

ژئوترمومتری و فوگاسیته اکسیژن کانی‌های اکسیدی آهن-تیتانیوم در آنومالی درگز، جنوب شرق کهنوج

بهروز کریمی شهرکی؛ مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران،

مجید قاسمی سیانی*؛ دانشگاه خوارزمی تهران، دانشکده علوم زمین، گروه ژئوشیمی،

کاظم قلی‌زاده؛ مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران

پذیرش ۹۷/۰۴/۲۵

دریافت ۹۶/۱۱/۰۳

چکیده

در جنوب شرق ایران، کانسارهای مگنتیت حاوی تیتان و وانادیوم همراه با سنگ‌های گابرو در کمپلکس افیولیتی کهنوج رخ داده است. پژوهش‌های کانه‌نگاری آشکار کرد که کانه‌های اولیه و ثانویه کانسنگ شامل تیتانومگنتیت، ایلمنیت، هماتیت، گوتیت، مارتیت، پیریت، کالکوپیریت، پیروتیت و کانی‌های سیلیکاته (پلاژیوکلاز، پیروکسن، هورنبلند، الیون، فلدسپار آلکالن) است. بافت‌های داربستی-سندوییچی و هم‌رشدی‌های ایلمنیت-تیتانومگنتیت در نتیجه اکسیداسیون مگنتیت غنی از تیتانیوم اولیه در دماهای مختلف تشکیل شده است. تجزیه شیمیایی نقطه‌ای نشان داد که ایلمنیت و تیتانومگنتیت به ترتیب دارای ۴۶/۵۱ تا ۵۲/۶۸ و ۴/۰۰ تا ۱۹/۷۱ درصد وزنی اکسید تیتانیوم و ۱/۰۰ تا ۲/۹۸ و ۰/۰۰ تا ۱/۷۴ درصد وزنی اکسید وانادیوم است. مقدار مول اولواسپینل (Fe_2TiO_4) در تیتانومگنتیت در محدوده ۴/۵۸ تا ۵۶/۸۹ درصد وزنی و تیغه‌های ایلمنیت دارای ضخامت‌های مختلف است و مقدار مول ایلمنیت در ترکیب ایلمنیت نوع یک، دو و سه به ترتیب برابر ۸۸/۲۳ تا ۹۳/۹۴، ۹۳/۰۴ تا ۹۹/۸۰ و ۹۹/۰۹ تا ۹۹/۹۳ درصد است. ترکیب جفت کانی تیتانومگنتیت و ایلمنیت هم‌رشد با هم (تیپ دوم) در نمودار دما/فوگاسیته اکسیژن نشان داده شده است. جفت کانی‌های تیتانومگنتیت و ایلمنیت محدوده دمای سرد شدن بین ۵۵۱ تا ۸۳۰ درجه سانتی‌گراد و فوگاسیته اکسیژن بین ۲۱/۶۱- تا ۲۳/۹۷- را نشان می‌دهند. جفت کانی‌های تیتانومگنتیت و ایلمنیت کانسار درگز در اطراف منحنی بافر کوارتز-فیالیلت-مگنتیت برای فشارهای کمتر از ۱/۵ کیلو بار پراکنده می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: کمپلکس افیولیتی کهنوج، آنومالی درگز، اکسیدهای آهن-تیتان، ژئوترمومتری، فوگاسیته اکسیژن.

مقدمه

ذخایر تیتانیوم کهنوج در ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان کهنوج در داخل توده عظیم گابرویی متعلق به مجموعه افیولیتی کهنوج واقع شده است (شکل ۱). این منطقه از شمال به بلوک لوت، از غرب و شمال غرب به زون سندج-سیرجان، از شرق به حوزه جازموریان و از جنوب به زون مکران محدود می‌شود. اولین بار تیتانیوم در ناحیه کهنوج در سال ۱۳۶۵ به وسیله سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، کشف شد. این بررسی‌ها نشان داد که تیتانیوم در منطقه به صورت کانی‌سازی در سنگ مادر گابروئیدی و همچنین به صورت پلاسری در رسوبات مخروطه‌افکنه اطراف تشکیل شده است. کانی‌سازی درگز یکی از آنومالی‌های شناخته شده ناحیه معدنی کهنوج است. تاکنون پژوهش‌های متعددی بر توالی افیولیتی کهنوج و کانی‌سازی ایلمنیت-مگنتیت انجام شده است [۱]، [۲]، [۳]، [۴]، [۵]، [۶]، [۷]. در کانسارهای Fe-Ti، کانه‌های

*نویسنده مسئول majid4225@yahoo.com

مگنتیت و مگنتیت غنی از تیتانیوم (تیتانومگنتیت) و یا محلول جامد بین مگنتیت (Fe_3O_4) و اولواسپینل (Fe_2TiO_4) و هم‌چنین محلول جامد بین ایلمنیت و هماتیت (تیتانوهماتیت) معمول هستند. تخمین دما و فوگاسیته اکسیژن ($T\text{-}f\text{O}_2$) بر اساس شیمی کانی‌های اکسیدی Fe-Ti میسر است [۸]، [۹]، [۱۰]. تخمین دما و فشار بر اساس شیمی کانی‌های سیلیکاته کمپلکس افیولیتی کهنوج به‌وسیله کنعانیان انجام شده است [۱۱]. هدف از این پژوهش تخمین دما و فوگاسیته اکسیژن بر اساس شیمی کانی‌های اکسیدی آهن و تیتانیوم در سنگ‌های گابرویی میزبان کانی‌سازی اکسیدی در کانی‌سازی ایلمنیت-مگنتیت آنومالی درگز و مقایسه نتایج با نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌های کنعانیان [۱۱] است.

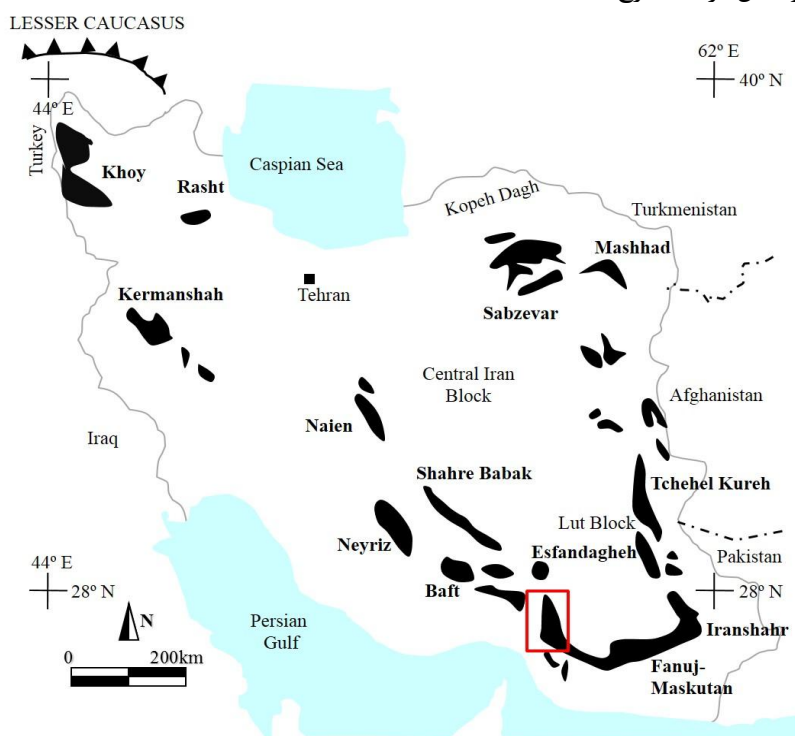
زمین‌شناسی

محدوده بررسی شده بخشی از کمپلکس بند زیارت است که از دیدگاه تقسیمات زمین‌شناسی ایران این کمپلکس در منتهی‌الیه جنوب‌شرقی زون سنندج-سیرجان [۱۱] یا مریوان-منوجان [۱۲] قرار دارد. کمپلکس بند زیارت جزئی از یک فرازمین بزرگی است که طول آن در حدود ۸۰ کیلومتر و پهنای آن حدود ۲۰ کیلومتر است. این فرازمین بین دو گسل عمده قرار می‌گیرد که عبارتند از: ۱. گسل سبزوآران که در بخش غربی این فرازمین قرار دارد و مجموعه افیولیتی بند زیارت را در کنار مجموعه دگرگونی پالئوزوئیک زون سنندج-سیرجان قرار داده و ۲. گسل جیرفت که حد شرقی فرازمین مذکور است و مجموعه بند زیارت را در کناره غربی هامون قرار داده است [۲]. واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده بررسی شده شامل شامل طیف وسیعی از سنگ‌های آذرین با ترکیب‌های بازیک تا اسیدی هستند. این سنگ‌ها شامل گابروهای دانه درشت و دانه‌ریز، میکروگابرو، دایک‌های دیابازی، گرانیت، دایک‌های آپلیتی، رگه-رگچه‌های پلاژیوگرانیتی و ملاگابرو است که بازه سنی آن‌ها مربوط به اواخر مزوزوئیک تا اوایل ترشیری است.

امتداد عمومی مجموعه افیولیتی بند زیارت N-S تا NE-SW است. در این فرازمین مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین خروجی و نفوذی دیده می‌شود که طبق نظر کارشناسان شرکت پاراگون [۱۳] جزئی از یک مجموعه کامل‌تر افیولیتی است (شکل ۲). زمین‌شناسان شرکت پاراگون در این کمپلکس سه مجموعه متمایز از هم را جدا کرده‌اند که شامل: ۱. کمپلکس بند زیارت متشکل از گابروهای مختلف، دایک‌های دیابازی، دیوریت، ترونجمیت و کمی دونیت و پریدوتیت هورنبلنددار، ۲. مجموعه دایک‌های دیابازی که متشکل از دیاباز، دایک‌های ورقی، ترونجمیت، تونالیت، ریوداسیت و دیوریت و ۳. کمپلکس دره انار متشکل از گدازه‌های بالشی، آهک پلاژیک، چرت، رسوبات ماسه‌سنگی و مقادیر کمی توده‌های نفوذی است. به عقیده زمین‌شناسان شرکت پاراگون سه مجموعه ذکر شده بخش بالایی یک مجموعه کامل افیولیتی هستند که واحد دره انار بخش خروجی و واحد دایک‌های دیابازی تغذیه کننده گدازه‌های بالشی (واحد دره انار) و گابروهای کمپلکس بند زیارت نمایانگر بخش نفوذی هستند.

آنومالی درگز بخشی از ناحیه معدنی کهنوج در بخش مرکزی کمپلکس بند زیارت است و متشکل از واحدهای سنگی فرو گابرو تا پیروکسن-هورنبلند گابروی دانه‌درشت، پیروکسن-هورنبلند گابرو تا اولیون گابروی دانه‌ریز، هورنبلند گابروی دانه‌ریز، فلدسپاتیک ورلیت، دایک‌های دیابازی و آپلیتی و مجموعه سنگ‌های گرانیتوئیدی است (شکل ۳). پلاژیوکلاز، پیروکسن، هورنبلند و الیون همراه با مگنتیت و ایلمنیت مهم‌ترین کانی‌های تشکیل‌دهنده نمونه‌ها هستند. کانی‌های حاصل از دگرسانی همراه با کانه‌های سولفیدی مثل پیریت و کالکوپیریت دیگر کانی‌های تشکیل‌دهنده نمونه‌ها هستند. پلاژیوکلاز،

الیوین و پیروکسن به‌عنوان فازهای انباشته‌ای^۱ و هورنبلند همراه با ایلمنیت-مگنتیت به‌عنوان فازهای میان‌انباشته‌ای^۲ تشکیل شده‌اند. در واحد فلدسپاتیک ورلیت بلورهای درشت الیوین و پیروکسن به‌عنوان فازهای انباشتی تشکیل شده است. از دیدگاه کانی‌سازی تیتانیوم در واحدهای مختلف تفاوت‌هایی وجود دارد، به‌طوری‌که واحد فروگابروی درشت‌بلور تا پیروکسن-هورنبلند گابروی درشت‌بلور بیش‌ترین مقدار کانی‌سازی فلزی را داشته و واحد فلدسپاتیک ورلیت همراه با دایک‌های دیابازی تأخیری دارای کم‌ترین مقدار کانی‌سازی فلزی هستند. پتروگرافی و ژئوشیمی واحدهای الترامافیک و مافیک در محدوده آنومالی درگز به‌طور کامل در [۷] شرح داده شده است.



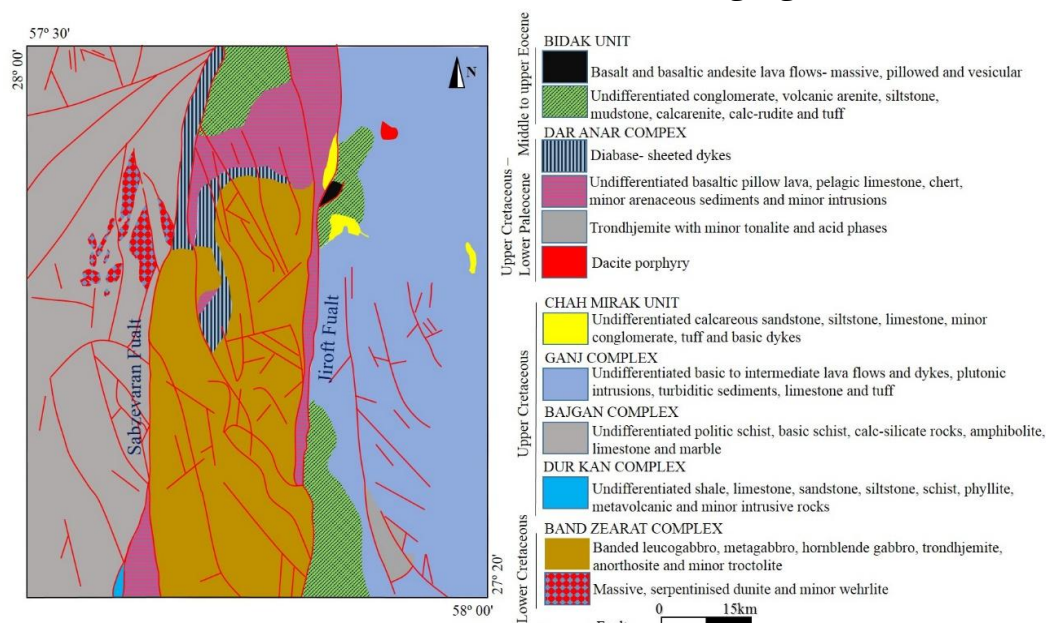
شکل ۱. نقشه پراکندگی افیولیت‌های ایران را نشان داده است [۵]. موقعیت افیولیت کهنوج (مجموعه افیولیتی بند زیارت - دره‌انار) در جنوب کرمان (با کادر قرمز رنگ) نشان داده شده است. مجموعه افیولیت‌های مهم ایران در شکل نام‌گذاری شده است.

روش انجام پژوهش

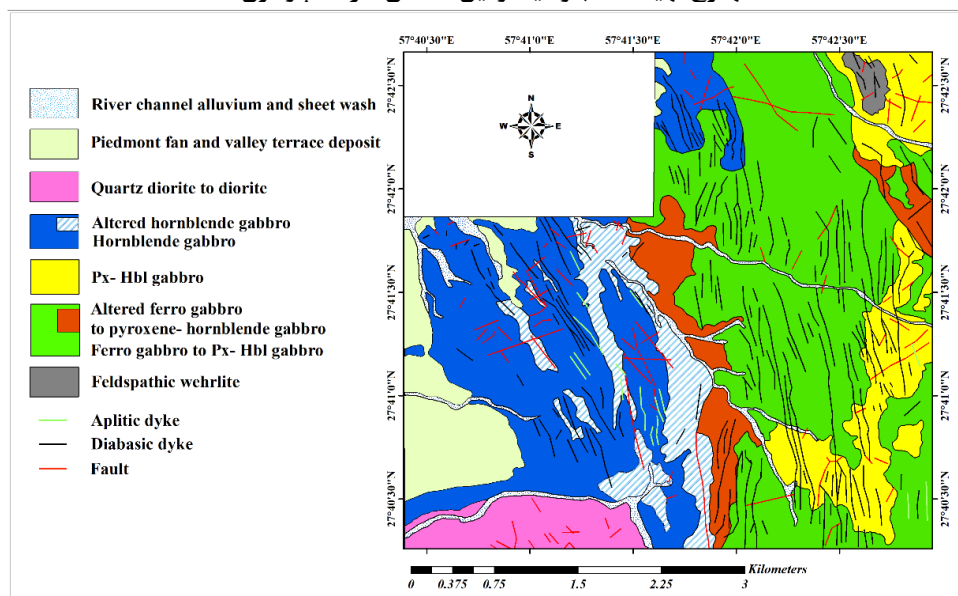
تعداد ۵۰ مقطع نازک-صیقلی و نازک از واحدهای سنگی مختلف در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران با میکروسکوپ نور عبوری-بازتابی زایس مدل Axioplan 2 بررسی شد. این پژوهش به‌منظور بررسی روابط بافتی و کانی‌شناسی اکسیدی آنومالی ایلمنیت-مگنتیت درگز، انجام شد. بررسی‌های تکمیلی به‌منظور دست‌یابی به شرایط دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن، روی زوج کانی‌های اکسیدی مگنتیت-ایلمنیت با استفاده از دستگاه تجزیه ریزکاو الکترونی (EPMA^۳) در همان مرکز انجام شد. این پژوهش‌ها با دستگاه میکروپروب مدل CAMECA SX 100 با شرایط ۲۰ کیلوولت و ۲۰ نانو آمپر و با قطر اشعه یک میکرون (برای تیغه‌های ایلمنیت و اذخالی‌های کانی‌های اکسیدی) تا پنج میکرون (برای کانی‌های مگنتیت و ایلمنیت منفرد)، بررسی شده‌اند. تعداد ۵ مقطع صیقلی از سنگ میزبان کانی‌سازی آهن و تیتان تهیه شد و در مجموع تعداد ۱۱۸ تجزیه نقطه‌ای انجام شده است. نقشه‌های عنصری برای تغییرات عناصر تیتانیوم و آهن و عناصر همراه از جمله منگنز

1. Cumulus
2. Intercumulus
3. Electron Probe Micro-Analyzer

در کانی‌های بررسی شده تهیه شد. لپیدج^۱ برای به‌دست آوردن دما و فوگاسیته اکسیژن از نرم‌افزار ILMAT استفاده کرده است [۱۴]. محاسبه Fe^{3+}/Fe^{2+} و تصحیحات آهن کل با استفاده از [۱۵] و محاسبه مقدار مولی عناصر و همچنین دما و فوگاسیته اکسیژن با استفاده از چهار مدل مختلف [۱۶]، [۱۷]، [۱۸]، [۱۵] با استفاده از نرم‌افزار ILMAT نسخه ۱/۲ [۱۴] انجام شده است. همچنین از نرم‌افزار تصویری UTHSCSA نسخه ۲/۰۱ [۱۹] برای محاسبه درصد مقدار ایلمنیت و مگنتیت در تصاویر الکترون‌های برگشتی کانی‌ها (BSE^۲) استفاده شده است.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ناحیه‌ای کمپلکس افیولیتی بندزیارت-دره‌انار در مرکز که به‌وسیله گسل جیرفت از بلوک گنج و گسل سبزوآران از بلوک باجگان جدا شده است (با تغییرات از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ ورقه‌های قلعه منوجان و کهنوج تهیه شده به‌وسیله زمین‌شناسان شرکت پاراگون)



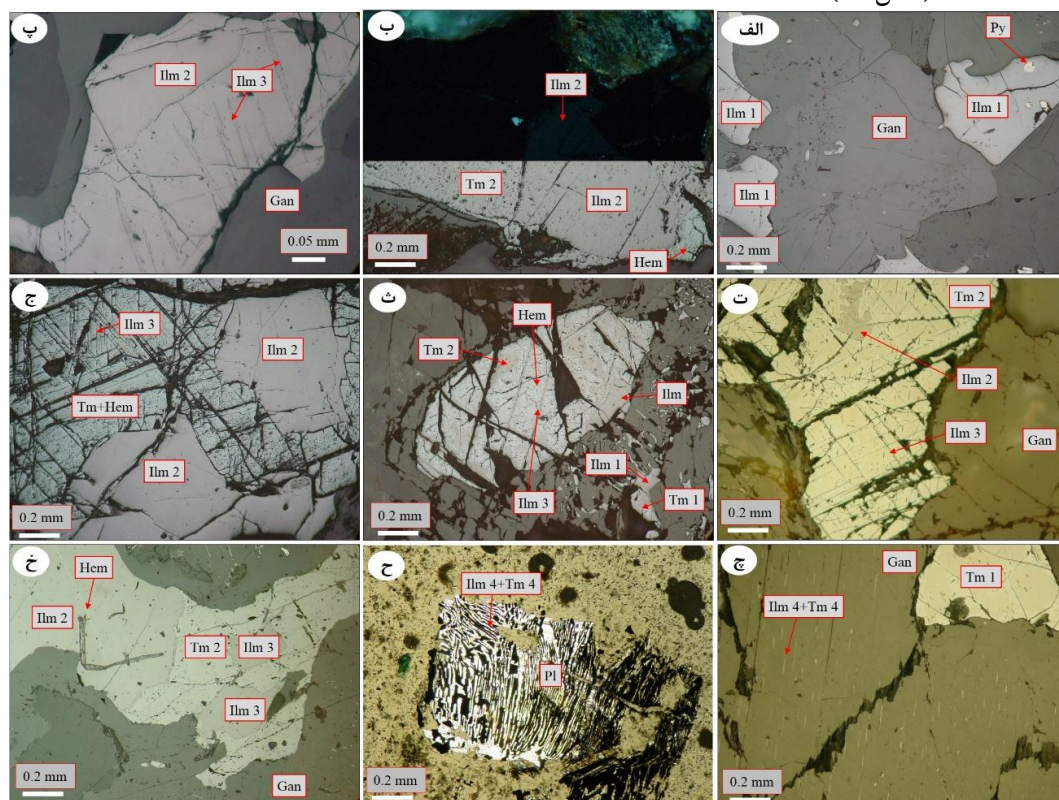
شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی تهیه شده از آنومالی درگز با مقیاس ۱/۵۰۰۰

1. Lepage
2. Back-Scattered Electron

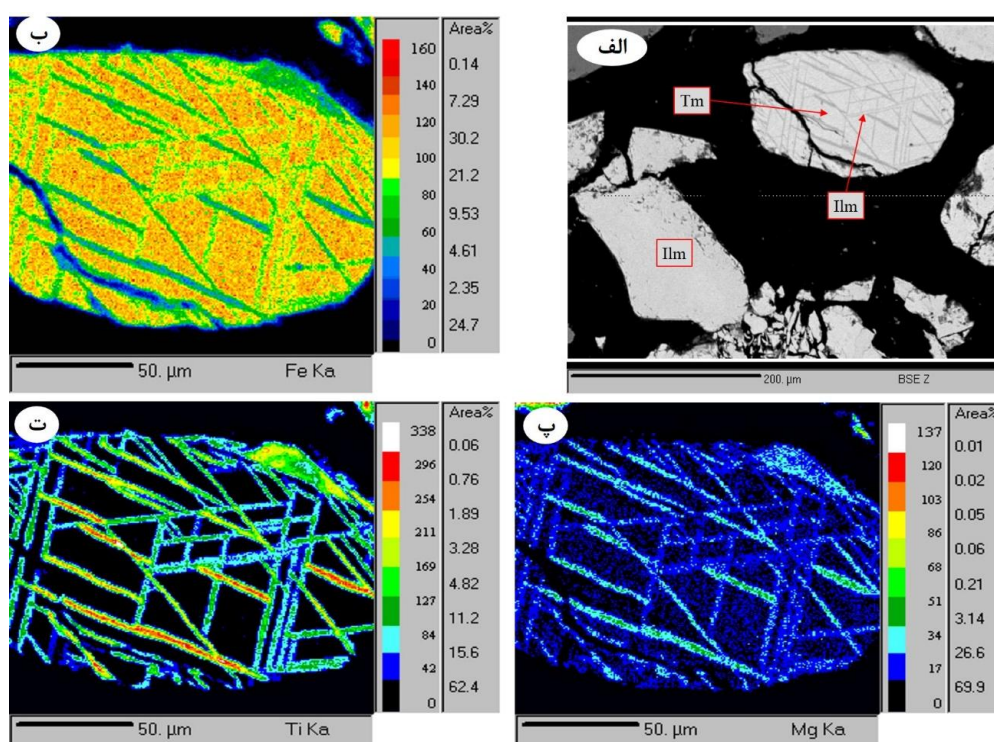
پتروگرافی

در کانسار تیتانیوم کهنوج کانه‌زایی اکسید آهن و تیتانیوم با ماهیت سین‌ژنتیک و بافت دانه پراکنده در میزبان سنگ‌های گابروئیدی، الترامافیک و دایک‌های دیابازی رخ داده است. در بخش‌های مختلف کانسار، اکسیدها اصلی‌ترین کانه‌های فلزی است و تا ۲۲ درصد حجم کانسنگ را تشکیل داده‌اند. بیش‌ترین کانه‌زایی اکسیدی و سولفیدی در سنگ فروگابرو تا پیروکسن-هورنبلند گابروی دانه‌درشت با فراوانی ۲۰ تا ۲۲ درصد و کم‌ترین مقدار آن در دایک‌های دیابازی تاخیری با فراوانی ۱ تا ۲ درصد است. کانی‌شناسی کانسنگ ساده است و غالباً شامل اکسیدهای ایلمنیت، تیتانومگنتیت، هماتیت، مارتیت و گوتیت و سولفیدهای پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت است. هیچ‌گونه هم‌بستگی مشخصی بین کانی‌سازی اکسیدی و سولفیدی وجود ندارد، ولی آن‌چه که در بررسی‌های میکروسکوپی مشاهده می‌شود، در فروگابرو تا پیروکسن-هورنبلند گابروی دانه‌درشت که مقدار ایلمنیت و مگنتیت بیش‌تری دارند، مقدار سولفید نیز بیش‌تر است. کانی‌سازی اکسیدی تیتانیوم-آهن در آنومالی درگز به چهار نوع دیده می‌شود: ۱. متشکل از کانی‌سازی مستقل بلورهای ایلمنیت و تیتانومگنتیت است. این بلورها با شکل‌های نامنظم تا نیمه‌شکل‌دار و در مواردی خوش‌وجه دارای ابعاد ریز تا متوسط بلور (کم‌تر از ۰/۲ میلی‌متر) تا درشت (۲ تا ۳ میلی‌متر) دیده می‌شوند. بلورهای تک کانیایی ایلمنیت و تیتانومگنتیت اغلب با ادخال‌های پیریت همراه هستند (شکل ۴ آ). بلورهای ایلمنیت دارای انیزوتروپی بسیار قوی هستند و همین ویژگی باعث تفکیک آن‌ها از بلورهای مگنتیت می‌شود. ۲. شامل کانی‌سازی درهم‌رشدی میان ایلمنیت و تیتانومگنتیت است (شکل ۴ ب). مرز بین ایلمنیت و تیتانومگنتیت در بیش‌تر موارد مشخص و صاف است و در برخی موارد مرزهای انحنا دار نیز مشاهده شده است (شکل ۴ پ). این دو نوع رخداد کانی‌سازی به‌صورت میان‌انباشتی تشکیل شده و به‌وسیلهٔ سیلیکات‌های انباشتی به‌ویژه پلاژیوکلاز و پیروکسن محصور شده‌اند. از لحاظ بافتی و روابط با سولفیدها شبیه به هم هستند که نشان می‌دهد با سولفیدها هم‌زمان هستند. ۳. کانی‌سازی به‌صورت تیغه‌های ایلمنیت (در مواردی بلورهای بی‌شکل ایلمنیت) در تیتانومگنتیت تشکیل شده است (شکل ۴ پ). تیغه‌های ایلمنیت در امتداد سطوح بلورشناسی ۱۱۱ و ۱۰۰ در میزبان تیتانومگنتیت مشاهده شده که در نتیجه اکسلوشن ترکیبات اولواسپینل از محلول جامد مگنتیت غنی از تیتانیوم در دمای بالا (تیتانومگنتیت) تشکیل شده [۲۰] و برای ژئوترومتری مناسب هستند (شکل ۴ پ و ت). در نوع دوم و سوم کانه‌زایی، شبکه‌هایی از مگنتیت-ایلمنیت به‌صورت تیغه‌ای مشاهده شده که احتمالاً در اثر اکسیداسیون بسیار سریع محلول جامد اولیه تشکیل شده‌اند و بلورهایی با ترکیب ایلمنیت در حاشیه‌های خارجی با مرز بسیار مشخص در تجمعات ایلمنیت-مگنتیت (تیتانومگنتیت) تشکیل شده است (شکل ۴ ث و شکل ۵ آ). تیغه‌های فراوان ایلمنیت در تیتانومگنتیت در اثر اکسیداسیون دوتریک مگنتیت غنی از تیتانیوم اولیه تشکیل شده که به بافت حاصل از این شبکه‌های ایلمنیت-مگنتیت (تیتانومگنتیت) بافت داربستی و ساندویچی گفته می‌شود [۲۰] و دارای ضخامت‌های متفاوت از تیغه‌های نازک تا ضخیم‌تر هستند (شکل ۴ پ، ت و ج) [۲۰]. نقشه‌های عنصری تیغه‌های ایلمنیتی در تیتانومگنتیت، تغییرات عناصر آهن، تیتانیوم و منیزیم را نشان می‌دهد (شکل ۵ الف تا ت). مقدار منیزیم با تیتانیوم هم‌بستگی مستقیم داشته و در تیغه‌های ایلمنیتی مقدار بیش‌تری را نشان می‌دهد. بافت مارتیتی در غالب بلورهای تیتانومگنتیت رخ داده و شدت آن در بعضی از بلورها به‌حدی است که غالب بلور به هماتیت تبدیل شده و تیغه‌های ایلمنیت در آن باقی مانده است (شکل ۴ ج). مارتیتی شدن در سطح (۱۱۱) تیتانومگنتیت رخ داده و نشان‌دهندهٔ اکسیداسیون دما پایین و افزایش فوگاسیته اکسیژن به‌ویژه در قسمت‌های سطحی کانسار است. ۴. کانی‌سازی اکسیدی به‌صورت بلورهای میله‌ای و غیرمیله‌ای تخت کانی‌های اکسیدی در بلورهای سیلیکاته به‌خصوص پلاژیوکلاز و پیروکسن و به مقدار خیلی کم در هورنبلند مشاهده می‌شوند. جهت‌یافتگی این بلورها در یک سطح بلوری (۰۱۰) دیده

می‌شود و انواع غیرمیله‌ای آن در مرکز بلورهای سیلیکاته مشاهده شده و انواع میله‌ای آن نیز بافتی شبیه به بافت میرمیکیتی در بلورها ایجاد کرده است (شکل ۴ چ و ح). این کانی‌های غیرمیله‌ای و میله‌ای به‌نوعی ناحیه و مرز رشد بلورهای سیلیکاته انباشتی را ترسیم می‌کند. بررسی‌های میکروسکوپی و تجزیه ریزکاو الکترونی نشان داد که این نوع کانی‌سازی بیش‌تر تیتانومگنتیت و به مقدار کم‌تر ایلمنیت هستند. رخدادهای شبیه به این نوع کانی‌سازی از چندین گابرو در سرتاسر جهان گزارش شده است (مراجعه شود به [۲۱] و [۲۲]). در بیش‌تر بلورهای ایلمنیت اثری از اکسلوشن تیغه‌های هماتیت دیده نمی‌شود و ترکیب ایلمنیت نزدیک به ترکیب خالص آن است. این شواهد نشان می‌دهد که ایلمنیت تشکیل شده، باعث تهی شدن Fe^{3+} شده و هماتیت تشکیل نشده است. با این حال، در برخی از بلورهای ایلمنیت، تیغه‌های هماتیت مشاهده شده (شکل ۴ خ)، که نشان می‌دهد اکسلوشن‌های تیغه‌ای هماتیت در مرحله‌ی نهایی سردشدن و فوگاسیته بالای اکسیژن در ایلمنیت تشکیل شده است. ادخال‌هایی از کانی‌های سولفیدی گرد شده (به‌ویژه پیریت و پروتیت) در کانی‌های اکسیدی مشاهده شده است (شکل ۴ آ).



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی نور عبوری و بازتابی از کانه‌زایی اکسیدی در اندیس درگز. (آ) کانه‌زایی تک کانیایی ایلمنیت که حاوی ادخال‌هایی از پیریت است (با نور PPL)، (ب) ایلمنیت و تیتانومگنتیت با مرز مشخص و مستقیم در کنار هم دیده می‌شود، ایلمنیت دارای اینزوتروپی قوی است که از مگنتیت تشخیص داده می‌شود (با نور PPL در پایین و XPL در بالا)، (پ) ایلمنیت و تیتانومگنتیت با مرز منحنی همراه با تیغه‌های ایلمنیت نازک و ضخیم‌تر در تیتانومگنتیت (با نور PPL)، (ت) بافت داربستی حاصل از تیغه‌های ایلمنیت در تیتانومگنتیت (با نور PPL)، (ث) تیتانومگنتیت مارتیتی شده با تیغه‌های ایلمنیت که در بخش خارجی آن ایلمنیت تشکیل شده است (با نور PPL)، (ج) تیتانومگنتیت کاملاً به هماتیت تبدیل شده و تیغه‌های ایلمنیت باقیمانده بافت داربستی را ایجاد کرده است (با نور PPL)، (چ) تیغه‌های ایلمنیت و تیتانومگنتیت در میزبان سیلیکاته که در یک جهت (۰۱۰) تشکیل شده‌اند (با نور PPL)، (ح) بافت شبیه به میرمیکیتی حاصل از تشکیل کانی‌های اکسیدی در میزبان سیلیکاته پلاژیوکلاز (نور عبوری با نور PPL)، (خ) تیغه‌های هماتیت که در برخی از بلورهای ایلمنیت تشکیل شده‌اند (با نور PPL). علامت اختصاری کانی‌ها بر اساس [۲۳] است: ایلمنیت (Ilm)، تیتانومگنتیت (Tm)، پیریت (Py)، گانگ (Gan)، هماتیت (Hem) و پلاژیوکلاز (PL).

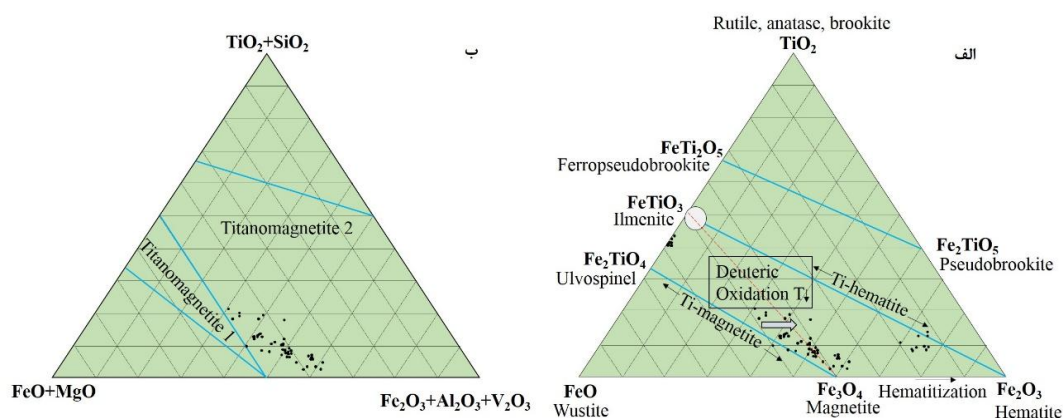


شکل ۵. نقشه عنصری تغییرات عناصر آهن، تیتانیوم و منیزیم را در بلور تیتانومگنتیت با تیغه‌های ایلمنیت نشان داده است. تیغه‌های ایلمنیت دارای مقدار زیاد تیتان و مقدار تیتان در تیتانومگنتیت کم‌تر و مقدار آهن آن زیاد است. منیزیم نیز رابطه مستقیمی با مقدار تیتان دارد. علامت اختصاری کانی‌ها همانند شکل ۴ است.

شیمی کانه‌های اکسیدی

تعداد ۲۰ نمونه انتخابی از تجزیه نقطه‌ای ایلمنیت و تعداد ۲۰ نقطه تجزیه از مگنتیت (تیتانومگنتیت) به ترتیب در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی هماتیت نیز در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار مول اولواسپینل (Fe_2TiO_4) در ترکیب تیتانومگنتیت نوع یک و دو به ترتیب برابر $4/58$ تا $16/72$ و $27/86$ تا $56/87$ درصد است. مقادیر اکسیدهای NiO و MgO ، Cr_2O_3 در ترکیب تیتانومگنتیت کم‌تر از یک درصد است (جدول ۱). مقدار مول ایلمنیت در ترکیب ایلمنیت انواع یک، دو و سه به ترتیب برابر $88/23$ تا $93/94$ ، $93/04$ تا $99/80$ و $99/09$ تا $99/93$ درصد وزنی متغیر است. ترکیب ایلمنیت نیز مانند تیتانومگنتیت دارای مقادیر کم‌تر از یک درصد برای اکسیدهای NiO و MgO ، Cr_2O_3 است، در حالی که مقدار اکسید وانادیم بیش‌تر است و تا $2/98$ نیز می‌رسد. مقدار تیتانیوم از ایلمنیت نوع یک تا سه و مقدار آن در تیتانومگنتیت نوع دو نسبت به نوع یک بیش‌تر است. مقدار اکسید تیتانیوم از $4/00$ تا $6/57$ درصد وزنی متغیر است و در تیتانومگنتیت نوع دوم برابر $9/72$ تا $19/71$ درصد وزنی متغیر است. تیتانومگنتیت نوع دو نسبت به نوع یک، شدت مارتیتی-شدن بیش‌تری داشته و نشان از شرایط اکسیدان بیش‌تری دارد و هم‌چنین تیتانیوم بیش‌تری دارند. مقدار تیتانیوم ایلمنیت نیز از نوع یک تا سه افزایش نشان داده است. این ویژگی نشان می‌دهد که با افزایش فوگاسیته اکسیژن مقدار ایلمنیت افزایش و از طرف دیگر مقدار Fe^{2+} کاهش و بر مقدار Fe^{3+} افزوده می‌شود که مطابق با شرایط اکسیدان و مارتیتی‌شدن بیش‌تر کانی‌های اکسیدی تیتانومگنتیت است. مقدار اکسید آلومینیوم در نمونه‌های بررسی شده کم است که نشان می‌دهد اسپینل کمی در نمونه‌ها تشکیل شده است. ترکیب کانی‌های اکسیدی در نمودار $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (شکل ۶ آ) نشان

می‌دهد که نمونه‌های بررسی شده در محدوده خط مگنتیت-اولواسپینل با تمایل به خط مگنتیت-ایلمنیت قرار گرفته که در اثر دگرسانی و افزایش شرایط اکسیداسیون مگنتیت-اولواسپینل به ایلمنیت-هماتیت در اثر اکسیداسیون دوتریک رخ داده است [۲۴]. هماتیت مارتیتی در اثر مارتیتی‌شدن کانی‌های تیتانومگنتیت تشکیل شده که نشان‌دهنده آخرین مراحل اکسیداسیون است و با کاهش دما و افزایش فوگاسیته اکسیژن رخ می‌دهد [۲۵]. تیغه‌های هماتیت مشاهده شده در ایلمنیت در بخش پتروگرافی نیز گویای همین شرایط است. قرار گرفتن برخی از نمونه‌ها نزدیک به خط ایلمنیت-هماتیت (تیتانوهاماتیت) نشان‌دهنده وجود تیغه‌های هماتیتی در ایلمنیت است. برخی از ایلمنیت‌ها (نوع یک) دارای مقدار کم‌تر تیتانیوم در ترکیب خود هستند و از محدوده ایلمنیت با ترکیب ایده‌آل فاصله گرفته‌اند که نشان می‌دهد در ترکیب خود مقدار FeO بیش‌تر و نزدیک‌شدن به ترکیب اولواسپینل را دارند. احتمالاً اولواسپینل در اثر اکسیداسیون به ایلمنیت تبدیل شده است که همراه مارتیت و تیتانومگنتیت اکسید شده دیده می‌شوند. برای تعیین نوع تیتانومگنتیت‌های بررسی شده از نمودار شکل ۶ ب استفاده شده است [۲۶]. بر اساس این نمودار، تیتانومگنتیت‌های منطقه درگز کهنوج، از نوع دوم هستند و نشان‌دهنده مرحله نهایی اکسیداسیون است.



شکل ۶ آ) ترکیب کانی‌های اکسیدی در نمودار مثلثی $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ [۲۴] که نشان می‌دهد بیش‌تر کانی‌های اکسیدی در امتداد خط محلول جامد مگنتیت-اولواسپینل (تیتانومگنتیت) و خط مگنتیت-ایلمنیت در اثر اکسیداسیون دوتریک قرار دارند، ب) تیتانومگنتیت‌های منطقه درگز از نوع تیتانومگنتیت‌های نوع دوم هستند.

جدول ۱. نتایج انتخابی تعداد ۲۰ تجزیه ریزکاو الکترونی تیتانومگنتیت. مقدار مول اولواسپینل (Usp) با استفاده از [۱۶] محاسبه شده است. محاسبات براساس تعداد ۴ اتم اکسیژن است.

Type	Type 1					Type 2				
SiO ₂	۰/۰۱	۱/۲۹	۱/۲۴	۰/۰۱	۱/۲۰	۰/۰۸	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۱۸	۱/۱۲
TiO ₂	۴/۰۰	۴/۴۴	۵/۹۳	۶/۵۷	۲/۲۴	۶/۱۷	۱۷/۹۵	۱۹/۷۱	۱۸/۷۸	۱۸/۹۱
Al ₂ O ₃	۰/۸۷	۱/۰۸	۰/۸۳	۱/۱۱	۰/۱۷	۱/۶۷	۴/۵۹	۱/۰۵	۰/۴۳	۱/۰۷
Fe ₂ O ₃	۶۱/۱۳	۵۴/۶۸	۵۲/۲۵	۵۷/۱۷	۵۷/۳۸	۵۷/۴۱	۳۲/۹۲	۳۳/۵۶	۳۴/۱۳	۳۹/۵۵
FeO	۳۲/۸۹	۳۶/۴۸	۳۶/۶۶	۳۱/۷۷	۳۷/۶۰	۳۱/۵۱	۳۸/۸۹	۴۱/۹۲	۴۴/۳۶	۳۷/۰۸
MnO	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۴۷	۰/۱۰	۰/۴۳	۰/۰۲	۰/۲۰	۰/۱۳	۰/۴۸
MgO	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۱۱	۱/۹۷	۰/۰۵	۱/۳۶	۳/۶۵	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۱۲
CaO	۰/۲۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۰	۱/۴۱	۰/۴۸	۰/۴۱
Cr ₂ O ₃	۰/۰۳	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۰۷	۰/۸۸	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۱
V ₂ O ₃	۱/۰۲	۱/۵۸	۱/۶۳	۰/۵۷	۰/۲۶	۰/۴۷	۰/۱۰	۰/۹۹	۰/۷۷	۰/۹۴
NiO	۰/۰۰	۰/۲۱	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲
Total	۱۰۰/۳۳	۱۰۰/۱۴	۹۹/۰۷	۹۹/۸۶	۹۹/۹۵	۹۹/۲۴	۹۸/۷۲	۹۹/۴۶	۹۹/۳۴	۹۹/۷۱

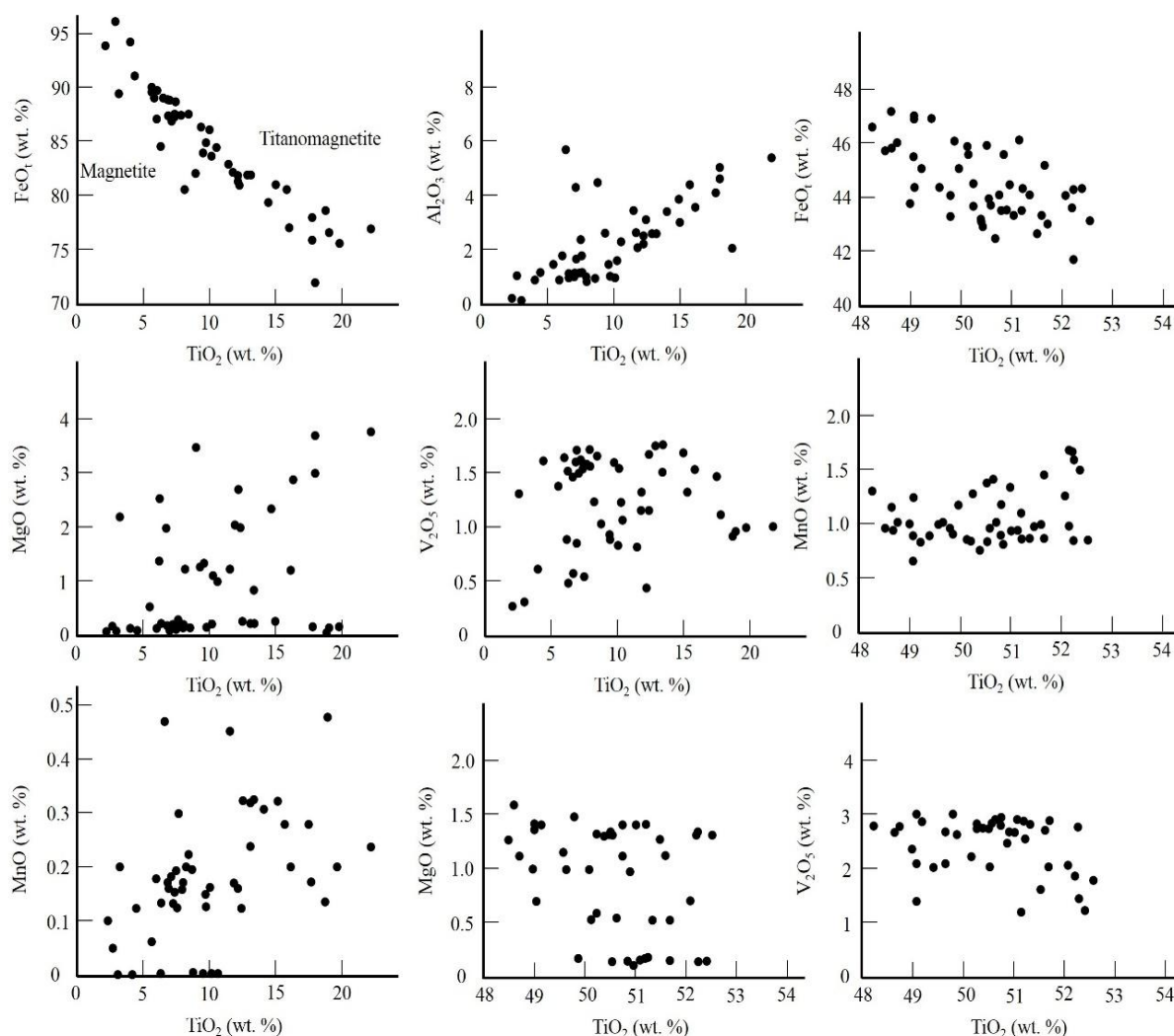
Type	Type 1					Type 2				
Si	۰/۰۰۰۴	۰/۰۴۶۱	۰/۰۴۴۹	۰/۰۰۰۸	۰/۰۴۳۰	۰/۰۰۲۹	۰/۰۱۶۱	۰/۰۱۵۳	۰/۰۰۶۶	۰/۰۴۰۷
Ti	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۹۴	۰/۰۱۶۱۶	۰/۰۴۰۳۱	۰/۰۰۶۰۴	۰/۰۱۶۵۹	۰/۰۴۷۱۸	۰/۰۵۴۰۲	۰/۰۵۱۸۴	۰/۰۵۱۷۴
Al	۰/۰۳۶۶	۰/۰۴۵۵	۰/۰۳۵۴	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۷۲	۰/۰۷۰۳	۰/۰۱۸۹۰	۰/۰۴۵۱	۰/۰۱۸۶	۰/۰۴۵۹
Fe ³⁺	۱/۷۱۷۶	۱/۵۷۰۳	۱/۴۹۸۳	۱/۰۳۹۷	۱/۷۵۳۲	۱/۵۷۵۶	۱/۸۰۱۴	۱/۸۱۳۷	۱/۹۰۷۲	۱/۸۱۰۰
Fe ²⁺	۱/۰۹۱۴	۱/۱۵۵۶	۱/۱۹۴۶	۱/۱۲۷۴	۱/۰۹۵۳	۱/۰۶۲۹	۱/۲۹۶۷	۱/۴۸۶۱	۱/۵۰۱۳	۱/۵۲۰۷
Mn	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۵۵	۰/۰۳۲۵	۰/۰۰۳۴	۰/۰۳۲۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۴۰	۰/۰۱۴۸
Mg	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۵۹	۰/۰۲۳۹۵	۰/۰۰۲۷	۰/۰۷۲۴	۰/۰۱۹۰۱	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۶۵
Ca	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۵۵۰	۰/۰۱۸۹	۰/۰۱۶۰
Cr	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۴۵	۰/۰۲۴۹	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۳
V	۰/۰۲۹۲	۰/۰۴۵۳	۰/۰۴۷۳	۰/۰۳۷۳	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱۳۵	۰/۰۳۰۸	۰/۰۲۸۹	۰/۰۲۲۷	۰/۰۲۷۴
Ni	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۶
Total	۳/۰۰۰۰	۳/۰۰۱۵	۳/۰۰۰۳	۳/۰۰۲۰	۳/۰۰۰۱	۳/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۴	۳/۰۰۰۱	۳/۰۰۰۲	۳/۰۰۰۱
Mol%Us	۱۰/۷۹	۱۲/۴۲	۱۶/۷۲	۱۲/۶۵	۴/۵۸	۱۱/۸۴	۴۵/۶۴	۵۶/۸۷	۵۲/۹۷	۵۳/۹۱
p										
Type	Type 2									
SiO ₂	۲/۰۴	۲/۷۴	۰/۱۴	۰/۴۲	۱/۲۷	۲/۷۴	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۴۵	۰/۴۱
TiO ₂	۹/۷۲	۱۰/۱۰	۱۲/۹۷	۱۲/۳۸	۱۷/۶۴	۱۰/۱۰	۱۲/۲۱	۱۷/۸۱	۱۱/۸۰	۱۲/۳۱
Al ₂ O ₃	۱/۰۰	۰/۸۸	۲/۵۶	۳/۰۲	۰/۹۷	۰/۸۸	۲/۴۵	۲/۴۹	۲/۰۲	۲/۱۴
Fe ₂ O ₃	۴۸/۴۹	۴۵/۹۹	۴۱/۶۱	۴۱/۵۴	۴۲/۱۸	۴۵/۹۹	۴۰/۸۰	۳۹/۲۰	۴۷/۹۳	۴۲/۵۹
FeO	۳۶/۲۸	۳۷/۳۷	۴۰/۲۳	۳۹/۳۳	۳۵/۸۶	۳۷/۳۰	۴۰/۳۵	۳۶/۵۱	۳۴/۰۹	۳۸/۹۲
MnO	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۱۷	۰/۱۲
MgO	۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۱۴	۰/۲۰	۲/۶۵	۲/۹۶	۲/۰۳	۱/۹۹
CaO	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۴	۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۱۰
Cr ₂ O ₃	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۰۷	۰/۱۰
V ₂ O ₃	۱/۵۹	۱/۵۳	۱/۷۴	۱/۶۶	۱/۴۵	۱/۵۳	۰/۴۲	۰/۰۰	۱/۱۳	۱/۱۳
NiO	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۲
Total	۹۹/۷۷	۹۹/۳۰	۹۹/۹۲	۹۹/۱۲	۹۹/۸۳	۹۹/۲۳	۹۹/۹۰	۱۰۰/۱۲	۹۹/۸۴	۹۹/۸۳
Si	۰/۰۷۳۵	۰/۰۹۹۱	۰/۰۰۵۰	۰/۰۱۵۲	۰/۰۴۶۱	۰/۰۹۹۱	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۳۲	۰/۰۱۶۰	۰/۰۱۴۶
Ti	۰/۲۶۳۴	۰/۲۷۴۷	۰/۳۵۰۸	۰/۳۳۶۴	۰/۴۸۲۱	۰/۲۷۴۹	۰/۳۲۳۷	۰/۴۷۳۰	۰/۳۱۴۸	۰/۳۲۸۷
Al	۰/۰۴۲۵	۰/۰۳۷۵	۰/۰۰۸۵	۰/۱۲۸۶	۰/۰۴۱۵	۰/۰۳۷۵	۰/۰۱۰۸	۰/۰۰۳۶	۰/۰۸۴۴	۰/۰۸۹۵
Fe ³⁺	۱/۲۳۰۳	۱/۱۶۳۷	۱/۱۲۵۸	۱/۱۱۴۲	۰/۸۵۵۵	۱/۱۶۳۱	۱/۲۱۸۵	۰/۹۱۵۱	۱/۲۱۹۹	۱/۱۸۸۸
Fe ²⁺	۱/۳۲۳۸	۱/۳۵۶۸	۱/۳۳۴۸	۱/۳۲۸۹	۱/۵۱۵۴	۱/۳۵۷۰	۱/۱۷۳۳	۱/۳۲۰۰	۱/۲۱۲۷	۱/۲۳۰۴
Mn	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۳۶
Mg	۰/۰۰۷۰	۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۱۳	۰/۰۱۲۹	۰/۰۰۷۶	۰/۰۱۰۸	۰/۱۳۹۲	۰/۱۵۵۸	۰/۱۰۷۰	۰/۱۰۵۳
Ca	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۳۸
Cr	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۴۳	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۴۸	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۸
V	۰/۰۴۵۹	۰/۰۴۴۳	۰/۰۵۰۲	۰/۰۴۸۱	۰/۰۴۲۲	۰/۰۴۴۴	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۳۳	۰/۰۳۲۱	۰/۰۳۲۲
Ni	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۶
Total	۳/۰۰۱۶	۳/۰۰۱۳	۳/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۰	۳/۰۰۱۳	۳/۰۰۰۱	۳/۰۰۰۴	۳/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۱
Mol%	۲۷/۸۶	۲۹/۳۰	۳۷/۰۴	۳۵/۹۲	۵۰/۵۲	۲۹/۳۲	۲۸/۵۷	۴۵/۰۶	۲۸/۸۳	۳۰/۵۴
Usp										

جدول ۲. نتایج انتخابی تعداد ۲۰ تجزیه ریزکاوا الکترونی ایلمنیت. مقدار مول ایلمنیت (Ilm) با استفاده از [۱۶] محاسبه شده است. محاسبات بر اساس تعداد ۳ اتم اکسیژن است.

Type	Type 2									
SiO ₂	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۲۰	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴
TiO ₂	۵۰/۵۲	۴۹/۸۸	۴۹/۶۷	۴۹/۹۷	۵۰/۱۴	۴۹/۰۶	۴۹/۸۱	۵۰/۷۴	۵۰/۹۷	۵۰/۸۷
Al ₂ O ₃	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۲۲	۰/۳۵	۰/۱۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۳
Fe ₂ O ₃	۳/۱۵	۴/۲۰	۴/۰۱	۳/۰۰	۴/۰۳	۱/۹۹	۲/۸۰	۲/۱۰	۳/۸۰	۲/۴۵
FeO	۴۲/۷۸	۴۱/۹۵	۴۱/۸۹	۴۲/۱۳	۴۱/۹۷	۴۵/۰۷	۴۱/۳۰	۴۲/۰۰	۴۰/۷۰	۴۳/۱۳

Type	Type 2									
MnO	۱/۳۸	۰/۹۱	۰/۹۹	۱/۱۵	۰/۳۰	۰/۶۴	۰/۹۵	۱/۰۰	۱/۳۵	۱/۱۶
MgO	۰/۱۴	۰/۱۸	۱/۴۸	۱/۸۴	۰/۹۹	۱/۴۳	۱/۵۰	۱/۱۲	۰/۰۹	۰/۱۳
CaO	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱
Cr ₂ O ₃	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱
V ₂ O ₃	۲/۰۰	۲/۶۰	۲/۰۹	۱/۴۵	۱/۱۴	۱/۴۲	۲/۹۸	۲/۷۶	۲/۶۴	۲/۴۵
NiO	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۲۲	۰/۱۱
Total	۱۰۰/۰۵	۹۹/۸۰	۱۰۰/۵۴	۹۹/۸۸	۹۹/۰۷	۹۹/۹۳	۹۹/۴۵	۹۹/۷۷	۹۹/۸۵	۱۰۰/۳۹
Si	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۰
Ti	۰/۹۵۶۳	۰/۹۴۶۱	۰/۹۲۳۱	۰/۹۳۳۰	۰/۹۵۱۹	۰/۹۱۷۹	۰/۹۳۴۰	۰/۹۵۶۴	۰/۹۶۸۹	۰/۹۶۰۶
Al	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۶۴	۰/۰۱۰۴	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۹
Fe ³⁺	۰/۰۴۴۷	۰/۰۵۲۲	۰/۰۹۸۶	۰/۰۹۵۰	۰/۰۵۴۹	۰/۱۲۵۴	۰/۰۵۹۸	۰/۰۳۰۰	۰/۰۰۲۷	۰/۰۲۵۰
Fe ²⁺	۰/۹۲۱۹	۰/۹۲۰۹	۰/۸۵۱۵	۰/۸۴۱۷	۰/۹۱۲۴	۰/۸۵۳۳	۰/۸۵۹۴	۰/۸۹۴۱	۰/۹۳۷۶	۰/۹۳۱۸
Mn	۰/۰۲۹۴	۰/۰۱۹۴	۰/۰۲۰۷	۰/۰۲۴۲	۰/۰۰۶۴	۰/۰۱۳۵	۰/۰۲۰۱	۰/۰۲۱۲	۰/۰۲۸۹	۰/۰۲۴۷
Mg	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۶۸	۰/۰۵۴۵	۰/۰۶۸۱	۰/۰۳۷۲	۰/۰۵۳۰	۰/۰۵۵۷	۰/۰۴۱۸	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۴۹
Ca	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳
Cr	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲
V	۰/۰۴۰۳	۰/۰۵۲۶	۰/۰۴۱۴	۰/۰۲۸۹	۰/۰۲۳۱	۰/۰۲۸۳	۰/۰۵۹۲	۰/۰۵۵۴	۰/۰۵۲۱	۰/۰۴۹۳
Ni	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۲۲
Total	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۱	۲/۰۰۰۷
Mol% Ilm	۹۷/۶۲	۹۷/۱۷	۹۴/۳۱	۹۴/۶۰	۹۷/۱۱	۹۳/۰۴	۹۶/۵۷	۹۸/۳۱	۹۹/۸۰	۹۸/۶۴
Type	Type 1					Type 3				
SiO ₂	۰/۰۴	۱/۳۴	۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۸
TiO ₂	۴۸/۶۵	۴۶/۵۱	۴۸/۷۴	۴۸/۲۵	۴۶/۶۶	۵۲/۱۹	۵۲/۵۴	۵۱/۲۲	۵۱/۶۸	۵۱/۱۶
Al ₂ O ₃	۰/۱۶	۰/۴۶	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۲
Fe ₂ O ₃	۳/۴۰	۳/۴۰	۱/۱۰	۳/۲۰	۲/۱۶	۰/۵۰	۲/۶۰	۲/۲۲	۳/۰۰	۱/۹۰
FeO	۴۲/۴۴	۴۳/۳۷	۴۵/۰۰	۴۳/۴۳	۴۵/۱۰	۴۳/۵۹	۴۱/۵۲	۴۳/۰۰	۴۳/۲۲	۴۴/۴۰
MnO	۱/۱۲	۰/۹۶	۱/۰۰	۱/۲۸	۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۸۲	۱/۰۵	۰/۸۴	۰/۹۱
MgO	۱/۵۸	۱/۵۸	۱/۱۲	۰/۵۹	۲/۰۹	۱/۳۲	۱/۳۳	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۱۵
CaO	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۳
Cr ₂ O ₃	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴
V ₂ O ₃	۲/۰۱	۱/۶۱	۲/۷۶	۲/۷۹	۲/۶۴	۱/۳۵	۱/۰۸	۱/۷۴	۱/۰۰	۱/۲۰
NiO	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Total	۹۹/۴۸	۹۹/۲۹	۹۹/۷۷	۹۹/۷۲	۹۹/۶۶	۱۰۰/۰۰	۹۹/۹۵	۹۹/۵۵	۹۹/۹۹	۹۹/۸۹
Si	۰/۰۰۱۰	۰/۰۳۳۳	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲۰
Ti	۰/۹۱۳۶	۰/۸۶۹۲	۰/۹۱۶۷	۰/۹۱۱۱	۰/۸۶۹۶	۰/۹۷۹۰	۰/۹۸۸۱	۰/۹۷۵۰	۰/۹۷۹۷	۰/۹۷۱۸
Al	۰/۰۰۴۷	۰/۰۱۳۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۶
Fe ³⁺	۰/۱۲۴۸	۰/۱۴۹۲	۰/۱۰۹۳	۰/۱۱۳۵	۰/۲۰۴۷	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۸۹	۰/۰۱۵۷	۰/۰۲۶۶
Fe ²⁺	۰/۸۳۲۱	۰/۸۲۲۵	۰/۸۵۴۶	۰/۸۶۵۳	۰/۷۷۴۴	۰/۹۱۰۲	۰/۹۲۱۶	۰/۹۴۷۹	۰/۹۵۸۳	۰/۹۴۷۹
Mn	۰/۰۲۳۲	۰/۰۲۰۲	۰/۰۲۱۲	۰/۰۲۷۲	۰/۰۱۹۵	۰/۰۲۰۳	۰/۰۱۷۴	۰/۰۲۲۵	۰/۰۱۷۹	۰/۰۱۹۵
Mg	۰/۰۵۸۸	۰/۰۵۸۵	۰/۰۴۱۷	۰/۰۲۲۱	۰/۰۷۷۲	۰/۰۴۹۱	۰/۰۴۹۶	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۵۶
Ca	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۸
Cr	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۸
V	۰/۰۴۰۲	۰/۰۳۲۱	۰/۰۵۵۳	۰/۰۵۶۱	۰/۰۵۲۵	۰/۰۲۷۴	۰/۰۲۱۶	۰/۰۳۵۳	۰/۰۲۰۲	۰/۰۲۴۳
Ni	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
Total	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۳	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰
Mol% Ilm	۹۲/۹۶	۸۹/۷۲	۹۳/۹۴	۹۳/۶۴	۸۸/۲۳	۹۹/۴۷	۹۹/۹۳	۹۹/۴۱	۹۹/۰۹	۹۸/۵۵

نمودارهای اکسیدهای اصلی در برابر TiO_2 برای تیتانومگنتیت و ایلمنیت رسم شده است (شکل ۷). با افزایش مقدار تیتانیوم در تیتانومگنتیت و ایلمنیت، مقدار FeO_t کاهش پیدا می‌کند. شیب کاهش در تیتانومگنتیت شدیدتر است. مقدار تیتانیوم در تیتانومگنتیت نوع یک کم‌تر از تیتانومگنتیت‌های نوع دوم است (شکل ۷ و جدول ۱). اکسیدهای منیزیم، منگنز، آلومینیوم و وانادیم رابطه مستقیمی با مقدار اکسید تیتانیوم در تیتانومگنتیت دارند، در حالی که در ایلمنیت روند مشخصی دیده نمی‌شود و در برخی از اکسیدها مثل MgO با افزایش مقدار تیتان، منیزیم کاهش نشان می‌دهد. نمودارها نشان می‌دهد که مقدار MnO و V_2O_5 در ایلمنیت فراوانی بیش‌تری نسبت تیتانومگنتیت دارد. به‌طوری‌که مقدار V_2O_5 در ایلمنیت در محدوده ۱/۰۰ تا ۲/۹۸ درصد وزنی قرار می‌گیرد و این مقدار در تیتانومگنتیت برابر ۰/۰۰ تا ۱/۶۶ درصد وزنی است. زیاد بودن مقدار اکسید وانادیم نشان می‌دهد که کانسنگ اکسیدی آنومالی درگز کهنوج، غنی از وانادیوم است. مقدار اکسید تیتانیوم در ایلمنیت نوع یک تا سه به‌ترتیب برابر ۴۶/۵۱ تا ۴۸/۶۵، ۴۹/۰۶ تا ۵۰/۸۷ و ۵۱/۱۶ تا ۵۲/۶۸ درصد وزنی است.



شکل ۷. نمودار تغییرات اکسیدهای اصلی در برابر اکسید تیتانیوم در تیتانومگنتیت و ایلمنیت را نشان داده است.

جدول ۳. نتایج تجزیه تجزیه ریزکاو الکترونی هماتیت

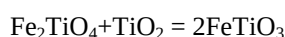
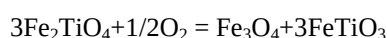
Point	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
SiO ₂	۰/۵۰	۰/۳۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۷۰	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۸۰	۰/۶۵	۰/۵۰
TiO ₂	۸/۲۰	۷/۶۰	۸/۱۰	۱۳/۷۰	۱۲/۲۰	۱۲/۲۰	۹/۳۰	۸/۹۰	۸/۶۰	۱۰/۰۰
Al ₂ O ₃	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۱۰
Fe ₂ O ₃	۷۳/۷۰	۷۴/۲۰	۷۷/۱۰	۷۴/۵۰	۷۵/۳۰	۷۳/۲۰	۷۶/۲۰	۷۷/۳۰	۷۴/۵۰	۷۰/۰۰
FeO	۱۵/۳۰	۱۶/۲۰	۱۴/۵۰	۱۱/۳۰	۱۱/۱۰	۱۲/۷۰	۱۲/۶۰	۱۰/۵۰	۱۴/۱۰	۱۷/۲۰
MnO	۰/۸۹	۰/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۰	۰/۴۰	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۲۰
MgO	۱/۱۰	۰/۶۵	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۴۹	۱/۱۰	۱/۰۰	۱/۴۰	۱/۰۰	۱/۲۰
Cr ₂ O ₃	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰
V ₂ O ₃	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲
Total	۹۹/۸۰	۹۹/۳۰	۱۰۰/۰۰	۹۹/۷۰	۱۰۰/۱۰	۱۰۰/۱۰	۱۰۰/۰۰	۹۹/۳۰	۹۹/۲۰	۹۹/۲۰

بحث و بررسی

شرایط تشکیل کانی‌های اکسیدی

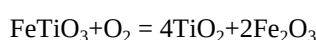
محلول جامد مگنتیت-اولواسپینل $Ti_xFe_{3-x}O_4$ دما بالا (که به صورت تیتانومگنتیت شناخته می‌شود) به عنوان مهم‌ترین فاز آهن و تیتان در ذخایر اکسیدی و سنگ‌های ارتوماگمایی مطرح است [۲۷]. مگنتیت غنی از تیتان (تیتانومگنتیت) می‌تواند اکسیده و یا احیایی شود [۲۸] و بنابراین ترکیب آن می‌تواند به وسیله کانی‌های محصول و در حال تعادل با آن دوباره محاسبه شود که مهم‌ترین کانی‌های حاصل از آن حضور تیغه‌های ایلمنیت و یا همرشدی‌های ایلمنیت در تیتانومگنتیت است [۸]. یک ترکیب ایده‌آل مگنتیت غنی از تیتانیوم در اثر فرایند معکوس اکسیداسیون دوتریک خالص تشکیل می‌شود که در امتداد خط اولواسپینل-مگنتیت قرار می‌گیرد.

پژوهش‌های پتروگرافی و ژئوشیمی کانسنگ نشان داد که کانسنگ مگنتیت در آنومالی درگز غنی از تیتان و وانادیوم بوده است و ترکیب آن عمدتاً در امتداد و در بالای خط مگنتیت-اولواسپینل قرار گرفته که نشان‌دهنده روند اکسیداسیون (اکسیداسیون دوتریک) در کانسنگ اکسیدی است. در دماهای بالا، محلول جامد تیتانومگنتیت به دو کانی مگنتیت و اولواسپینل تفکیک می‌شود که مگنتیت به عنوان کانی میزبان تیغه‌های اولواسپینل در امتداد سطح (۱۱۱) تشکیل شده و باعث تشکیل بافت هم‌رشد ویدمن اشتاین می‌شود [۲۵]. با کاهش دما، اولواسپینل ناپایدار شده و به ایلمنیت طی واکنش با اکسیژن و TiO_2 طبق این واکنش‌های تبدیل می‌شود:



این واکنش‌ها نشان می‌دهد که ابتدا محلول جامد تیتانومگنتیت وجود داشته و با کاهش دما و افزایش فوگاسیته اکسیژن موجب تشکیل تیغه‌های ایلمنیت در تیتانومگنتیت شده است. پتروگرافی تیغه‌های ایلمنیت نشان داد که این تیغه‌ها دارای ضخامت‌های مختلف از تیغه‌های نازک تا ضخیم‌تر هستند. دون و دی (۱۹۷۳) [۲۹] نشان داده‌اند که تیغه‌های ضخیم‌تر ایلمنیت در تیتانومگنتیت محصول جدایش درونی بعد از تبلور تیتانومگنتیت بوده است، درحالی که تیغه‌های نازک‌تر در هنگام ناپایدار شدن تیتانومگنتیت تشکیل می‌شوند. این تیغه‌ها هم‌چنین می‌توانند نمایانگر تمرکز تدریجی یون تیتانیوم در امتداد سطح معینی از تیتانومگنتیت طی سرد شدن بلورهای تیتانومگنتیت بدون درهم آمیختگی شبکه بلوری کوبیک کانی باشد. پژوهش‌های پتروگرافی نشان داد که ساختار کوبیک کانی‌های تیتانومگنتیت غالباً به هم ریخته است و احتمالاً تیغه‌های ضخیم‌تر به وسیله اکسیداسیون تیغه‌های اولواسپینل با غنی‌شدگی تدریجی تیتانیوم در امتداد سطوح (۱۱۱) و (۱۰۰)

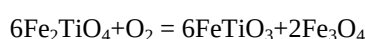
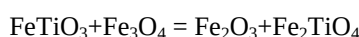
تیتانومگنتیت با افزایش فوگاسیته اکسیژن تشکیل شده و یا این‌که از ادغام تیغه‌های نازک‌تر و غنی‌شدگی تیتان با افزایش فوگاسیته اکسیژن تشکیل شده، در حالی‌که تیغه‌های نازک‌تر هم‌زمان با پیشرفت اکسیداسیون دوتریک در تیتانومگنتیت و غنی‌شدگی تیتانیوم در امتداد این سطوح تشکیل شده است. پاتریس (۱۹۸۵) [۲۱] بیان کرده است که تیغه‌های نازک ایلمنیت در تیتانومگنتیت در شرایط اکسیداسیون اولیه تشکیل شده و تیغه‌های ضخیم‌تر ایلمنیت در شرایط اکسیداسیون پیشرفته تشکیل می‌شوند. این شرایط در مورد تیغه‌های ایلمنیتی درگز نیز می‌تواند صادق باشد، به‌طوری‌که تیغه‌های نازک‌تر در شرایط اکسیداسیون مراحل اول تشکیل شده و در ادامه با پیشرفت اکسیداسیون، تیغه‌های ضخیم‌تر ایلمنیت از ادغام تیغه‌های نازک و یا غنی‌شدگی بیش‌تر تیتان خارج شده از تیتانومگنتیت در امتداد سطوح خاص تشکیل شده است. تشکیل تیغه‌های ایلمنیت در تیتانومگنتیت (نوع سه) باعث ایجاد بافت داربستی و ساندویچی در تیتانومگنتیت شده است [۳۰]. علاوه بر کانی‌سازی تیغه‌ای ایلمنیت (نوع سه)، ایلمنیت به‌صورت بلورهای منفرد (نوع یک) ریزبلور تا درشت بلور به مقدار کم‌تر و یا هم‌رشد با تیتانومگنتیت (نوع دو) با فراوانی بیش‌تر تشکیل شده است. احتمالاً این ایلمنیت‌ها محصول جوانتر و جدیدتر طی شرایط فوگاسیته اکسیژن بالاتر هستند. در برخی از بلورهای تیتانومگنتیت با تیغه‌های ایلمنیت فراوان، بلورهای ایلمنیت در حاشیه آنها مشاهده شده (شکل ۴ ث) که به‌صورت بافت جانیشینی تشکیل شده و جوان‌تر بودن این نوع ایلمنیت را تأیید می‌کند. هرچا که تیتانومگنتیت و ایلمنیت در کنار هم و به‌صورت هم‌رشد دیده می‌شوند (نوع دوم)، مارتیتی‌شدن شدیدی رخ داده است که گویای شرایط بالای فوگاسیته اکسیژن است، درحالی‌که تیتانومگنتیت‌های منفرد (نوع یک) مارتیتی‌شدن اندکی را نشان داده است. شدت مارتیتی‌شدن در بلورهای تیتانومگنتیت متفاوت است و در مواردی تمام بلور تیتانومگنتیت به هماتیت تبدیل شده و تنها تیغه‌های ایلمنیت در بلور باقی مانده است. در مواردی که شدت مارتیتی‌شدن بیش‌تر است، مقدار بیش‌تر Fe_2O_3 و مقدار کم‌تر FeO در بلورهای تیتانومگنتیت مشاهده شده که خود شرایط بالاتر اکسیداسیون را در کانسنگ می‌رساند که بیش‌تر در نمونه‌های سطحی کانسنگ رخ داده است. وجود تیغه‌های هماتیت در برخی از بلورهای ایلمنیت احتمالاً در اثر تجزیه ایلمنیت به هماتیت در اثر اکسیداسیون نهایی دمای کم کانی‌سازی اکسیدی طبق این واکنش تشکیل شده است:



کانی‌های سولفیدی کانسنگ نیز هم به‌صورت بلورهای منفرد و هم اذخال در کانی‌های اکسیدی تشکیل شده‌اند. کانی‌های سولفیدی احتمالاً در اثر عدم اختلاط سیالات اکسیدی-سولفیدی در مراحل اولیه ماگمایی تشکیل شده‌اند.

ژئوترموتری و فوگاسیته اکسیژن

اساس محاسبات ژئوترموتری و فوگاسیته اکسیژن بر کانی‌های اکسیدی هم‌زیست و در حال تعادل با یک‌دیگر نظیر زوج کانی‌های ایلمنیت-هماتیت، تیتانومگنتیت-ایلمنیت و یا مگنتیت-اولواسپینل است [۳۱]. دو واکنش اصلی که پایه محاسبات دما و فوگاسیته اکسیژن در کانه‌های آهن-تیتان اکسیدی را تشکیل می‌دهند، بدین شرح است [۳۱]:



اگر سیستم کانی‌سازی اکسیدی به‌صورت ترکیب Fe-Ti-O باشد، از روابط [۳۱] برای ژئوترموتری و فوگاسیته اکسیژن استفاده می‌شود. اما در نمونه‌های بررسی شده درگز مقادیری Mg ، Mn ، V ، Cr و Al وجود دارد که از

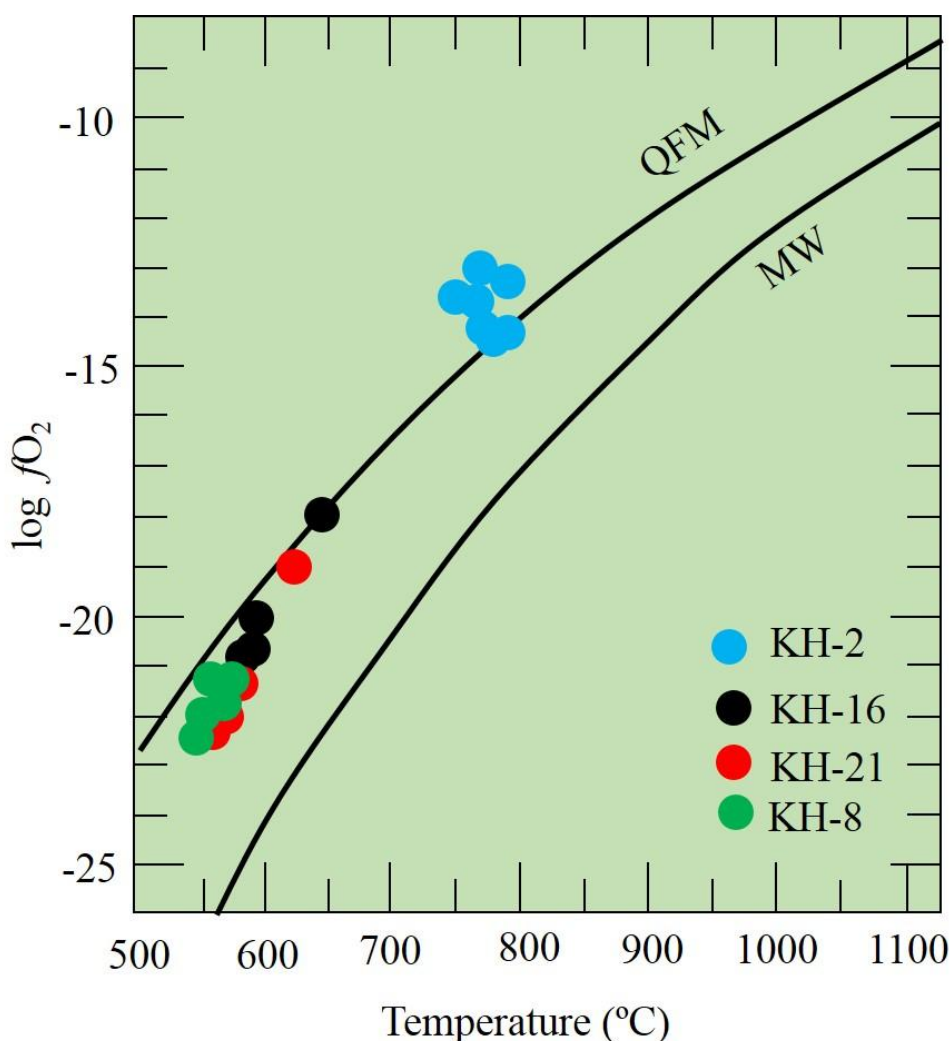
رابطه‌های [۱۵]، [۱۶]، [۱۷] و [۱۸] بر اساس معادله [۲۷] استفاده شده است. برای مرجع، از منحنی بافر QFM (کوارتز-مگنتیت-فابالیت) [۳۲] و WM (وستیت-مگنتیت) [۳۳] برای فشارهای کم‌تر از ۱/۵ کیلو بار استفاده شده است.

تخمین دمای در حال تعادل و فوگاسیته اکسیژن برای جفت کانی‌های ایلمنیت و تیتانومگنتیت نوع دوم هم‌رشد در نمونه‌های KH-2، Kh-16، KH-21 و KH-8 انجام شده است (جدول ۴ و شکل ۸). تفاوت در دما و فوگاسیته اکسیژن برای هریک از معادلات مرجع [۱۵]، [۱۶]، [۱۷] و [۱۸] وجود دارد. در شکل ۸ سعی شده که از میانگین اعداد به‌دست آمده برای هر یک از آن‌ها استفاده شود. نمونه‌های بررسی شده یک دمای در حال تعادل بین ۵۵۱ تا ۸۳۰ درجه سانتی‌گراد و تغییرات فوگاسیته اکسیژن بین ۲۱/۶۱- تا ۲۳/۹۷- را در امتداد منحنی بافر QFM نشان می‌دهد (جدول ۴ و شکل ۸). الیور [۳۴] نشان داد که کانی‌های ایلمنیت و تیتانومگنتیت ریزبلور غنی از تیتان هم‌رشد با هم، دماهای بیش‌تر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند و هم‌رشدی‌های درشت‌بلور ایلمنیت و تیتانومگنتیت، دماهای ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. هم‌رشدی‌های ایلمنیت و تیتانومگنتیت که در بالای منحنی بافر QFM قرار گرفته‌اند، دماهای تعادلی بیش‌تری را نیز نشان داده‌اند (بین ۷۹۴ تا ۸۳۰ درجه سانتی‌گراد) و به‌عبارتی در امتداد منحنی اولواسپینل قرار می‌گیرند [۲۱].

ژئوترمومتری سنگ‌های گابروئیدی کمپلکس افیولیتی کهنوج به‌وسیله کنعانیان بررسی شده است [۱]. ژئوبارومتری هورنبلند به‌روش [۳۵] در سنگ‌های گابروئیدی نشان داد که این سنگ‌ها در فشار کم‌تر از ۵ کیلو بار تشکیل شده‌اند. بر همین اساس، قرار گرفتن نمونه‌های دما و فوگاسیته اکسیژن در امتداد منحنی بافر QFM (برای فشارهای کم‌تر از ۵ کیلو بار)، معادل با فشارهای به‌دست آمده از طریق ژئوبارومتری هورنبلند است [۱]. کنعانیان برای ژئوترمومتری سنگ‌های مافیک و الترامافیک از زوج کانی‌های پیروکسن-ایلمنیت [۳۶] و ارتوپیروکسن-کلینوپیروکسن [۳۷] و چند روش دیگر استفاده کرده است [۱]. دماهای به‌دست آمده برای فروگابرو و گابروهای توده‌ای ایلمنیت‌دار در محدوده ۶۴۸ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمده است. سنگ‌های مافیک منطقه عمدتاً از پلاژیوکلاز، پیروکسن و هورنبلند به‌صورت انباشتی و کانی‌های اکسیدی آهن و تیتان به‌صورت میان‌انباشتی تشکیل شده است. در سطح تماس کانی‌های اکسیدی با سیلیکاتی به‌ویژه پیروکسن، دگرسانی مشاهده شده و پیروکسن به آمفیبول ثانویه تبدیل شده است. دماهای ۶۴۸ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بر اساس تشکیل و تبلور کانی‌های سیلیکاته (انباشتی) سنگ‌های گابروئیدی به‌دست آمده و انتظار می‌رود فازهای اکسیدی میان‌انباشتی در دماهای کم‌تر تشکیل شده باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که دمای به‌دست آمده بر اساس زوج کانی‌های ایلمنیت و تیتانومگنتیت برابر ۵۵۱ تا ۸۳۰ درجه سانتی‌گراد (با عمده دمای بین ۵۵۴ تا ۶۶۸ درجه سانتی‌گراد) است. یک نمونه که دارای دماهای بیش‌تر است (۷۹۴ تا ۸۳۰ درجه سانتی‌گراد)، مرتبط با سنگ پیروکسن-هورنبلند گابرو درشت‌بلور است و دماهای دیگر مربوط به پیروکسن-هورنبلند و هورنبلند گابرو ریزبلور است. کاهش دماهای به‌دست آمده برای این گابروها بر اساس کاهش دماهای تشکیل در اثر تبلور بخشی منطقی به‌نظر می‌رسد، چراکه کاهش دما از گابروهای توده‌ای عمیق به گابروئیدهای سطحی در منطقه کهنوج به‌وسیله کنعانیان گزارش شده است [۱].

جدول ۴. نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی برای ایلمنیت و تیتانومگنتیت هم‌رشد تیپ ۲ برای محاسبات دما و فوگاسیته اکسیژن. مقدار مول ایلمنیت (Ilm) و اولواسپینل (Usp) به ترتیب با استفاده از [۱۵]، [۱۶]، [۱۷] و [۱۸] محاسبه شده است. محاسبات دما و فوگاسیته اکسیژن بر اساس معادله محاسبه $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ و $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ با استفاده از [۱۵] انجام شده است. اعداد داخل پرانتز تعداد تجزیه انجام شده برای هر جفت کانی است.

	Mag (4)	Ilm (4)	Mag (5)	Ilm (5)	Mag (5)	Ilm (5)	Mag (7)	Ilm (7)
SiO ₂	۰/۴۷	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۳۶	۱/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۷
TiO ₂	۱۳/۰۰	۵۰/۱۰	۹/۹۷	۵۰/۳۰	۱۵/۱۰	۵۱/۴۰	۱۱/۳۱	۴۷/۳۷
Al ₂ O ₃	۱/۱۰	۰/۰۱	۲/۵۶	۰/۲۴	۰/۷۵	۰/۳۰	۲/۴۵	۰/۲۹
Fe ₂ O ₃	۴۳/۲۰	۳/۳۰	۴۵/۱۰	۲/۴۰	۳۵/۳۰	۲/۴۰	۴۴/۸۰	۴/۰۰
FeO	۴۰/۸۰	۴۲/۲۰	۴۰/۲۰	۴۲/۸۰	۴۵/۳۰	۴۳/۹۰	۳۶/۳۵	۴۲/۵۳
MnO	۰/۱۸	۰/۹۷	۰/۳۲	۰/۷۸	۰/۱۰	۱/۳۰	۰/۲۰	۰/۰۰
MgO	۰/۰۷	۱/۱۰	۰/۲۱	۰/۹۹	۰/۱۵	۰/۵۵	۲/۶۵	۳/۵۰
CaO	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Cr ₂ O ₃	۰/۱۸	۰/۰۰	۰/۱۴	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۵۲	۰/۰۴
V ₂ O ₃	۱/۵۹	۲/۳۱	۱/۷۴	۲/۶۳	۱/۵۲	۱/۰۰	۰/۴۲	۲/۳۶
NiO	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Total	۹۹/۵۷	۹۹/۰۷	۱۰۰/۳۸	۱۰۰/۵۱	۹۹/۶۳	۱۰۰/۹۵	۹۸/۶۸	۱۰۰/۲۶
Si	۰/۰۱۶۹	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۸۹	۰/۰۴۰۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۴۱
Ti	۰/۳۵۱۰	۰/۹۴۰۱	۰/۲۴۷۶	۰/۹۳۸۷	۰/۴۱۳۰	۰/۹۶۰۰	۰/۲۹۷۸	۰/۸۶۷۰
Al	۰/۰۴۶۵	۰/۰۰۰۳	۰/۱۰۷۶	۰/۰۰۷۰	۰/۰۳۲۱	۰/۰۰۸۸	۰/۱۰۱۹	۰/۰۰۸۳
Fe ³⁺	۱/۱۶۶۹	۱/۰۶۹۷	۱/۲۹۳۴	۰/۰۴۵۴	۱/۰۱۲۱	۰/۰۴۷۰	۱/۲۷۰۵	۰/۲۰۲۵
Fe ²⁺	۱/۳۵۴۴	۰/۸۷۹۴	۱/۲۵۱۸	۰/۸۹۴۴	۱/۴۳۸۸	۰/۹۱۴۳	۱/۱۵۵۱	۰/۷۴۴۲
Mn	۰/۰۰۵۵	۰/۰۲۰۵	۰/۰۰۹۷	۰/۰۱۶۴	۰/۰۰۳۱	۰/۰۲۷۳	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۰۰
Mg	۰/۰۰۳۷	۰/۰۴۰۹	۰/۰۱۱۲	۰/۰۳۶۶	۰/۰۰۸۱	۰/۰۲۰۴	۰/۱۳۹۵	۰/۱۳۶۹
Ca	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
Cr	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۴	۰/۰۱۴۵	۰/۰۰۰۸
V	۰/۰۴۵۸	۰/۰۴۶۲	۰/۰۴۹۸	۰/۰۵۲۳	۰/۰۴۴۳	۰/۰۱۹۸	۰/۰۱۱۹	۰/۰۴۶۰
Ni	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
Total	۳/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۱	۲/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰
Recalculated Mole Fractions								
X ^{Usp}	[15]	۰/۳۶۷۹		۰/۲۷۲۶		۰/۴۵۳۰		۰/۳۰۰۶
	[16]	۰/۳۶۴۳		۰/۲۸۱۲		۰/۴۳۱۸		۰/۲۵۴۷
	[17]	۰/۳۶۶۱		۰/۲۸۴۳		۰/۴۳۱۴		۰/۳۱۲۰
	[18]	۰/۳۸۳۵		۰/۳۰۶۶		۰/۴۵۴۹		۰/۳۱۲۵
X ^{Ilm}	[15]		۰/۹۴۱۹		۰/۹۴۷۶		۰/۹۶۲۰	۰/۸۷۱۲
	[16]		۰/۹۶۱۵		۰/۹۷۰۴		۰/۹۷۳۹	۰/۸۷۵۵
	[17]		۰/۹۶۳۱		۰/۹۷۱۶		۰/۹۷۴۵	۰/۸۹۴۰
	[18]		۰/۹۶۳۱		۰/۹۷۵۸		۰/۹۷۵۵	۰/۸۸۸۱
Geothermobarometer by [25]								
T°C	[15]	۷۱۰		۶۶۴		۶۴۶		۸۳۰
	[16]	۶۳۰		۵۷۹		۵۶۸		۷۹۴
	[17]	۶۲۳		۵۷۳		۵۶۳		۸۰۲
	[18]	۶۲۶		۵۵۱		۵۵۸		۸۱۲
Log f _{O₂}	[15]	-۱۷/۰۴		-۱۸/۳۳		-۱۹/۷۹		-۱۲/۶۱
	[16]	-۲۰/۱۸		-۲۲/۴۲		-۲۳/۱۷		-۱۳/۲۹
	[17]	-۲۰/۵۲		-۲۲/۷۵		-۲۳/۴۰		-۱۳/۵۷
	[18]	-۲۰/۴۳		-۲۳/۹۷		-۲۳/۶۹		-۱۳/۲۶



شکل ۸. تخمین دما و فوگاسیته اکسیژن با استفاده از کانی‌های اکسیدی ایلمنیت و تیتانومگنتیت هم‌رشد تیپ دو را نشان می‌دهد. محاسبات بر اساس معادلات ژئوترموتری [۲۷] است. منحنی بافر QFM [۳۲] و MW [۳۳] برای مرجع و مقایسه در فشارهای کم‌تر از ۱/۵ کیلو بار نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

کمپلکس افیولیتی کهنوج در جنوب‌شرق ایران واقع شده و سنگ‌های گابروئیدی کمپلکس افیولیتی، میزبان کانی‌سازی کانسنگ اکسیدی به‌صورت پراکنده هستند. کانی‌سازی آهن و تیتانیوم درگز یکی از آنومالی‌های ناحیه معدنی کهنوج در کمپلکس افیولیتی کهنوج است که دارای کانی‌های اکسیدی ایلمنیت، تیتانومگنتیت، مارتیت، همتیت و گوتیت به‌همراه کانی‌های سولفیدی پیریت، پیروتیت و کالکوپیریت در مجموعه کانی‌های سیلیکاتی پیروکسن، پلاژیوکلاز، هورنبلند و الیوین در یک میزبان گابروئیدی تشکیل شده است. فروگابرو تا پیروکسن-هورنبلند گابروی درشت بلور، پیروکسن-هورنبلند گابروی ریزبلور، هورنبلند گابروی ریز بلور و دایک‌های دیابازی با ترکیب هورنبلند گابرو، به‌عنوان سنگ‌های گابروئیدی آنومالی درگز هستند که مقدار کانسنگ اکسیدی به‌ترتیب فراوانی کم‌تری دارد. کانی‌سازی اکسیدی آهن-تیتان به‌صورت بلورهای منفرد تیتانومگنتیت و ایلمنیت (نوع یک)، تیغه‌های ایلمنیت (نوع سه)، هم‌رشدی‌های تیتانومگنتیت و ایلمنیت (نوع دو) و در نهایت

تیغه‌های ایلمنیت و تیتانومگنتیت در میزبان کانی‌های سیلیکاته (نوع چهار) تشکیل شده است. می‌توان نتیجه گرفت که کانسنگ آهن و تیتانیوم در آنومالی درگز در ابتدا به‌عنوان تیتانومگنتیت (خط مگنتیت-اولواسپینل) در گابروها متبلور شده و در ادامه تحت دگرسانی و شرایط اکسیداسیون و فوگاسیته اکسیژن بالاتر قرار گرفته و ضمن افزایش مقدار اکسید تیتانیوم در آن، کانی‌های ایلمنیت تیغه‌ای در تیتانومگنتیت شکل گرفته و هم‌زمان ماریتی شدن شروع شده است. تیتانومگنتیت‌های تشکیل شده در اثر اکسیداسیون دوتریک خط مگنتیت-اولواسپینل شکل گرفته و هم‌زمان با کاهش دما فوگاسیته اکسیژن بیش‌تر شده است. ضمن افزایش اکسیداسیون، ایلمنیت به‌صورت فاز جدا شده هم‌رشد با تیتانومگنتیت و در مواردی بلورهای منفرد ایلمنیت تشکیل شده و هم‌زمان شدت ماریتی شدن در بلورهای مگنتیت افزایش یافته و در مواردی کل بلور تیتانومگنتیت را در برگرفته است. تیتانومگنتیت‌ها از نوع تیتانومگنتیت‌های نوع دوم بوده است که محصول مرحله نهایی اکسیداسیون هستند. قرار گرفتن برخی نقاط نزدیک به خط محلول جامد ایلمنیت-هماتیت به‌دلیل تشکیل تیغه‌های هماتیت در ایلمنیت است که حاصل مرحله نهایی اکسیداسیون شدید است. با توجه به این‌که کانی‌های ایلمنیت و تیتانومگنتیت به‌صورت میان‌انباشتی پس از تشکیل کانی‌های سیلیکاته انباشتی تشکیل شده، انتظار کاهش دما و افزایش فوگاسیته اکسیژن وجود دارد. پژوهش‌های دما-فوگاسیته اکسیژن نیز نشان داد که گابروهای میزبان کانی‌سازی در یک دمای تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده و سپس طی کاهش دما و افزایش فوگاسیته اکسیژن، کانی‌های اکسیدی تشکیل شده و با افزایش فوگاسیته اکسیژن کانی‌های تیتانومگنتیت و ایلمنیت نیز اکسید شده و به هماتیت تبدیل شده‌اند.

منابع

۱. کنعانیان علی، "پترولوژی و ژئوشیمی کمپلکس افیولیتی کهنوج"، رساله دکتری دانشگاه تهران (۱۳۸۰) ۲۵۲.
2. Kananian A., Juteau T., Bellon H., Darvishzadeh A., Sabzehi M., Whitechurch H., Ricou L. E., "The ophiolite massif of Kahnuj (western Makran, southern Iran): new geological and geochronological data", *Sciences de la Terre et des planètes/Earth and Planetary Sciences* 332 (2001) 543-552.
3. Arvin M., Babaei A. A., Ghadami Gh., Dargahi S., Shakerardekani A.R., "The origin of the Kahnuj ophiolitic complex, SE of Iran: Constraints from whole rock and mineral chemistry of the Bande-Zeyarat gabbroic complex", *Ofioliti* 30 (2) (2005) 1-14.
4. Ghadami Gh., "Petrology and geochemistry of the Kahnuj ophiolitic gabbroid rocks", MSc Thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, (1998) 145 (in Persian).
5. Ghazi A. M., Hassanipak A. A., Mahoney J.J., Duncan R. A., "Geochemical characteristics, ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages and original tectonic setting of the Band-e-Zeyarat/Dar Anar ophiolite, Makran accretionary prism, S.E. Iran", *Tectonophysics* 393 (2004) 175-196.
۶. رجب‌زاده محمدعلی، قربانی منصور، سعادت‌ی منیر، "مطالعه کانه‌زایی تیتانیوم در مجموعه افیولیتی کهنوج با استفاده از داده‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی، جنوب استان کرمان"، *مجله پترولوژی*، سال دوم، شماره هفتم (۱۳۹۰) ۳۸-۲۱.

۷. قاسمی‌سیانی مجید، مهرابی بهزاد، کریمی شهرکی بهروز، خیرآبادی امیر، "زمین‌شناسی، پتروگرافی و ژئوشیمی سنگ‌های الترامافیک-مافیک و کانه‌زایی همراه در آنومالی درگز، کمپلکس افیولیتی کهنوج"، پذیرش در مجله پترولوژی.

8. Saito T., Ishikawa N., Kamata H., "Iron-titanium oxide minerals in block-and-ash-flow deposits: implications for lava dome oxidation processes", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 138 (2004) 283-294.
9. Buddington A. F., Lindsley D. H., "Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents", *Journal of Petrology* 5 (1964) 310-357.
10. Ghiorso M. S., Evans B. W., "Thermodynamics of rhombohedral oxide solid solutions and a revision of the Fe-Ti two-oxide geothermometer and oxygen-barometer", *American Journal of Science* 308 (2008) 957-1039.
11. Stocklin J., "Structural history and tectonics of Iran. A review", *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 52 (1968) 1229-1258.
12. Houshmandzadeh A., "Ophiolites of Southeast Iran and their genetic problems. Geological Survey of Iran", Internal Report (1977) (in Persian).
13. Paragon-Contech Consoluting Engineers, "Explanatory text of Minab Map 1:250000", (1985) Geological survey Of Iran.
14. Lepage L. D., "ILMAT: an Excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry", *Computers and Geosciences* 29 (2003) 673-678.
15. Carmichael I. S. E., "The iron-titanium oxides of salic volcanic rocks and their associated ferromagnesian silicates", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 14 (1967) 36-64.
16. Anderson A. T., "Oxidation of the LaBlanche Lake titaniferous magnetite deposit, Quebec", *Journal of Geology* 76 (1968) 528-547.
17. Lindsley D. H., Spencer K. J., "Fe-Ti oxide geothermometry: Reducing analyses of coexisting Ti-magnetite (Mt) and ilmenite (Ilm)", abstract AGU 1982 Spring Meeting Eos Transactions. American Geophysical Union 63 (1982) 471.
18. Stormer J. C., "The effects of recalculation on estimates of temperature and oxygen fugacity from analyses of multicomponent iron-titanium oxides", *American Mineralogist* 68 (1983) 586-594.
19. Petřík I., Nabelek P.I., Janák M. Plašienka D., "Conditions of formation and crystallization kinetics of highly oxidized pseudotachylytes from the High Tatras (Slovakia) ", *Journal of Petrology* 44 (2003) 901-927.

20. Haggerty S. E., "Oxide textures-A mini-atlas. In: Lindsley D.H. (Ed): Oxide minerals: Petrologic and magnetic significance", *Review in Mineralogy* 25 (1991) 129-137.
21. Pasteris J. D., "Relationships between temperature and oxygen fugacity among Fe-Ti oxides in two regions of the Duluth complex", *Canadian Mineralogist* 23 (1985) 111-127.
22. Gennrsorl J. R., Tevron L. A., "Petrogenesis of pyroxene-oxide intergrowths from kimberlite and cumulate rocks: co-precipitation or exsolution? ", *American Mineralogist* 66 (1981) 723-740.
23. Whitney D. L., Evans B. V., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American Mineralogist* 95 (2010) 185-187.
24. Buddington A., Lindsley D., "Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents", *Journal of Petrology* 5 (1964) 310-357.
25. Mondal R., Baidya T. Kr., "Titaniferous Magnetite Deposits Associated with Archean Greenstone Belt in the East Indian Sheild", *Earth Sciences* 4(4-1) (2015) 15-30.
26. Chevallier R., Bolfa J., Mathieu S., "Titanomagnetites et ilmenites ferromagnetiques", *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie* 78 (1995) 307-346.
27. Spencer K. J., Lindsley D. H., "A solution model for coexisting iron-titanium oxides", *American Mineralogist* 66 (11-12) (1981) 1189-1201.
28. O'Reilly W., "Rock and mineral magnetism", Blackie, Glasgow and London; Chapman and Hall, New York, (1984) 220.
29. Dunn J. A., Dey A. K., "Vanadium bearing titaniferous magnetite iron ores in Singhbhum and Mayurbhanj, India. Trans", *Mining, Geological, and Metallurgical Institute of India* 3 (1937) 117-194.
30. Haggerty S.E., "Opaque mineral oxides in terrestrial igneous rocks, In *Review in Mineralogy-Oxide Minerals*", Mineralogical Society of America. ed. Douglas Rumble 3 (1976) 101-299.
31. Powell R., Powell M., "Geothermometry and oxygen barometry using coexisting iron-titanium oxides: a reappraisal", *Mineralogical Magazine* 41 (1977) 257-263.
32. Chou I-Ming., "Calibration of oxygen buffers at elevated P and T using the hydrogen fugacity sensor", *American Mineralogist* 63 (1978) 690-703.
33. Eugster H. P., Wones D. R., "Stability relations of the ferruginous biotite, annite", *Petrology* 3 (1962) 82-125.

34. Oliver G. J. H., "Ilmenite-magnetite geothermometry and oxygen barometry in granulite and amphibolite facies gneisses from Doubtful Sound Fiordland, New Zealand", *Lithos* 71 (1978) 147-153.
35. Schmidt M. W., "Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer", *Contribution of Mineralogy and Petrology* 110 (1992) 304-310.
36. Bishop F. C., "The distribution of Fe^{2+} and Mg between coexisting ilmenite and pyroxene with application to geothermometry", *American Journal of Science* 280 (1980) 46-77.
37. Lindsley D. H., "Pyroxene thermometry", *American Mineralogist* 68 (1983) 477-493.