴	۱۰,۲۳۰	۹,۷۷۴	۱۰,۲۸۷	۱۰,۳۲۴	۱۰,۳۳۹	۹,۸۲۰	۹,۶۸۰	۱۰,۳۷۸	۷,۸۹۵	۱۱,۱۹۰	۸,۸۲۴
Ti	۰,۰۰۸	۰,۰۱۰	۰,۰۰۸	۰,۰۰۸	۰,۰۰۷	۰,۰۲۲	۰,۰۰	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲	۰,۱۳	۰,۰۰۹	۰,۰۰۹
Al	۶,۱۸۵	۵,۶۸۵	۶,۱۸۵	۵,۶۳۴	۵,۵۷۶	۵,۰۵۹	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	۰,۴۹	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	۲,۷۴۸	۲,۰۳۳	۲,۴۸۸	۱,۹۸۸	۲,۱۳۲	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
۲۰,۳۷۲	۱۹,۹۴۳	۲۰,۳۷۲	۱۹,۸۹۲	۱۹,۹۴۸	۱۹,۹۰۷	۱۹,۹۱۹	۱۹,۹۸۶	۱۹,۶۹۶	۲۰,۹۱۴	۱۹,۸۲۱	۲۰,۷۸۵	
تعداد اکسیژن	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸
An	۴۳,۳۷۳	۴۸,۹۵۲	۴۳,۳۷۳	۴۶,۶۹۸	۴۶,۶۸۴	۴۷,۲۲۵	۶۰,۳۴۲	۶۰,۷۰۱	۵۰,۹۹۴	۹۷,۹۲۹	۰,۱۸۳	۸۲,۱۷۴
Ab	۵۶,۵۴۹	۵۰,۶۰۷	۵۶,۵۴۹	۵۲,۷۹۳	۵۳,۲۸۷	۵۲,۷۵۷	۳۹,۵۶۶	۳۹,۲۲۵	۴۸,۹۰۰	۱۹۵۰	۹۸,۸۵۶	۱۷,۶۶۴
Or	۰,۰۷۸	۰,۳۹۰	۰,۰۷۸	۰,۰۵۰	۰,۰۲۹	۰,۰۱۷	۰,۰۹۳	۰,۰۷۴	۰,۱۰۶	۰,۱۲۱	۰,۹۶۰	۰,۱۶۲

جدول ۳ نتایج آنالیز میکروپرپ کانی‌های پیروکسن انتخابی تعدادی از سنگ‌های منطقه.

سنگ	ریزگایرو			فرامافک			فرامافک		
نمونه	241.1a.12	2411a1211	241.2.2	0.21116	211.25	211.26	18.1.a1	16.2.1	11.4.1
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	۱/۵۴	۱/۵۸۵	۱/۷۵۸	۰/۳۱	۰/۱۲۹	۰/۱۳۲	۴۶۲۴	۴۳۰۶	۴۵۶۷
Cr ₂ O ₃	۰/۰۸	۰/۰۶۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۴	۰/۰۲۸	۰/۰۲۴
TiO ₂	۰/۲۴۱	۰/۲۲۳	۰/۰۶۳	۰/۰۲۸	۰/۰۲۳	۰/۰۰۴	۰/۰۷	۱/۰۲۴	۱/۰۳۷
MgO	۱۹/۵۰۴	۱۹/۶۸۵	۱۶/۸۸۳	۲۴/۴۱۶	۲۵/۱۲	۲۵/۵۵۶	۱۲/۵۱۶	۱۲/۳۱۳	۱۲/۹۴۶
FeO	۲۴/۷۳	۲۴/۷۳۱	۲۳/۹۲	۳۷/۱۱۸	۳۳/۹۰۵	۳۳/۷۸۳	۸/۵۹۳	۹/۴۶	۱/۰۲۹
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	۲/۰۴۲۲	۱۹/۳۹۹
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	۰/۰۱۹	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	۰/۰۲	۰/۱۸۹	۰/۰۲
Cr	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	
Ti	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹
Mg	۱/۰۶	۱/۰۶۸	۰/۹۳۱	۱/۲۷۲	۱/۴۵۳	۱/۴۵۲	۰/۶۹۱	۰/۸۸۳	۰/۷۱۸
Fe ²	۰/۷۳۳	۰/۷۳۲	۰/۷۴	۰/۲۱۲	۰/۰۰	۰/۰۰۰	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	۰/۰۱۴	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	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰
Ni	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
تعداد اکسیژن	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶
مجموع کاتیون	۳/۹۴۷	۳/۹۵	۳/۹۳۱	۴/۰۰	۴/۰۰	۴/۰۰	۴/۰۰	۴/۰۰	۴/۰۰

جدول ۴ نتایج آنالیز میکروپرپ کانی‌های ایلمنیت نمونه های انتخابی.

سنگ	فرامافک				اکسید خالص				ریزگایرو				
نمونه	211.14.1	2.211	1.2113b	6.2113b	33.	53.	63.	73.	118.	1a9	1a91211	219.	
مختصات	E:469760.22m N:4203479.88m												
SiO ₂	۰/۰۸۴	۰/۳۰۴	۰/۰۵۲	۰/۰۶۰	۰/۰۷۳	۰/۰۲۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۱۰۴	۰/۱۰۵	۰/۱۰۵	۰/۱۰۶۴	
Al ₂ O ₃	۰/۰۰	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	۵۲/۷۷۲	۵۲/۶۰۵	۵۲/۳۹۱	۵۲/۵۱۶	
MgO	۱/۷۱۷	۰/۶۹۵	۱/۷۶	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	۰/۱۳۴	۰/۸۲۲	۰/۸۷۵	۰/۸۹۰	۱/۰۰۹	۱/۰۱۵	۱/۰۱۲	۱/۳۰۱	
CaO	۰/۰۰	۰/۰۳۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰۸	۰/۰۲۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰	۰/۰۴۵	۰/۱۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۸۹	
Na ₂ O	۰/۰۲۰	۰/۰۰۴	۰/۰۴۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳۱	۰/۰۰۳	-	-	-	-	
K ₂ O	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰۵	-	-	-	-	
NiO	۰/۰۰	۰/۰۱۶	۰/۰۱۷	۰/۰۱۱	۰/۰۰	۰/۰۶۵	۰/۰۰	-	-	-	-	-	
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	۰/۰۰۵	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	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
Cr	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
Ti	۱/۰۰۱	۱/۰۵	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	۰/۰۱۰		
Fe ₂	۰/۹۱۲	۰/۸۴۷	۰/۹۰۹	۰/۹۰۸	۰/۹۵۶	۰/۹۴۹	۰/۹۵۳	۰/۹۵۴	۱/۹۳۰	۱/۹۲۳	۱/۹۲۹	۱/۹۳۶	
Fe ₃	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰	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	۰/۰۲۳	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۵۶	
Ca	۰/۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰	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	۰/۰۰۰	-	-	-	-	-	
K	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	-	-	-	-	-	
Ni	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	-	-	-	-	-	
تعداد اکسیژن	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	
Xhem	۰/۰۰	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	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۲	۰/۰۲۶	
Xilm	۰/۹۲۲	۰/۹۶۳	۰/۹۱۴	۰/۹۱۷	۰/۹۵۷	۰/۹۵۲	۰/۹۵۶	۰/۹۷۶	۰/۹۷۳	۰/۹۶۹	۰/۹۶۹		

جدول ۵ نتایج آنالیز میکروپرپوپ کانی‌های مگنتیت نمونه‌های انتخابی.

سنگ	فرامافیک							اکسید Fe-Ti خالص							ریز‌گالبرو
نمونه	25.12	11.12	9.12	21.3211	15.4.1211	10.5.1211	210.13.3	210.20.3	210.27.3	210.29.3	210.31.3	210.41.3	241.2a10		
مختصات	E:469760.22m N:4203479.88m							E:469692.39m N:4203462.54m							E:469705.08m N:4204635.09m
SiO ₂	۰,۰۴	۰,۱۲	۰,۰۴	۰,۰۸	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۱۱	۰,۰۵	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۴		۱,۳۴	
TiO ₂	۱,۳۶	۰,۸۷	۲,۳۶	۰,۷۲	۰,۶۷	۰,۷۳	۰,۲۱	۰,۱۶	۰,۴۷	۰,۱۵	۰,۳۲	۰,۱۴		۱,۰۵	
Al ₂ O ₃	۰,۷۱	۱,۳۶	۰,۹۷	۰,۴۵	۰,۷۹	۰,۷۳	۰,۳۷	۰,۵۱	۰,۶۱	۰,۴۰	۰,۳۵	۰,۴۷		۱,۱۴	
Cr ₂ O ₃	۰,۰۹	۰,۱۲	۰,۰۷	۰,۰۱	۰,۱۱	۰,۱۰	۰,۰۶	۰,۰۸	۰,۰۱	۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۱		۱,۹۵	
Fe ₂ O ₃	۶۵,۸۱	۶۵,۰۹	۶۳,۳۰	۶۶,۶۸	۶۶,۸۰	۶۶,۸۸	۶۷,۹۰	۶۷,۵۳	۶۷,۰۲	۶۷,۹۵	۶۷,۸۳	۶۸,۰۴		۶۰,۸۹	
FeO	۳۲,۴۲	۳۱,۴۷	۳۲,۸۶	۳۱,۶۰	۳۱,۶۲	۳۱,۶۳	۳۱,۱۸	۳۱,۰۲	۳۱,۴۹	۳۱,۰۳	۳۱,۲۸	۳۱,۲۲		۳۲,۸۳	
MnO	۰,۰۶	۰,۰۰	۰,۱۳	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۰۰	۰,۰۲		۰,۰۰	
MgO	۰,۱۱	۰,۳۸	۰,۳۰	۰,۰۹	۰,۲۰	۰,۰۲	۰,۰۶	۰,۱۱	۰,۰۴	۰,۰۶	۰,۰۲	۰,۰۱		۰,۲۰	
CaO	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۵	۰,۰۲		۰,۸۰	
مجموع	۱۰۰,۶۳	۹۹,۴۱	۱۰۰,۰۲	۹۹,۶۶	۱۰۰,۲۳	۱۰۰,۳۱	۹۹,۸۴	۹۹,۶۲	۹۹,۷۱	۹۹,۷۱	۹۹,۹۰	۹۹,۹۷		۱۰۰,۲۰	
Si	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱		۰,۴۱	
Ti	۰,۳۱	۰,۲۰	۰,۵۴	۰,۱۷	۰,۱۵	۰,۱۷	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۱۱	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۰۳		۰,۲۴	
Al	۰,۲۶	۰,۴۹	۰,۳۵	۰,۱۶	۰,۲۹	۰,۲۶	۰,۱۳	۰,۱۸	۰,۲۲	۰,۱۵	۰,۱۳	۰,۱۷		۰,۴۰	
Cr	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰		۰,۴۷	
Fe(iii)	۱۵,۰۸	۱۵,۰۰	۱۴,۵۳	۱۵,۴۵	۱۵,۳۶	۱۵,۳۶	۱۵,۷۳	۱۵,۶۶	۱۵,۵۲	۱۵,۷۶	۱۵,۷۱	۱۵,۷۴		۱۲,۸۴	
0Fe(ii)	۸,۲۵	۸,۰۶	۸,۳۸	۸,۱۴	۸,۰۸	۸,۰۷	۸,۰۳	۷,۹۹	۸,۱۱	۸,۰۰	۸,۰۵	۸,۰۳		۸,۲۹	
Mn	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰		۰,۰۰	
Mg	۰,۰۵	۰,۱۷	۰,۱۴	۰,۰۴	۰,۰۹	۰,۱۰	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۰۱		۰,۰۹	
Ca	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۱		۰,۲۶	
مجموع	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	
تعداد اکسیژن	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴		۴	
Fe/Fe+Mg	۱,۰۰	۰,۹۹	۰,۹۹	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰		۱,۰۰	
Cr/Cr+Al	۰,۰۸	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۸	۰,۰۸	۰,۱۰	۰,۰۹	۰,۰۱	۰,۰۸	۰,۰۵	۰,۰۲		۰,۵۳	
Fe(ii)	۸,۲۵	۸,۰۶	۸,۳۸	۸,۱۴	۸,۰۸	۸,۰۷	۸,۰۳	۷,۹۹	۸,۱۱	۸,۰۰	۸,۰۵	۸,۰۳		۸,۲۹	
Fe(iii)	۱۵,۰۸	۱۵,۰۰	۱۴,۵۳	۱۵,۴۵	۱۵,۳۶	۱۵,۳۶	۱۵,۷۳	۱۵,۶۶	۱۵,۵۲	۱۵,۷۶	۱۵,۷۱	۱۵,۷۴		۱۲,۸۴	
Fe ²⁺ /Fe ²⁺ +Fe ³⁺)	۰,۳۵	۰,۳۵	۰,۳۷	۰,۳۵	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴	۰,۳۴		۰,۳۸	
Fe ³⁺ (Fe ³⁺ +Fe ²⁺)	۰,۶۵	۰,۶۵	۰,۶۳	۰,۶۵	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۶۶		۰,۶۳	

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 پلازیوکلازها 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

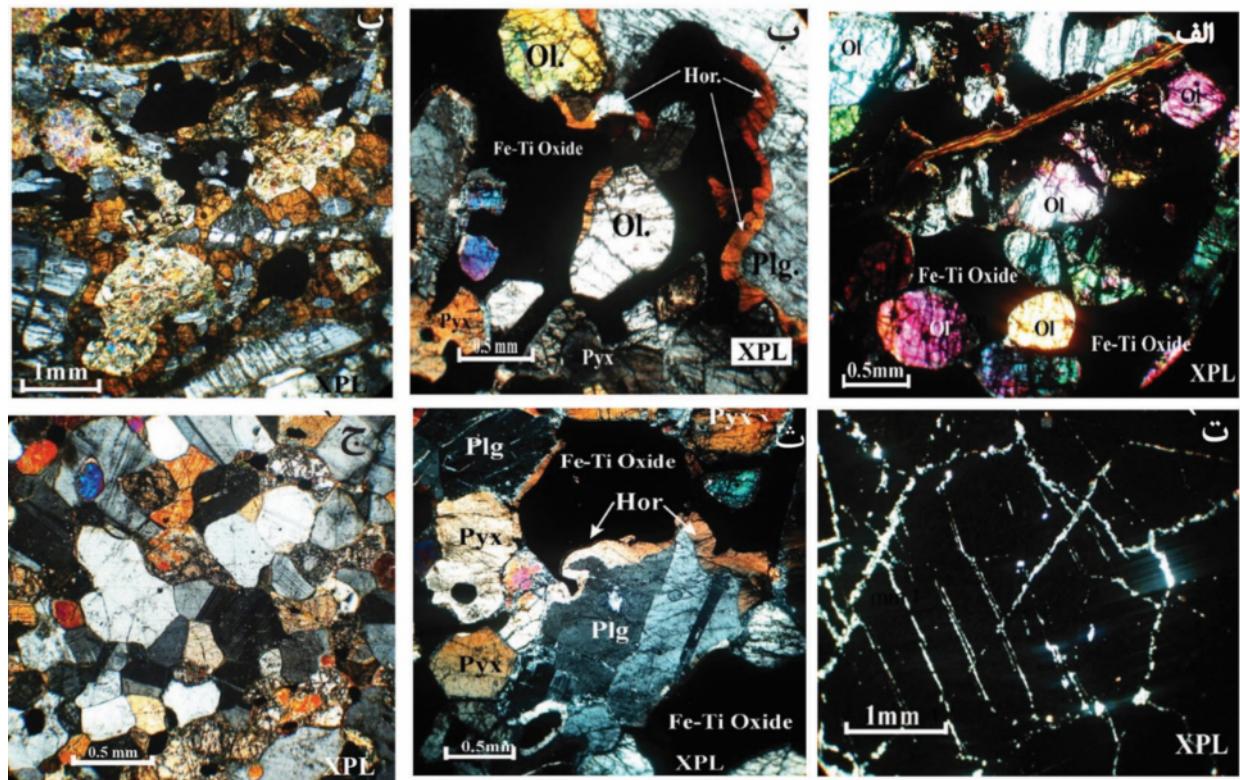
نتایج و بحث سنگنگاری

گابروهای غیر لایه‌ای بیشتر دانه‌های ریز تا متوسط بوده، بافت غالباً آنها دانه‌ای نیمه خود ریخت است. پلازیوکلاز، کلینوپیروکسن (با ترکیب دیوپسید و اوژیت) و ارتوبیروکسن همراه با مقداری آمفیبول بیشترین حجم کانی‌ها را تشکیل می‌دهند. زیرکن، آپاتیت و کانی کدر بعنوان کانی فرعی در این سنگ‌ها حضور دارند. پلازیوکلاز بعنوان متداول ترین کانی با دانه‌های تقریباً هم اندازه مسطح نیمه شکل‌دار و گاهی شکل‌دار دیده می‌شود. پلازیوکلازها بدون منطقه‌بندی نوسانی و بیشتر دارای ماکل آلبیتی هستند و در مقاطع مختلف ترکیب آندزین تا

پلازیوکلاز تا حدی سوسوریتی شده‌اند، در این قسمت‌ها ترکیب پلازیوکلازها به طرف آلبیت 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 پلازیوکلاز 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 پلازیوکلاز و پیروکسن، کانی‌های ثانویه ترمولیت، آکتینولیت، کلریت، کلسیت، زوئیزیت و اکسیدهای آهن نیز دیده می‌شود.

بخش فرامافیک شامل ورلیت، 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 پلازیوکلاز 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.

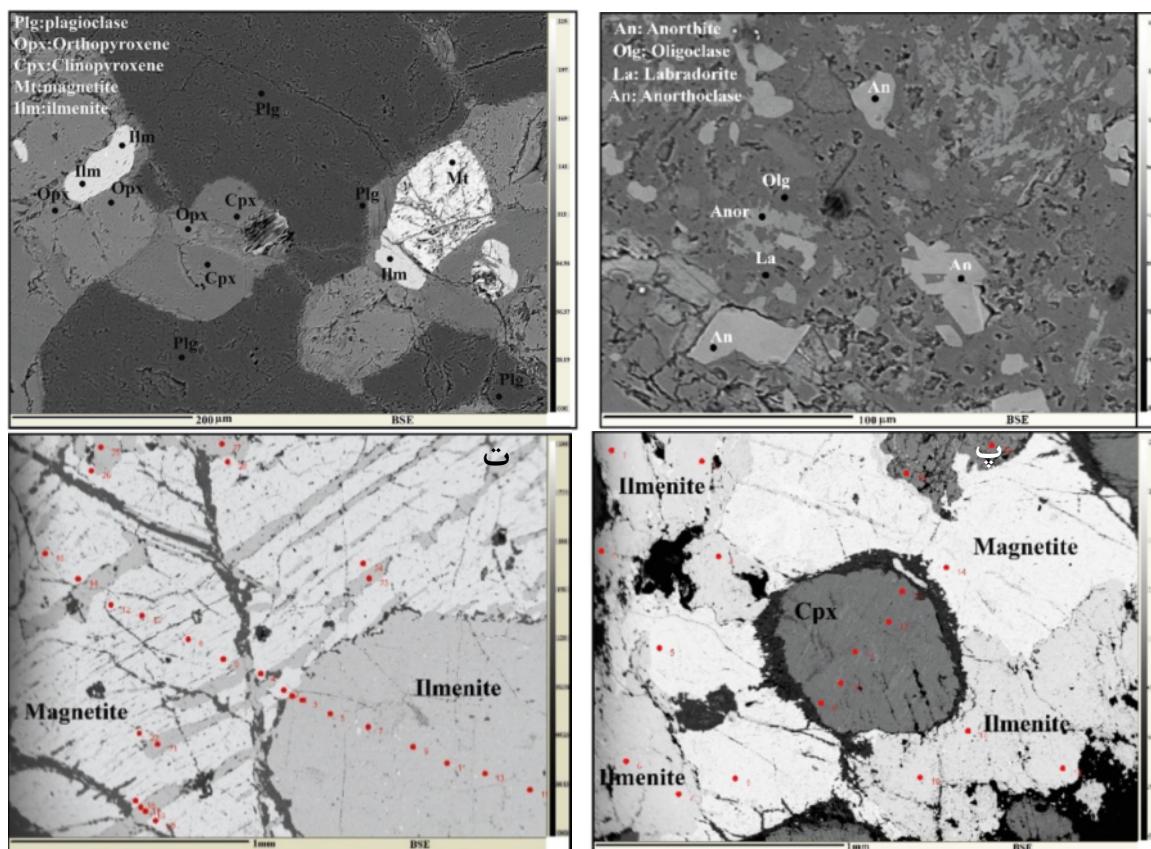
گابروهای لایه‌ای، بر اساس مقدار کانی‌ها در سنگ‌های مافیک تنوعی از سنگ‌های ملاگابرو تا آنورتوزیت دیده می‌شود. این بخش دارای ترکیب کانی‌شناسی ساده‌ای شامل پلازیوکلاز، کلینوپیروکسن (دیوپسید و اوژیت) و کمی ارتوپیروکسن بوده و اندازه دانه‌ها متوسط تا درشت است. پلازیوکلازها فاقد منطقه‌بندي نوسانی هستند و ماکل آلبیتی دارند و معمولاً به شکل قطعات نیمه شکل دار تا بی‌شکل در اندازه‌های ۱ تا ۳ میلی‌متری دیده می‌شود. کلینوپیروکسن‌ها بیشتر اورالیتی شده‌اند. در برخی نمونه‌ها سوزن‌های ریزی از ایلمینیت در سطوح تورق پیروکسن‌ها وجود دارد که دارای نظم خاصی هستند. لبه واکنشی در بردارنده هورنبلنده بصورت بافت تاج خروسی در محل تماس اکسیدهای آهن و تیتان با پلازیوکلاز و پیروکسن در برخی نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۳). پگماتیت گابروها دارای بلورهای درشت پیروکسن، آمفیبول و پلازیوکلاز 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 تبدیل شدگی بحدی است که اثری از کانی اولیه باقی نمانده است. بلورهای



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

مقداری سرپا نتیجه شده‌اند. در برخی قسمت‌ها مقدار اولیوین به حدی می‌رسد که می‌توان آنرا یک دونیت نامید. جهت یافته‌گی ترجیحی بصورت لایه‌بندی ماقمایی یا کانیابی به مقدار خیلی کم در قسمت‌های دونیتی دیده می‌شود. اولیوین‌ها گاهی شامل قطرک‌های 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 سیلیکاته، نسل دوم بصورت فاز بین کومهای در بین فازهای کانیابی سیلیکاته 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 قهقهه‌ای فراوانترین کانی فرعی است. در بیشتر نمونه‌ها، این کانی بصورت یک لبه واکنشی در اطراف کانی‌های سیلیکاته 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، ارتپیروکسن، آمفیبول و مقدار فراوانی کانی‌های تیتانومنیتیت هستند. مقدار کمی پلاژیوکلاز نیز در این سنگ‌ها وجود دارد. پیروکسن‌ها معمولاً نیمه شکل دار تا بی‌شکل بوده و اندازه آنها بین ۵ تا ۱ میلی‌متر متغیر است. میانبارهایی از اکسیدهای Fe-Ti هم بصورت قطرک مانند و هم بصورت سوزنی شکل به موازات سطوح تورق منشوری در کانی‌های سیلیکاته دیده می‌شود. پلاژیوکلازها معمولاً به شکل قطعات نیمه شکل دار تا بی‌شکل در اندازه‌های ۱ تا ۳ میلی‌متری هستند. در نمونه‌های ورليتی و دونیتی، بلور اولیوین سالم کم هستند و بیشتر تبدیل به ايدنگزیت شده‌اند. در ورليت‌ها اولیوین بصورت کانی‌های شکل دار تا نیمه شکل دار 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.

سرد شدگی ماقما در مرحله زیر خط انجماد و یا فرایندهای آلایش و دگرسانی بعدی است، بطوریکه تبادل کاتیونی منیزیم از طرف مرکز به سمت لبه بلورهای اولیوین بیشتر صورت می-گیرد [۱۶-۱۹]. در بلورهای اولیوین درصد فورستریت بیشتر از فایالیت است.

پلاژیوکلаз: 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). 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 آلبیت، اولیگوکلاز و آنورتوکلاز تغییر ماهیت داده است، زیرا بخش‌هایی از آنورتوزیت اولیه بصورت لکه‌های باقی‌مانده در بلورهای تبدیل یافته دیده شود. در لوکوگابروها، بخش‌های آنورتوزیتی دگرنهاده 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 باقی‌مانده‌اند. بررسی داده‌های تجزیه نقطه‌ای نشان می‌دهد که پلاژیوکلاز در همه سنگ‌های موردن بررسی، تقریباً فاقد منطقه‌بندی ترکیبی است و یا تغییرات بسیار ناچیزی دارد. **پیروکسن:** گستره ترکیبی پیروکسن‌ها گستردۀ بوده و شامل اوژیت، دیپسید، کلینوانتستاتیت و پیژونیت است (شکل ۶ الف). با توجه به جدول ۳، ترکیب کانی‌های کلینوپیروکسن در انواع سنگ‌های GKMUC در گستره ترکیبی $W_{0.28-45}E_{n34}$ - $F_{S_{15-24}}^{48}$ یعنی در $W_{0.45-48}E_{n36-40}F_{S_{15-17}}^{48}$ یعنی در گستره اوژیت تا $W_{0.1-2}E_{n57-87}F_{S_{13-40}}^{16}$ یعنی در $W_{0.7-15}E_{n70-78}F_{S_{14-16}}^{16}$ یعنی در گستره ترکیبی کلینوانتستاتیت تا پیژونیت قرار دارند. بررسی های انجام شده شواهد آشکاری از منطقه‌بندی ترکیبی قابل توجه در پیروکسن‌ها نشان ندادند. برخی از کلینوپیروکسن‌ها به ارتپیروکسن است. معمولاً اوژیت‌ها یا بصورت برون رست در دیوپسیدها و یا بصورت لبه واکنشی بین دیوپسیدها و اولیوین

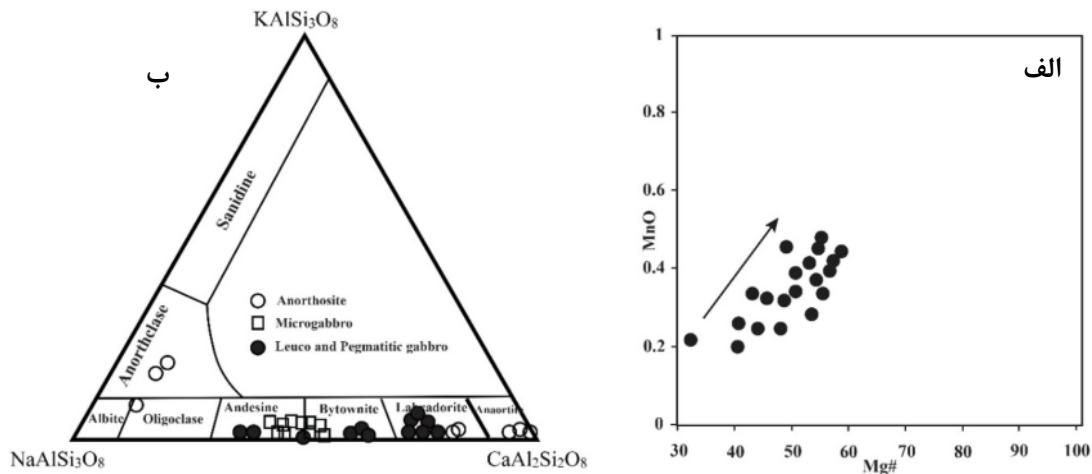
درصد اکسیدهای Fe-Ti در فرامافیک‌ها ۲۵-۳۰ مقدار است در حالیکه در بخش تقریباً خالص درصد آن تا بیش از ۹۰ درصد نیز می‌رسد. نسبت ایلمنیت به مگنتیت در سنگ‌های فرامافیک کانه‌زایی شده منطقه حدود ۴ به ۲ و در نمونه‌های خالص کانه‌زایی شده این نسبت حدود ۵ به ۲ است. با توجه به جدول‌های ۴ و ۵، درصد حجمی ایلمنیت در سنگ‌های فرامافیک غنی از کانه، ۱۹-۱۱، در سنگ‌های مافیک ۰.۵-۵ و در نمونه‌های خالص کانه‌زایی شده نزدیک به ۶۰ است. کانی‌های ایلمنیت، بیشتر به شکل بلورهای نیمه شکل دار 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 رگجه‌ای 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

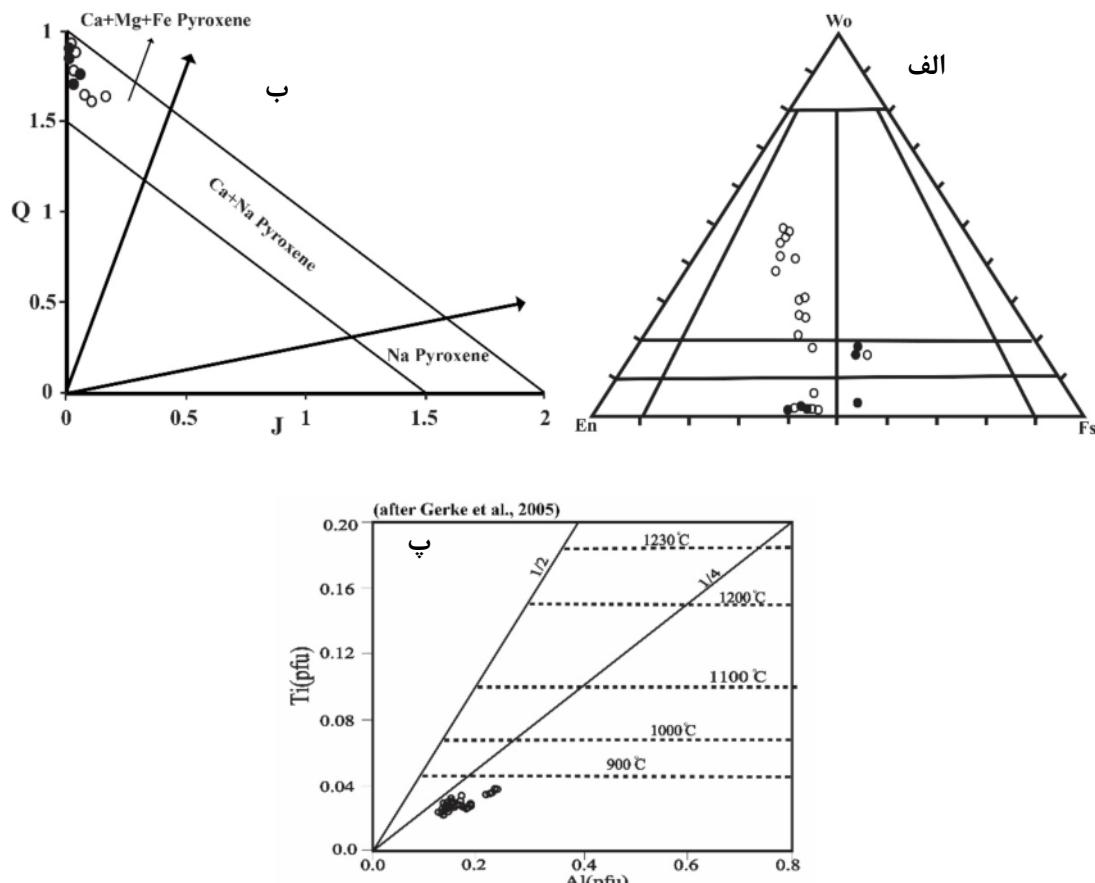
اولیوین: نتایج تجزیه ریزپردازشی اولیوین نقاط انتخابی از دو نمونه ورلیتی و دونیتی در جدول ۱ آورده شده است. درصد فورستریت اولیوین در ورلیت‌ها از Fo_{50} تا Fo_{40} متغیر است. در مواردی که بلورهای اولیوین در نزدیکی اکسیدهای Fe-Ti قرار دارند، مقدار فورستریت در لبه بلور بیشتر از مرکز آن است، بطوریکه اختلافی حدود ۲ تا ۳ درصدی بین درصد فورستریت لبه و مرکز بلورها دیده می‌شود. این نسبت در اولیوین‌هایی که توسط اکسیدهای Fe-Ti احاطه شده‌اند بیشتر است. در حالیکه چنین اختلافی در بلورهای اولیوینی 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 اولیوین است. مقدار MnO در اولیوین‌ها از 0.33% تا 0.47% 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 اولیوین وجود دارد. البته تغییرات ترکیبی بلورهای اولیوین بیش از آنکه به معنای منطقه‌بندی ترکیبی به معنای واقعی و اولیه باشد، مربوط به تبادلات کاتیونی در حالت تعادل دوباره طی فرآیند

مقدار Ti، اختلاف اندکی بین نمونه‌های مافیک و فرامافیک وجود دارد و تغییر Ti در آنها تدریجی است که به ترتیب تبلور کانی‌ها در مگما بستگی دارد.

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



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.

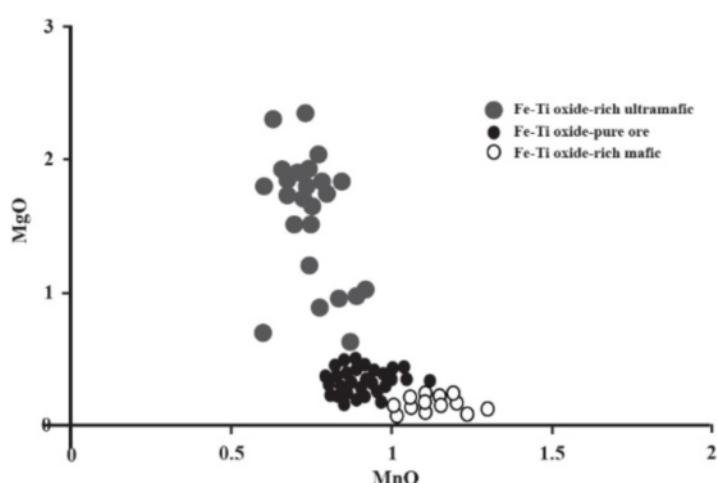


شکل ۶ تغییرات ترکیبی پیروکسن‌ها در سنگ‌های مافیک (دایردهای توپر) و فرامافیک (دایردهای توخالی) بر (الف) نمودار مثلثی Wo-En-Fs، (ب) نمودار J-Q [۲۰] و (پ) نمودار تغییرات Al نسبت به Ti [۲۱].

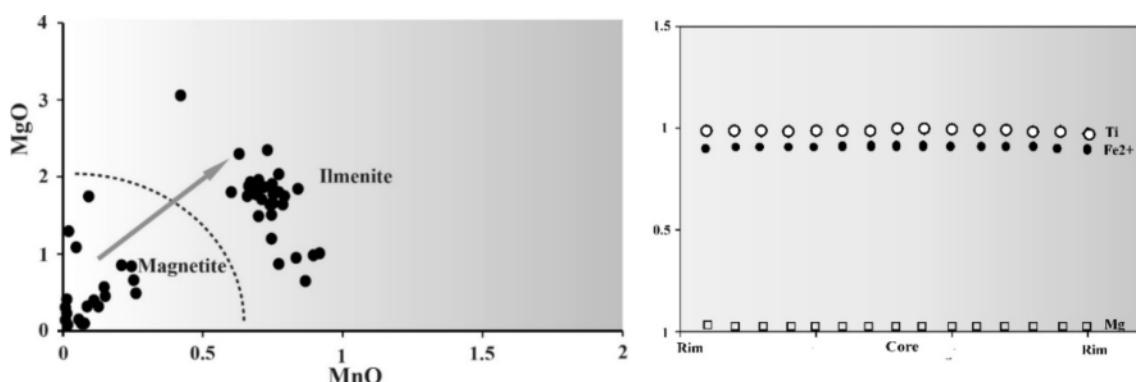
نمونه‌های اکسید Fe-Ti مافیک‌ها (~ 0.102%-0.138 %) است و هر دو کمتر از نمونه‌های فرامافیک کانه‌زایی شده (~ 0.87%-2.50) هستند (شکل ۷). اینکه مقدار MgO در فرامافیک کانه‌زایی شده بیشتر از نمونه‌های مافیک و اکسیدهای Fe-Ti خالص است نیاز به بررسی بسیار دارد و احتمالاً خاستگاه جدآگانه آنها را نشان می‌دهد. مقدار CaO در ایلمنیت‌ها معمولاً کمتر از ۰.۱٪ و مقدار SiO₂ نیز کمتر از ۰.۳٪ است. چنین بنظر می‌رسد که روند کلی این تغییرات توسط فرآیندهایی مثل تبلور بخشی و جدایش در فرامافیک‌ها 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 ماقمایی، ترکیب اولیوین و کلینوپیروکسن را متاثر 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 شان 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 ماقمایی بین مگنتیت و تیتانومگنتیت در برخی نمونه‌های ایلمنیت است، 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 بیان کننده شرایط حاکم در اتاق ماقمایی باشد.

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 (Xilm~ 0.99%-1.00) را دارد. در کانه‌های خالص اکسیدی این ترکیب حدود ~ Xilm~ 0.92%-0.95٪ در فرامافیک‌های کانه‌زایی شده (Xilm~ 0.90%-0.91٪) است. مقدار MgO ایلمنیت در فرامافیک‌های کانه‌سازی شده کمتر (0.19-2.44٪) و MnO بیشتر (MgO 0.19-0.12٪) از کانه‌های خالص اکسیدی (0-2.44٪) و بیشتر از مافیک‌هاست. مقداری همایت به صورت برون رست در ایلمنیت وجود دارد، بطوریکه مقدار آن در فرامافیک‌های کانه‌زایی شده (Xhem~ 0.00%-0.97٪) در کانه‌های خالص اکسیدی حدود 0.00%-0.089٪ و در گابروهای غیر لایه‌ای ریز دانه تقریباً 0.00٪ است. در سنگ‌های فرامافیک کانه‌زایی شده توده GKMUC مقدار TiO₂ بین ۴۶ تا ۵۷٪ 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 ماقمایی مادر بازالتی است که از آن متبلور دما و مقدار MgO شده است [۲۳]. مقدار MgO در نمونه‌های اکسید Fe-Ti تقریباً خالص (0.19%-0.48٪) که باید آنها را بعنوان باقی-MgO مانده ماقمایی مادر بازالتی فرض کرد، کمی بیشتر از



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

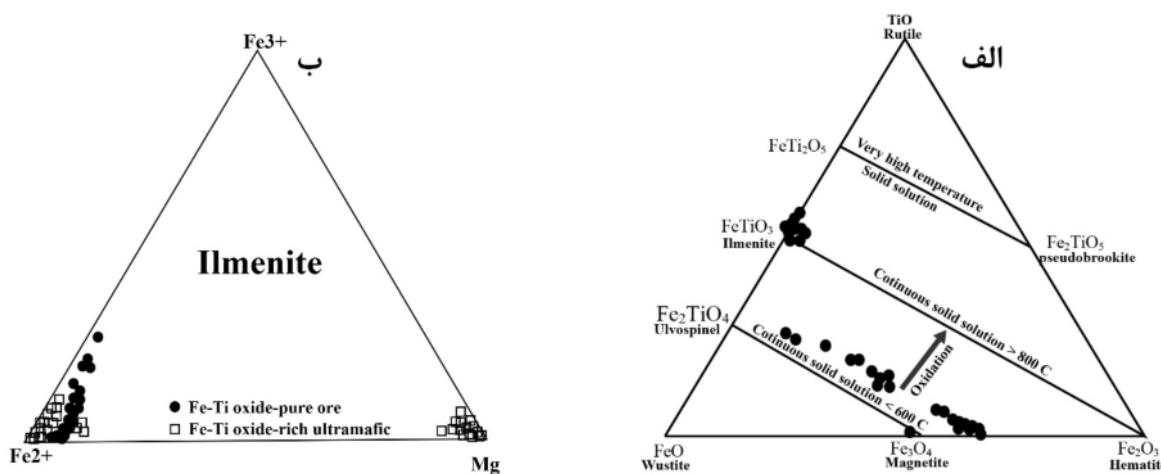


شکل ۸ (الف) نمودار نیمرخ در کانی ایلمنیت از لبه تا لبه و (ب) نمودار تغییرات MnO نسبت به MgO در ایلمنیت و مگنتیت.

در نمونه‌های خالص ایلمنیت، هم بصورت بلورهای مجزا و هم بصورت تیغه‌ای داخل بلورهای مگنتیت تبلور یافته‌اند (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 MnO و MgO) بیشتر باشد، جدایش ماقمای حامل در جهت پیکان بیشتر است. در فرامافیک‌های کانه‌زایی شده مقدار کمی اسپینل (کمتر از ۶۱٪) وجود دارد. این کانی عموماً 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 $\text{TiO}_2\text{-Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 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 ۸۰۰°C^۰ قرار گرفته‌اند. نمونه‌های مگنتیت و تیتانومگنتیت در نمودار ۹ الف در گستره بین دو سری مگنتیت-والاسپینل و ایلمنیت-هماتیت قرار دارند که نشان از محلول جامد بین این دو است. همچنین، مگنتیت‌ها روی خط اتصال $\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ و Fe_3O_4 (دیده می‌شوند، در حالیکه نزدیک به جایگاه مگنتیت (Fe_3O_4) دیده می‌شوند، در شبکه، نمونه‌های تیتانومگنتیت به دلیل داشتن مقداری Ti در شبکه، به موازات و بالای خط محلول جامد بیش از ۶۰۰°C^۰ 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، ۴۵-۳۰٪ است و در سنگ‌های فرامافیک کانه‌زایی شده ۴ تا ۱۵ درصد حجم کل را تشکیل می‌دهد. برای تعیین تجزیه شیمیایی بلورهای مگنتیت و تیتانومگنتیت حدود ۵۰ تا ۱۵۰ نقطه‌ای از لبه‌ها و مرکز 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 X_{usp} پائین (۰,۰۰۴ تا ۰,۰۲) و X_{mag} بالایی (۰,۹۷ تا ۰,۹۹ درصد) هستند. در صورتیکه مقدار تیتانومگنتیت‌های نسل اول و دوم در فرامافیک‌های کانه‌زایی شده ۰,۹۳-۰,۷۹ درصد است. مقادیر X_{mag} در مگنتیت و تیتانومگنتیت‌های تاخیری پائین (۰,۵۰ تا ۰,۴۳) 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 رگجه ای در شکستگی کانی‌های دیگر و یا در فضای بین بلوری تشکیل شده‌اند، دارای خلوص بالایی هستند (X_{mag} 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 تیتانومگنتیت، تیتانومگنتیت و مگنتیت در نمونه‌های تقریباً خالص اکسیدی Fe-Ti تا فرامافیک‌های کانه‌زایی شده در GKMUC دیده می‌شود. در فرامافیک کانه‌زایی شده عموماً ایلمنیت و مگنتیت بصورت تیغه‌های ریزی در پیروکسن‌ها و یا بصورت بلورهای مجزا حضور دارد (شکل ۴)، در حالیکه



شکل ۹ الف) نمودار سه تایی سیستم جامد $\text{TiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$ که خطوط اتصالی انحلال جامد بین کانی‌ها را نشان می‌دهد ، ب) جایگاه اکسیدهای Fe-Ti در نمودار مثلثی $\text{Fe}-\text{Mg}-\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ [۲۷، ۲۶].

از: ۱) پائین‌ترین قسمت شامل یک پهنه قاعده‌ای متشكل 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 $\text{Fe}-\text{Ti}$ پیروکسنتیت تغییر می‌کند. بخش عمده کانسار اکسید $\text{Fe}-\text{Ti}$ (۰.۲۵-۰.۳۰٪) در این سنگ‌ها وجود دارد. در این پهنه، بخش‌های سیلیکاتی از کانسارهای اکسید $\text{Fe}-\text{Ti}$ خالص (بیش از ۹۰٪) دیده می‌شود. ۳) پهنه میانی شامل گابروهای لایه‌ای متشكل از نوارهای تیره غنی از اولیوین، پیروکسن و مگنتیت و نوارهای روشن غنی از پلاژیوکلاز است. نوارها عموماً چند سانتی‌متر ضخامت دارند و چند بار تکرار شده‌اند. کانه‌زایی اکسیدهای $\text{Fe}-\text{Ti}$ 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 $\text{Fe}-\text{Ti}$ دارند. این گابروها احتمالاً طی گسترش پهنه‌های لایه‌ای اصلی و در سقف اتاق مagmaی تبلور یافته‌اند.

که پیدایش توده‌های ناهمشیب (مانند دایک‌ها، رگه‌ها) و گاهی هم‌شیب (مانند سیل‌ها) متشكل از کانسارهای اکسید $\text{Fe}-\text{Ti}$ خالص با فرضیه مایعات ناامیخته قابل توضیح است. از طرف دیگر، وجود میانبارهای کروی از اکسید $\text{Fe}-\text{Ti}$ در اولیوین و پیروکسن نشان دهنده قطرک‌های مایع به دام افتاده ناشی از ناامیختگی مایعات طی رشد کانی‌های سیلیکاته انباشتی است [۲۹]. در حالیکه برخی دیگر از پژوهشگران [۶-۲۸] وجود این

لذا در حالت کلی می‌توان گفت که در دماهای بالا به Ti مقدار بیشتری در مگنتیت جای می‌گیرد. در دماهای پائین به دلیل پائین آمدن حل پذیری، مقدار Ti در مگنتیت پائین می‌آید، بنابراین Ti در شکستگی‌ها و نقایص بلوری رها شده و بروز رستهایی مانند ایلمنیت، سنگ‌های خالص اکسید $\text{Fe}-\text{Ti}$ و فرامافیک‌های کانه‌سازی شده بخوبی دیده می‌شود. با توجه به این شکل، نمونه‌های ایلمنیت در فرامافیک‌های غنی از اکسیدهای $\text{Fe}-\text{Ti}$ دو نوع هستند: نمونه‌های با MgO بالا و نمونه‌های با MgO پائین. مشخص است که طی تبلور ماده مذاب باقیمانده در دماهای بالا (بالاتر از ۸۰۰°C) ابتدا محلول جامد کاملی بین تیتانومگنتیت و ایلمنیت تشکیل شده که با کاهش دما و پیشرفت عمل جدایش در دماهای بالاتر از ۶۰۰°C، فازهای ایلمنیت و مگنتیت به صورت تیغه‌های بروز 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 در مورد خاستگاه اکسیدهای $\text{Fe}-\text{Ti}$ مجموعه GKMUC دو نظریه را می‌توان مطرح کرد: ۱) غنی شدگی در مذاب‌های باقیمانده برآمده شده از مagmaی مادر فروبازالتی و ۲) تزریق یک سیال غنی از $\text{Fe}-\text{Ti}$ ناامیخته به داخل بخش مافیک-فرامافیک. شواهد متعددی وجود دارد که نشان می‌دهد که نظریه دوم، عامل اصلی تشکیل افق‌های غنی از اکسیدهای $\text{Fe}-\text{Ti}$ خالص در منطقه است. برخی پژوهشگران [۶-۲۸] معتقدند

مجله بلوورشناسی و کانی شناسی ایران

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

نظریه سیال‌های حل ناپذیر و نفوذ تپ‌های ماقمایی جدید از فرآیندهای مهم در دگرگونی GKMUC است، بطوریکه پس از تبلور بخش فرامافیک از ماقمای اولیه اصلی، گروههای جدیدی از ماقما به اتاق ماقمایی وارد شده و باعث گسترش اتاق ماقمایی و تشکیل سری میانی و بالای شده است. داچزن [۶] نقش مهم فرآیند ناامیختگی مایعات را تنها در مورد کانسارهای Fe-Ti رگهای خالص می‌داند و برای تشکیل کانسارهای اکسید Fe-Ti همراه با فازهای سلیکاته یعنی در سنگ‌های مافیک و فرامافیک عملکرد مجموعه‌ای از فرآیندهایی مانند جداش بلوئی، انباشت بلوئی، جداش در شرایط زیرخط انجاماد 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 تزیریق به صورت مذاب نیست، بلکه می‌تواند بیانگر نفوذ یک توده مملو از بلوئی (crystal mush) باشد. وجود لبه واکنشی متشكل 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 سلیکاته پیشتر متبلور شده طی جریان ماقمایی و دگرشکلی همزمان و پس جایگیری این سنگ‌ها هست [۱۹]. کانی‌های سلیکاته 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 سلیکات‌های فرومیزین مثل اولیوین و کلینوپیروکسن طی تبلور، پاید گریزندگی اکسیرن بالا باشد، زیرا وجود ایلمنیت

قطرکهای اکسیدی را فقط نتیجه مایعات ناآمیخته طی دگرگونی این سنگ‌ها نمی‌دانند بلکه معتقدند که این قطرک-های میانبار مانند نشان دهنده وجود سازنده‌های Fe و Ti در ماقمای اولیه این سنگ‌هاست. اکسیدهای Fe-Ti نسل سوم (حالت رگه‌ای) در GKMUC احتمالاً ناشی از ماهیت انعطاف پذیری و مهاجرت بوسیله خرزش این کانی‌ها در حالت دگرشکلی جامد دمای بالا (ناکشسان) است. در نتیجه این فرآیند در دماهای بالا این امکان بوجود می‌آید که اکسیدهای Fe-Ti بتوانند در پهنه‌های کم تنش تمرکز یابند و کانسراهای نوع رگه‌ای را در مقیاس‌های میکروسکوپی تا رگه‌های بزرگ تشکیل دهند [۱۵، ۳۰، ۳۱]. با وجود اینکه شواهد دگرشکلی ناکشسان 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 مستهلك شده باشد [۱۴، ۱۶، ۳۲]. از این رو فرض می‌شود که سیال غنی از Fe-Ti طی یک دگرشکلی ناکشسان دما بالا به داخل میزان مافیک-فرامافیک بیشتر تبلور یافته و یا نیمه متبلور نفوذ کرده است. بخشی از این سیال بصورت انباست 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 می-توان ناشی از نفوذ تپ‌های ماقمایی متعدد با درجه‌های جدایش متفاوت به داخل مخزن ماقمایی در حال تبلور در دماهای بالا در نظر گرفت [۱۹]. به عبارتی، توده نفوذی GKMUC با پر شدن‌های متوالی چندین تپ ماقمایی همراه بوده است. ماهیت لایه‌ای و وجود لایه‌های مودال تنابوی 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 پلاژیوکلازاها و تا حدی آمفیبیول‌ها شده است. بیشتر آمفیبیول‌های مورد بررسی از گروه آمفیبیول‌های نوع پارگاسیت هستند. قرار گرفتن در گستره پارگاسیت به معنی فقیر بودن از Ti است، زیرا Ti به جای ورود

های کانه‌زایی شده، هر دو فرآیند غنی شدگی از Fe-Ti در مذاب‌های باقیمانده برآمده از مagma مادر بازالتی و تزریق یک سیال غنی از Fe-Ti ناامیخته 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 gabbronorites) associated with massif anorthosites", Economic Geology 96(2001) 797–815.
- [6] Duchesne J.C., "Fe-Ti deposits in Rogaland (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., Lesher 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 غالباً با گریزندگی بالای اکسیژن همچومنی 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 magma اولیه غنی در Fe و Ti یعنی بیانگر magma فربازالتی و نه یک magma تولیتی است. در تولیت‌ها، غنی شدگی از SiO_2 و Fe-Ti در دوره‌های حدواسط رخ می‌دهد و فراورده‌های بعدی و نهایی از این اجزاء غنی نیستند. در صورتیکه magma فربازالتی در اثر جدایش بلوری می‌تواند فراورده‌های کانه‌زایی شده غنی از Fe-Ti تولید کند. در منطقه مورد بررسی، magma فربازالتی با ردیف تبلور اولبیون+ کلینوپیروکسن ± ارتوبیروکسن+ پلاژیوکلاز باعث تشکیل انواع سنگ‌های مجموعه GKMUC با یا بدون کانه‌زایی اکسید-Fe-Ti در افق magma شده است.

در مجموع می‌توان چنین نتیجه گرفت که هر دو فرآیند جدایش از یک magma فربازالتی و فرآیند تشکیل سیال‌های ناامیخته غنی از اکسیدهای Fe-Ti می‌توانند در تشکیل سنگ‌های مافیک-فرامافیک غنی از اکسید Fe-Ti و بخش‌های Fe-Ti خالص اکسیدی Fe-Ti مجموعه GKMUC دخیل باشند. بطوريکه در نتیجه آمیختگی magma فربازالتی با یک سیال آهن-تیتان‌دار و ناامیخته بخش کانه‌زایی ناخالص بوجود آمده و تبلور بخش ناامیخته 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 لایه‌ای آنورتوزیت و پگماتیت گابروهایست. 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 magma مادر فربازالتی 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 ferrobasaltic Sept Iles layered intrusion, Canada*”, Jurnal 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*