



بررسی ترکیب و نقش عناصر کمیاب در شکل‌گیری کانسنگ مگنتیتی توده نفوذی نامن، غرب سبزوار به روش LA-ICP-MS

سیدعلی مظهري*

دانشگاه پیام نور، گروه علمی زمین‌شناسی، تهران ۴۹۶۷-۱۹۳۹۵، ایران

(دریافت مقاله: ۹۵/۱۰/۱۸، نسخه نهایی: ۹۵/۱۲/۲۴)

چکیده: سنگ‌های بازی توده نفوذی نامن در غرب سبزوار به‌صورت هورنبلند گابروهای انباشتی ظاهر می‌شوند. یکی از رخنمون‌های این واحد، حاوی قطعات کانسنگ مگنتیتی است. با وجود ویژگی‌های مشابه کانی‌شناسی، هورنبلند گابروهای حاوی کانسنگ (MHG) از نظر ترکیب عناصر کمیاب و نوع مواد فرار تفاوت قابل ملاحظه‌ای با سایر هورنبلند گابروها (HG) دارد. تجزیه عناصر کمیاب به روش LA-ICP-MS بر بلورهای مگنتیتی نمونه‌های MHG، HG و کانسنگ (MG) نشان می‌دهد که تمام این کانی‌ها در گروه مگنتیتی-های ماگمایی غنی از Ti و V قرار می‌گیرند. مگنتیت‌های MG و MHG دارای ترکیب مشابه هستند، اما ترکیب عناصر کمیاب در مگنتیت‌های نمونه HG کاملاً متمایز از آنهاست. مگنتیت‌های HG غنی از Mg، Al، Ga، Y، Nb و REE هستند در حالیکه این کانی‌ها در MHG و MG از نظر میزان Ti، V، Cr، Mn و Zn به نسبت غنی‌تر هستند. الگوی REE در این گروه نیز متفاوت است به طوریکه مگنتیت‌های MG و MHG الگوی چهاروجهی با تهی‌شدگی LREE $[(La/Yb)_N = 0.46]$ نشان می‌دهند؛ در حالیکه مگنتیت‌های HG غنی‌شدگی نسبی عناصر خاکی‌نادر سبک (LREE) به سنگین (HREE) با شیب ملایم $[(La/Yb)_N = 2.67]$ دارند. ترکیب داده‌های عناصر کمیاب مگنتیتی و شیمی سنگ کل مؤید نقش جدایش فاز فرار در طی تحول ماگمای گابرویی توده‌ی نامن است.

واژه‌های کلیدی: مگنتیتی، هورنبلند گابرو، عناصر کمیاب، توده نامن، سبزوار.

مقدمه

با پیشرفت فناوری و ابداع روش‌های نوین برای تعیین عناصر کمیاب کانی‌ها (به ویژه طیف‌سنجی جرم گسیل پلاسمای جفت شده القایی با جدایش لیزری LA-ICP-MS)، استفاده از ترکیب این عناصر در بررسی‌های مختلف سنگ‌شناسی و کانه-نگاری افزایش یافته است. این بررسی‌ها دامنه‌ی گسترده‌ای از کانی‌های مافیک [۱، ۲] و فلسی [۳-۵] را شامل می‌شود. مگنتیت (Fe_2O_4) یکی از رایج‌ترین کانی‌های اکسیدی گروه اسپینل است. این کانی در طیف وسیعی از سنگ‌های مختلف ظاهر می‌شود و همچنین به عنوان کانسنگ آهن در کانسارهای ماگمایی، گرمایی و سازندهای آهن نواری (BIF) تشکیل

می‌گردد [۶]. تحقیقات مختلف نشان داده است که ترکیب عناصر کمیاب در اکسیدهای آهن نقش مهمی در درک خاستگاه انواع کانی‌زایی دارد [۷، ۸]. قطعات مدور کانسنگ مگنتیتی به صورت پراکنده در رخنمون‌هایی از هورنبلند گابروهای مجموعه توده‌های نفوذی نامن در غرب سبزوار مشاهده می‌شوند. بررسی‌های پیش‌نشان می‌دهد که ترکیب عناصر کمیاب در سنگ‌های حاوی کانسنگ متفاوت از هورنبلند گابروهای بدون کانسنگ است [۹]. در این تحقیق عناصر کمیاب موجود در اکسیدهای آهن هورنبلند گابروهای حاوی کانسنگ (MHG)، هورنبلند گابروهای بدون کانسنگ (HG) و خود کانسنگ (MG) با روش

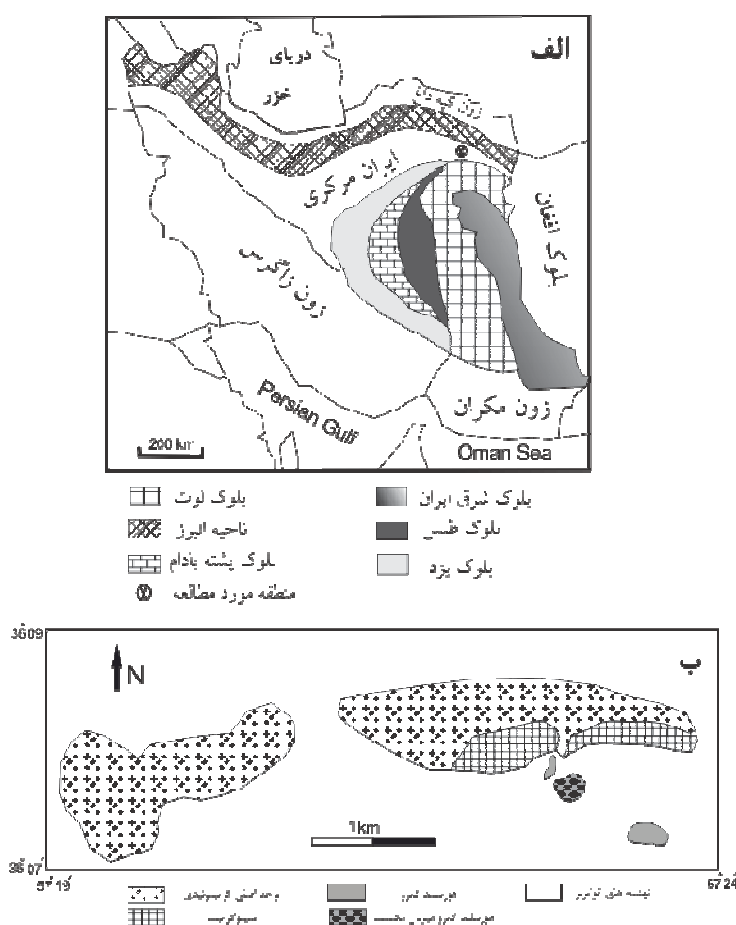
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۱۴۴۴۴۴۰۱۲، پست الکترونیکی: ali54894@yahoo.com

LA-ICP-MS تعیین گردید. در ادامه اختلاف ترکیب عناصر کمیاب مگنتیت در این نمونه‌ها مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نوع کانی‌زایی با استفاده از نمودارهای متمایز کننده تعیین شد. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که ترکیب عناصر کمیاب مگنتیت می‌تواند کمکی مؤثر در شناخت بهتر فرایندهای کانی‌زایی داشته باشد.

موقعیت زمین شناسی

ناحیه مورد بررسی در پهنه سبزوار (شمال شرقی ایران) و در قلمرو منطقه ایران مرکزی واقع شده است (شکل ۱ الف) [۱۰]. بیشترین وسعت پهنه سبزوار شامل کمربند افیولیتی بزرگی است که به صورت نواری با روند تقریبی شمال‌غربی - جنوب - شرقی در حاشیه شمال شرقی ایران مرکزی واقع شده است. این مجموعه افیولیتی شامل کلیه بخش‌های یک دنباله افیولیتی است که البته کاملاً زمین‌ساخت شده و بین بخش‌های مختلف انقطاع ایجاد شده است. افیولیت سبزوار شامل بخش گوشته‌ای سرپانتینی شده و دنباله‌ای سنگ‌های رسوبی - شیمیایی، دایک -

های دیابازی و گابروهای لایه‌ای و توده‌ای است که سن کرتاسه پسین تا پالئوسن را به آن نسبت داده‌اند [۱۱، ۱۲]. علاوه بر این، سنگ‌های بازی دگرگون شده (شیست آبی، شист سبز و آمفیبولیت) در اندازه‌های مختلف نیز در مجموعه افیولیتی ظاهر می‌شوند. این سنگ‌ها در کرتاسه پیشین (آلبین) دچار بیشترین دگرگونی شده‌اند [۱۳]. علاوه بر سنگ‌های آذرین مرتبط با دنباله افیولیتی که در پهنه سبزوار ظاهر شده‌اند، وسعت قابل ملاحظه‌ای از این ناحیه توسط سنگ‌های ماگمایی غیرافیولیتی پوشیده شده است (شکل ۱ الف). این سنگ‌ها یا به صورت توده‌های نفوذی، نیمه عمیق و روانه‌های خروجی در نوار مجموعه افیولیتی رخنمون یافته‌اند [۱۱، ۱۴] و یا در خارج از نوار افیولیتی (در نیمه جنوبی پهنه سبزوار) قرار گرفته‌اند [۱۵، ۱۶]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از سنگ‌های آتشفشانی ماهیت آداکیتی دارند [۱۷]. توده‌های ماگمایی نیز متنوع بوده و شامل فازهای مختلف فلسی و مافیک هستند [۹].



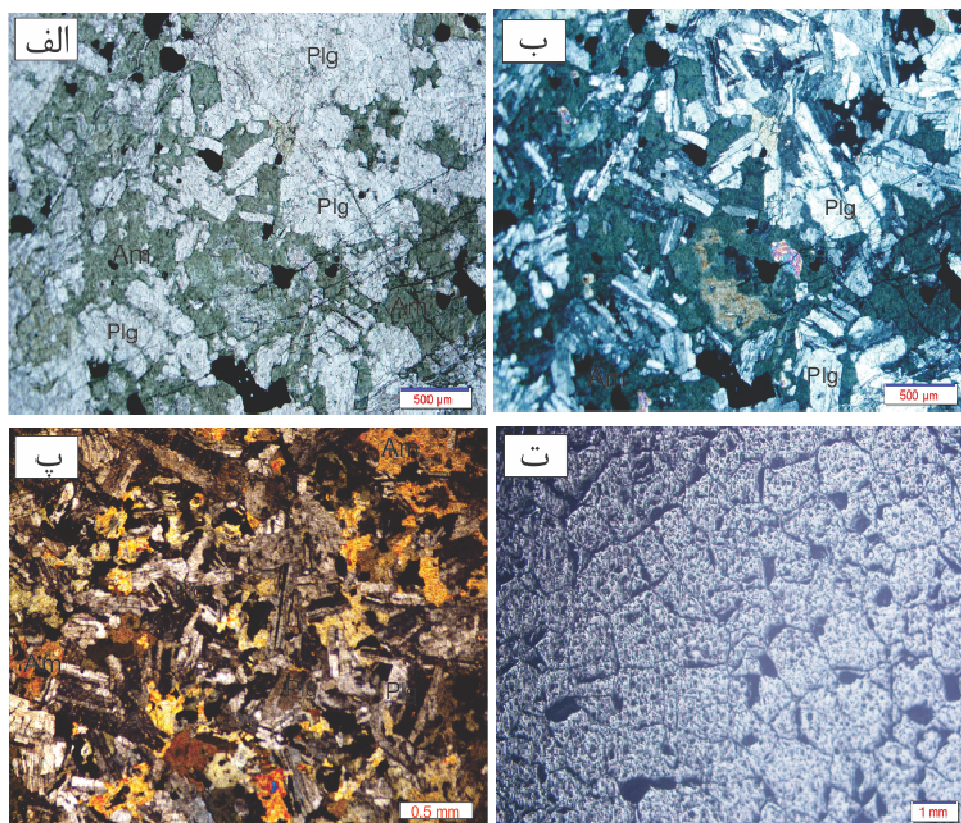
شکل ۱ الف) موقعیت محدوده مورد بررسی در نقشه زمین شناسی ایران (برگرفته از مرجع [۱۰]). ب) نقشه ساده توده نفوذی نامن.

و نمونه‌های فاقد کانسنگ (HG) از نظر ویژگی‌های سنگ‌نگاری مشابه هستند. کلیه سنگ‌های گابرویی دارای بافت دانه‌ای و انباشتی هستند (شکل ۲). پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی است که به صورت شکلدار و نیمه شکلدار ظاهر می‌شود. آمفیبول کانی اصلی دیگری است که بیشتر به شکل هورنبلندهای سبز رنگ در مقاطع نازک دیده می‌شود و معمولاً فضای بین سایر بلورها را دربر می‌گیرد. اکسیدهای آهن به صورت کانی کدر در تمام نمونه‌های گابرویی قابل مشاهده هستند. مقدار این کانی‌ها در نمونه‌های MHG (شکل‌های ۲ الف و ب) بیش از ۵ درصد حجمی و در گابروهای HG (شکل ۲ پ) کمتر از این مقدار است. کانی‌های فرعی گابروها شامل تیتانیت، آپاتیت و زیرکن هستند. کانسنگ مگنتیت در مقاطع صیقلی تقریباً به طور کامل از کانی مگنتیت تشکیل شده است و بیشتر به صورت دانه‌های شکلدار مشاهده می‌شود (شکل ۲ ت). البته مگنتیت به صورت ذرات ریز بدون شکل نیز دیده می‌شود و شکاف بین دانه‌های مگنتیت اغلب توسط ذرات فلدسپار پر می‌شود.

توده نفوذی نامن در ۳۵ کیلومتری غرب شهر سبزوار واقع شده و از سه فاز ماگمایی مختلف شامل دو واحد گرانیتوئیدی و یک واحد بازی، تشکیل شده است [۹]. گرانیتوئیدها شامل دو نوع A و I هستند و به ترتیب در اثر ذوب سنگ‌های فلسیک و آمفیبولیت‌ها در یک محیط فرورانشی تشکیل شده‌اند [۹]. سنگ‌های مافیک در جنوب توده ظاهر شده‌اند و دارای ترکیب هورنبلند گابرویی با بافت انباشتی متشکل از هورنبلند و پلاژیوکلاز هستند. در یکی از رخنمون‌های فاز مافیک کانسنگ مگنتیت به صورت قطعات مدور قابل مشاهده است (شکل ۱ ب) که فعالیت معدنی محدودی نیز بر روی این رخنمون انجام گرفته است. سایر رخنمون‌های سنگ‌های مافیک فاقد کانسنگ مگنتیت هستند.

سنگ‌نگاری

آمفیبول و پلاژیوکلاز کانی‌های اصلی سازنده فاز بازی توده نامن هستند. این دو کانی بیش از ۸۰ درصد حجم سنگ‌های بازی را تشکیل داده‌اند و بنابراین از این واحد به نام "هورنبلند گابرو" یاد می‌شود. هورنبلند گابروهای حاوی کانسنگ (MHG)



شکل ۲ ویژگی‌های سنگ‌نگاری نمونه‌های مورد بررسی. نمونه MHG در نور PPL (الف) و XPL (ب). (پ) نمایی از بافت نمونه HG در نور PPL. (ت) بافت کانسنگ (MG) در نور بازتابی. پلاژیوکلاز = Plg؛ آمفیبول = Am.

روش انجام پژوهش

قرار گرفت. آئروسول ایجاد شده تحت تأثیر یک گاز حامل هلیومی قرار گرفت و سپس قبل از ورود به دستگاه ICP-MS و برای بدست آوردن شدت یون‌های منفرد، از طریق یک مبدل T با یک گاز آرگون مخلوط شد. جزئیات شرایط انجام تجزیه در مرجع [۷] تشریح شده است. در نهایت، شرایط تشکیل کانسنگ مگنتیت با توجه به داده‌های پیشین و نتایج حاصل از LA-ICP-MS، مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

نتایج

نتایج به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. بسیاری از عناصر کمیاب می‌توانند در ساختار بلوری نوع اسپینل جای بگیرند [۶، ۱۸]. تمرکز بسیاری از عناصر کمیاب (شامل Mg, Nb, Y, Sr, Ga, Zn, Ni, Co, Mn, Cr, V, Ti, Sc, Al, Ba و REE) در اکسیدهای مورد بررسی در توده نفوذی نامن بالاتر از حد تشخیص دستگاه است. در ادامه نتایج بدست آمده در مورد هر نمونه تشریح می‌شود.

چنانکه اشاره شد، در بررسی پیشین روی توده نامن، ویژگی‌های سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ‌های نفوذی ارائه شده است [۹]. با توجه به نتایج حاصل از آن تحقیق، سه نمونه نازک صیقلی از واحدهای MHG، HG و کانسنگ (MG) تهیه شد و پس از بررسی‌های میکروسکوپیکی، تجزیه LA-ICP-MS بر روی کانی‌های اکسیدی آنها صورت گرفت. در مجموع ۲۷ بلور مگنتیت در نمونه‌های مورد بررسی به روش LA-ICP-MS و برای تعیین عناصر کمیاب تجزیه شدند. این بررسی‌ها در موسسه زمین‌شیمی فرهنگستان علوم در شهر جیانگ چین و با استفاده از باریکه لیزری تولید شده توسط دستگاهی شامل کمپرسور لیزری مدل Coherent GeoLasPro 193-nm به همراه یک Agilent 7700x ICP-MS انجام گرفت. پس از ۲۰ ثانیه کنترل با gas blank، سطوح نمونه به مدت حدود ۴۰ ثانیه تحت ابلیشن ۱۶۰ تب متوالی (4 Hz) در اندازه ۴۴

جدول ۱ نتایج تجزیه LA-ICP-MS برای کانی مگنتیت در نمونه‌های مورد بررسی. مقادیر بر حسب ppm ارائه شده‌اند.

	MHG-1	MHG-2	MHG-3	MHG-4	MHG-5	MHG-6	MHG-7	MHG-8	MG-1	MG-2	MG-3	MG-4	MG-5	MG-6
Mg	۷۲۳۰	۶۵۸۲	۵۳۹۲	۸۴۰۷	۷۷۲۰	۶۵۱۴	۷۱۹۶	۵۹۶۰	۶۱۲۳	۶۸۶۶	۷۲۳۹	۵۴۷۰	۶۵۴۰	۷۸۰۴
Al	۳۵۷۰	۴۳۴۵	۲۸۶۸	۲۷۴۹	۳۳۴۰	۴۰۶۸	۲۵۳۸	۲۲۱۸	۳۲۵۱	۲۶۴۲	۲۵۴۹	۳۴۰۵	۴۲۸۳	۳۹۶۰
Sc	۹۸۳	۷۵۶	۸۴۹	۴۶۰	۵۳۲	۴۸۹	۹۲۱	۷۵۰	۳۶۹	۸۵۷	۵۸۲	۴۹۵	۳۸۰	۱۰۲۸
Ti	۱۹۷۵۶	۱۹۲۰۷	۱۸۷۳۲	۱۸۸۴۶	۱۹۰۲۳	۱۸۳۲۴	۱۸۸۲۶	۱۸۶۱۹	۱۸۹۲۵	۱۹۳۳۴	۱۸۸۰۰	۱۹۹۶۰	۱۸۲۵۹	۱۹۲۱۶
V	۴۲۰۸	۴۱۵۳	۴۱۶۷	۴۰۷۵	۴۲۲۶	۴۳۰۲	۴۰۹۶	۳۹۸۴	۴۰۲۹	۴۱۰۸	۴۱۷۳	۳۹۲۰	۴۱۸۵	۴۰۷۰
Cr	۱۰۲۳۸	۱۰۵۸۴	۹۳۷۵	۹۶۶۰	۱۰۱۵۵	۹۵۱۹	۹۷۱۳	۹۹۰۷	۹۲۶۴	۱۰۴۳۹	۱۰۴۲۵	۱۰۳۷۷	۹۳۱۶	۹۲۵۰
Mn	۹۳۸	۸۵۶	۱۰۳۹	۹۰۲	۸۸۴	۹۳۷	۱۱۲۰	۸۱۸	۹۰۷	۷۴۶	۱۰۷۵	۸۴۴	۷۹۰	۱۱۴۸
Co	۵۲۳۱	۶۳۴۵	۶۲۰۰	۵۹۷۴	۶۱۰۴	۶۵۴۷	۴۹۸۰	۵۶۶۲	۵۷۹۳	۶۶۰۸	۶۴۷۵	۶۳۲۸	۵۱۵۳	۵۲۶۷
Ni	۱۰۲۶۴	۱۰۱۵۵	۱۰۳۳۷	۱۰۳۶۱	۱۰۱۹۰	۹۶۶۸	۹۹۲۶	۱۰۵۲۲	۱۰۴۷۰	۹۳۲۹	۱۰۲۵۴	۱۰۳	۹۶۶۶	۹۴۷۵
Zn	۷۷۳	۸۲۹	۶۵۸	۹۰۸	۷۵۱	۱۰۳۶	۸۶۰	۹۷۲	۸۵۵	۶۹۷	۱۰۸۱	۷۵۴	۸۰۹	۱۱۲۶
Ga	۰۹۷	۰۸۱	۱۰۴	۱۲۶	۰۹۴	۱۶۵	۱۳۸	۱۵۳	۱۲۹	۱۷۸	۱۶۸	۱۱۲	۰۹۹	۱۳۸
Sr	۰۶۵	۰۳۹	۰۲۷	۰۴۷	۰۷۱	۰۱۹	۰۵۵	۰۶۳	۰۷۵	۰۴۸	۰۲۳	۰۳۹	۰۵۵	۰۵۳
Y	۰۲۰۸	۰۱۷۳	۰۲۴۰	۰۲۶۵	۰۱۹۲	۰۲۳۶	۰۲۵۹	۰۲۰۴	۰۲۲۵	۰۲۰۳	۰۲۶۸	۰۱۹۷	۰۲۵۱	۰۲۴۳
Nb	۳۲۵	۲۴۲	۲۸۷	۴۳۸	۳۷۵	۲۹۴	۴۹۲	۲۹۶	۴۴۰	۲۹۱	۳۲۹	۵۳۵	۲۷۴	۴۱۵
Ba	۲۳۵	۱۸۷	۲۷۳	۳۹۴	۲۲۶	۲۵۲	۲۱۱	۲۵۸	۳۱۸	۳۲۹	۲۸۰	۲۶۷	۲۵۴	۱۹۶
La	۰۰۴۳	۰۰۵۲	۰۰۳۹	۰۰۴۷	۰۰۲۷	۰۰۴۰	۰۰۴۶	۰۰۴۸	۰۰۴۱	۰۰۴۸	۰۰۴۹	۰۰۴۶	۰۰۴۵	۰۰۴۲
Ce	۰۱۸۹	۰۲۲۷	۰۱۷۰	۰۲۰۸	۰۱۶۴	۰۱۷۶	۰۲۰۲	۰۲۱۲	۰۱۸۱	۰۲۰۹	۰۲۱۶	۰۲۰۳	۰۲۰۰	۰۱۸۴
Pr	۰۰۹۵	۰۱۱۴	۰۰۸۶	۰۱۰۵	۰۰۸۳	۰۰۸۸	۰۱۰۲	۰۱۰۶	۰۰۹۱	۰۱۰۵	۰۱۰۹	۰۱۰۲	۰۱۰۰	۰۰۹۳
Nd	۰۳۹۶	۰۴۷۵	۰۳۵۶	۰۴۳۶	۰۳۴۵	۰۳۶۸	۰۴۲۴	۰۴۴۳	۰۳۸۰	۰۴۳۸	۰۴۵۳	۰۴۲۶	۰۴۱۹	۰۳۸۶
Sm	۰۱۹۴	۰۲۳۳	۰۱۷۵	۰۲۱۳	۰۱۶۹	۰۱۸۰	۰۲۰۸	۰۲۱۷	۰۱۸۶	۰۲۱۵	۰۲۲۲	۰۲۰۹	۰۲۰۵	۰۱۸۹
Eu	۰۰۱۵	۰۰۱۸	۰۰۱۴	۰۰۱۷	۰۰۱۳	۰۰۱۴	۰۰۱۶	۰۰۱۷	۰۰۱۴	۰۰۱۷	۰۰۱۷	۰۰۱۶	۰۰۱۶	۰۰۱۵
Gd	۰۱۰۵	۰۱۲۶	۰۰۹۵	۰۱۱۶	۰۰۹۱	۰۰۹۸	۰۱۱۲	۰۱۱۸	۰۱۰۱	۰۱۱۶	۰۱۲۰	۰۱۱۳	۰۱۱۱	۰۱۰۲
Tb	۰۰۱۳	۰۰۱۶	۰۰۱۲	۰۰۱۴	۰۰۱۱	۰۰۱۲	۰۰۱۴	۰۰۱۵	۰۰۱۲	۰۰۱۴	۰۰۱۵	۰۰۱۴	۰۰۱۴	۰۰۱۳
Dy	۰۰۹۸	۰۱۱۸	۰۰۸۸	۰۱۰۸	۰۰۸۵	۰۰۹۱	۰۱۰۵	۰۱۱۰	۰۰۹۴	۰۱۰۹	۰۱۱۲	۰۱۰۵	۰۱۰۳	۰۰۹۵
Ho	۰۰۱۳	۰۰۱۶	۰۰۱۲	۰۰۱۴	۰۰۱۱	۰۰۱۲	۰۰۱۴	۰۰۱۵	۰۰۱۲	۰۰۱۴	۰۰۱۵	۰۰۱۴	۰۰۱۴	۰۰۱۳
Er	۰۱۹۸	۰۲۳۸	۰۱۷۸	۰۲۱۸	۰۱۷۲	۰۱۸۴	۰۲۱۲	۰۲۲۲	۰۱۹۰	۰۲۱۹	۰۲۲۶	۰۲۱۳	۰۲۰۹	۰۱۹۳
Tm	۰۰۴۵	۰۰۵۴	۰۰۴۱	۰۰۵۰	۰۰۳۹	۰۰۴۲	۰۰۴۸	۰۰۵۰	۰۰۴۳	۰۰۵۰	۰۰۵۱	۰۰۴۸	۰۰۴۸	۰۰۴۴
Yb	۰۰۶۳	۰۰۷۶	۰۰۵۷	۰۰۶۹	۰۰۵۵	۰۰۵۹	۰۰۶۷	۰۰۷۱	۰۰۶۰	۰۰۷۰	۰۰۷۲	۰۰۶۸	۰۰۶۷	۰۰۶۱
Lu	۰۰۱۲	۰۰۱۴	۰۰۱۱	۰۰۱۳	۰۰۱۰	۰۰۱۱	۰۰۱۳	۰۰۱۴	۰۰۱۲	۰۰۱۳	۰۰۱۴	۰۰۱۳	۰۰۱۳	۰۰۱۲
ΣREE	۱،۴۷۹	۱،۷۷۵	۱،۳۳۱	۱،۶۲۷	۱،۲۸۷	۱،۳۷۵	۱،۵۸۳	۱،۶۵۶	۱،۴۲۰	۱،۶۳۷	۱،۶۹۲	۱،۵۹۰	۱،۵۶۲	۱،۴۴۱

ادامه جدول ۱

	MG-7	MG-8	MG-9	MG-10	MG-11	HG-1	HG-2	HG-3	HG-4	HG-5	HG-6	HG-7	HG-8
Mg	۵۵٫۷۹	۹۳٫۷۵	۱۱۲٫۵۹	۹۴٫۶۸	۹۷٫۵۳	۵۵۷٫۲۵	۶۳۴٫۳۷	۴۹۶٫۶۴	۷۲۵٫۳۹	۵۰۸٫۹۲	۶۳۹٫۱۰	۷۰۴٫۸۱	۶۸۳٫۵۸
Al	۳۵٫۱۲	۲۳٫۹۷	۴۱٫۰۶	۳۱٫۰۶	۳۸٫۸۰	۱۲۴٫۷۵	۱۷۳٫۲۸	۱۵۲٫۹۶	۱۶۵٫۷۰	۱۷۹٫۲۳	۱۶۰٫۶۴	۱۴۸٫۰۷	۱۳۹٫۲۹
Sc	۱۱٫۳۱	۸٫۳۰	۶٫۳۵	۶٫۷۹	۸٫۱۰	۲٫۶۹	۷٫۲۵	۵٫۴۳	۱۰٫۲۲	۳٫۹۶	۹٫۹۵	۸٫۷۰	۹٫۴۳
Ti	۱۸۶۴۶	۱۹۱۵۰	۱۸۳۴۳	۱۹۰۲۸	۱۸۴۹۰	۱۵۶۰۰	۱۴۹۳۵	۱۵۳۷۲	۱۴۵۳۴	۱۵۱۲۰	۱۴۷۰۳	۱۵۴۳۰	۱۴۹۶۵
V	۴۰٫۸۲	۴۲۳۵	۳۹۵۸	۴۱۸۶	۴۰۰۷	۲۸۴۰	۲۷۲۵	۲۸۶۱	۲۴۱۶	۲۵۳۲	۲۳۰۹	۲۳۶۴	۲۲۹۷
Cr	۹۶٫۴۸	۹۵٫۹۰	۱۰۲٫۷۳	۱۰۱٫۳۲	۹۴٫۸۱	۴۰٫۲۰	۴۳٫۷۵	۴۸٫۳۳	۴۵٫۰۴	۴۶٫۲۹	۴۹٫۷۰	۴۷٫۲۶	۴۵٫۹۱
Mn	۹۹۵	۱۰۰۸	۹۶۰	۸۵۱	۱۰۷۸	۴۵۴	۳۷۳	۵۳۸	۴۲۲	۳۹۵	۵۷۴	۴۹۷	۵۰۴
Co	۶۲٫۵۴	۵۷٫۹۶	۵۰٫۴۹	۶۱٫۰۰	۶۵٫۳۵	۳۳٫۰۴	۳۲٫۲۸	۳۱٫۶۴	۲۵٫۷۷	۲۶٫۳۴	۳۱٫۲۷	۲۸٫۹۸	۲۵٫۲۵
Ni	۱۰۵٫۵۳	۱۰۳٫۰۵	۹۳٫۸۶	۱۰۱٫۲۲	۹۸٫۶۴	۹۷٫۵۲	۱۰۲٫۵۱	۱۰۳٫۳۷	۱۰۵٫۴۸	۹۹٫۵۰	۱۰۰٫۳۹	۱۰۲٫۲۶	۱۰۴٫۵۵
Zn	۸۷۸	۱۰۴۴	۷۹۰	۸۰۵	۱۰۵۹	۳۶۳	۳۰۰	۴۱۴	۳۴۴	۳۸۹	۳۴۲	۲۷۹	۴۳۲
Ga	۱٫۲۴	۱٫۱۶	۰٫۸۹	۱٫۹۳	۱٫۴۱	۴٫۱۳	۵٫۷۰	۵٫۳۸	۳٫۵۷	۳٫۱۷	۴٫۴۲	۳٫۹۷	۳٫۷۱
Sr	۰٫۲۹	۰٫۳۷	۰٫۷۷	۰٫۶۲	۰٫۶۸	۰٫۵۳	۰٫۲۲	۰٫۸۲	۰٫۳۴	۰٫۴۹	۰٫۶۵	۰٫۴۴	۰٫۷۶
Y	۰٫۲۱۵	۰٫۲۲۴	۰٫۲۳۰	۰٫۱۸۴	۰٫۲۲۶	۱٫۴۴	۱٫۷۷۳	۱٫۹۴۳	۱٫۵۳	۱٫۶۹	۱٫۵۲۳	۲٫۰۱۱	۱٫۴۷۸
Nb	۲٫۸۱	۳٫۷۰	۵٫۱۸	۲٫۸۹	۳٫۵۳	۲۸٫۶۲	۴۶٫۵۵	۲۳٫۸۴	۳۶٫۱۱	۲۴٫۴۵	۳۲٫۱۹	۴۵٫۰۷	۲۵٫۱۴
Ba	۲٫۴۹	۲٫۹۱	۳٫۴۵	۲٫۰۹	۲٫۱۶	۳٫۱۷	۳٫۵۴	۲٫۸۳	۲٫۸۵	۲٫۶۳	۲٫۷۶	۳٫۰۲	۲٫۶۴
La	۰٫۰۴۶	۰٫۰۴۲	۰٫۰۳۸	۰٫۰۴۴	۰٫۰۳۸	۴٫۴۶۳	۴٫۰۸	۴٫۶۷۵	۴٫۲۵۰	۳٫۸۲۵	۴٫۱۶۵	۳٫۹۵۳	۴٫۵۴۸
Ce	۰٫۲۰۴	۰٫۱۸۴	۰٫۱۷۰	۰٫۱۹۴	۰٫۱۶۹	۱۳٫۹۶۵	۱۲٫۷۶۸	۱۴٫۶۳	۱۳٫۳۰	۱۱٫۹۷۰	۱۳٫۰۳۴	۱۲٫۳۶۹	۱۴٫۲۳۱
Pr	۰٫۱۰۳	۰٫۰۹۲	۰٫۰۸۵	۰٫۰۹۸	۰٫۰۸۵	۲٫۳۲۱	۲٫۱۲۲	۲٫۴۳۱	۲٫۲۱۰	۱٫۹۸۹	۲٫۱۶۶	۲٫۰۵۵	۲٫۳۶۵
Nd	۰٫۴۲۸	۰٫۳۸۵	۰٫۳۵۴	۰٫۴۰۷	۰٫۳۵۴	۱۲٫۱۸۰	۱۱٫۱۳۶	۱۲٫۷۶۰	۱۱٫۶۰	۱۰٫۴۴۰	۱۱٫۳۶۸	۱۰٫۷۸۸	۱۲٫۴۱۲
Sm	۰٫۲۱۰	۰٫۱۸۹	۰٫۱۷۴	۰٫۲۰۰	۰٫۱۷۴	۴٫۳۴۷	۳٫۹۷۴	۴٫۵۵۴	۴٫۱۴۰	۳٫۷۲۶	۴٫۰۵۷	۳٫۸۵۰	۴٫۴۳۰
Eu	۰٫۰۱۶	۰٫۰۱۵	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۵	۰٫۰۱۳	۰٫۰۵۹	۰٫۰۵۴	۰٫۰۶۲	۰٫۰۵۶	۰٫۰۵۰	۰٫۰۵۵	۰٫۰۵۲	۰٫۰۶۰
Gd	۰٫۱۱۳	۰٫۱۰۲	۰٫۰۹۴	۰٫۱۰۸	۰٫۰۹۳	۴٫۰۶۴	۳٫۷۱۵	۴٫۲۵۷	۳٫۸۷	۳٫۴۸۳	۳٫۷۹۳	۳٫۵۹۹	۴٫۱۴۱
Tb	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۲	۰٫۷۹۳	۰٫۷۲۵	۰٫۸۳۱	۰٫۷۵۵	۰٫۶۸۰	۰٫۷۴۰	۰٫۷۰۲	۰٫۸۰۸
Dy	۰٫۱۰۶	۰٫۰۹۵	۰٫۰۸۸	۰٫۱۰۱	۰٫۰۸۷	۵٫۱۶۶	۴٫۷۲۳	۵٫۴۱۲	۴٫۹۲۰	۴٫۴۲۸	۴٫۸۲۲	۴٫۵۷۶	۵٫۲۶۴
Ho	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۲	۰٫۸۳۴	۰٫۷۶۲	۰٫۸۷۳	۰٫۷۹۴	۰٫۷۱۵	۰٫۷۷۸	۰٫۷۳۸	۰٫۸۵۰
Er	۰٫۲۱۴	۰٫۱۹۲	۰٫۱۷۷	۰٫۲۰۴	۰٫۱۷۷	۱٫۹۹۵	۱٫۸۲۴	۲٫۰۹	۱٫۹۰۱	۱٫۷۱۰	۱٫۸۶۲	۱٫۷۶۷	۲٫۰۳۳
Tm	۰٫۰۴۹	۰٫۰۴۴	۰٫۰۴۰	۰٫۰۴۶	۰٫۰۴۰	۰٫۲۱۲	۰٫۱۹۴	۰٫۲۲۲	۰٫۲۰۲	۰٫۱۸۲	۰٫۱۹۸	۰٫۱۸۸	۰٫۲۱۶
Yb	۰٫۰۶۸	۰٫۰۶۱	۰٫۰۵۶	۰٫۰۶۵	۰٫۰۵۶	۱٫۱۱۳	۱٫۰۱۸	۱٫۱۶۶	۱٫۰۶۵	۰٫۹۵۴	۱٫۰۳۹	۰٫۹۸۶	۱٫۱۳۴
Lu	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۱	۰٫۱۱۱	۰٫۱۰۲	۰٫۱۱۷	۰٫۱۰۶	۰٫۰۹۵	۰٫۱۰۴	۰٫۰۹۹	۰٫۱۱۳
ΣREE	۱٫۵۹۷	۱٫۴۳۸	۱٫۳۲۳	۱٫۵۲۱	۱٫۳۲۲	۵٫۱۶۲۱	۴۷٫۱۹۶	۵۴٫۰۷۹	۴۹٫۱۶۳	۴۴٫۲۴۷	۴۸٫۱۸۰	۴۵٫۷۲۲	۵۲٫۶۰۴

Nb و مجموع عناصر خاکی نادر (REE) در این سنگ‌ها به ترتیب در گستره ۱۱۳-۵۴، ۴۳-۲۴، ۹۳-۱۰۸، ۰٫۲۲-۰٫۱۷، ۴۹۲-۲۴۲ و ۱۶۹-۱۳۲ تغییر می‌کند. گستره تمرکز سایر عناصر کمیاب در نمونه‌های MHG و MG عبارت است از: Sc (۱۱۳۱-۳۸۰ ppm)، Ni (۹۳-۱۰۶ ppm)، Sr (۰٫۹۳-۰٫۷۵ ppm) و Ba (۰٫۲۳-۰٫۹۴ ppm).

ترکیب مگنتیت در نمونه هورنبلند گابروی فاقد کانسنگ (HG) دامنه تغییر ترکیب عناصر کمیاب در نمونه HG تفاوت بارزی با MHG و MG نشان می‌دهد (جدول ۱). میزان عناصر

ترکیب مگنتیت در نمونه‌های هورنبلند گابروی حاوی کانسنگ (MHG) و کانسنگ (MG) بلورهای مگنتیت در MHG و MG دارای ترکیب مشابهی هستند و تمرکز بیشتر عناصر کمیاب در آنها مشابه است (جدول ۱). این کانی‌ها دارای مقدار قابل ملاحظه‌ای از عناصر مختلف هستند. تمرکز فلزات به ویژه تیتانیوم (۱۹۹۶۰-۱۸۲۰۰ ppm)، وانادیم (۴۳۰۰-۳۹۰۰ ppm)، کروم (۹۲-۱۰۶ ppm)، منگنز (۷۹۰-۱۱۵۰ ppm)، کبالت (۵۰-۶۶ ppm) و روی (۶۶۰-۱۱۳۰ ppm) در مگنتیت‌های این دو نمونه بالاست. میزان Mg، Al، Ga، Y،

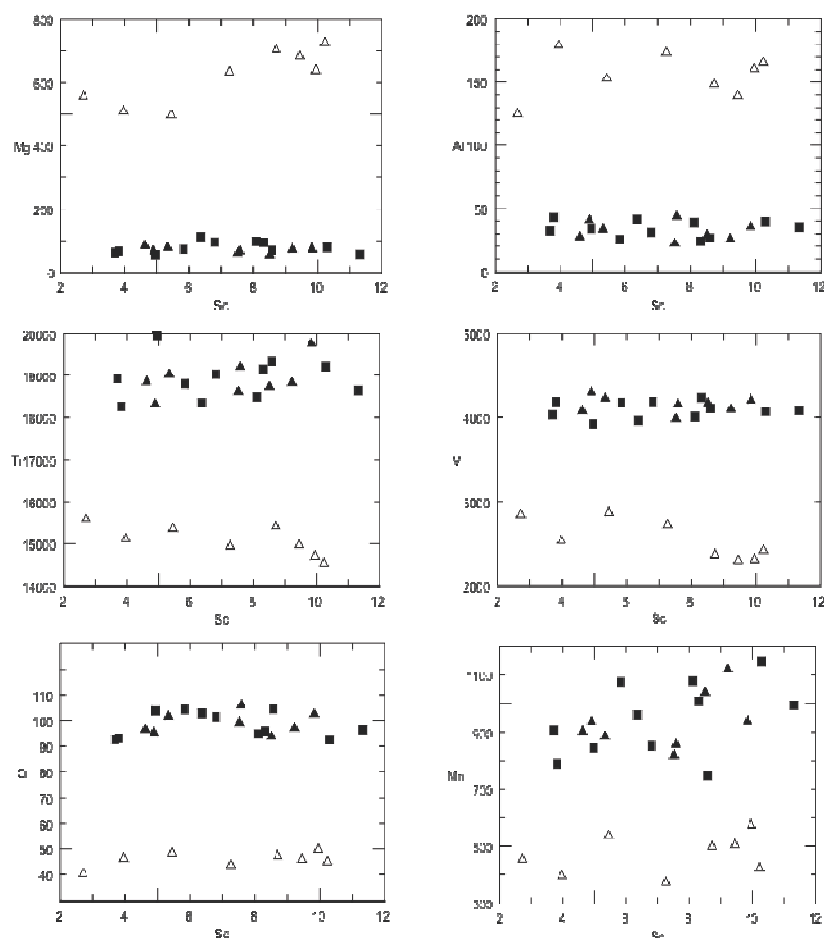
ترکیب متفاوت هستند [۱۸، ۶]. به عنوان مثال بسیاری از محققان معتقدند که مگنتیت ماگمایی غنی از Ti و V است [۱۹، ۸، ۶]. بنابراین، از ترکیب برخی عناصر خاص و نسبت آنها می‌توان برای تعیین جایگاه زمین‌شناسی و نوع مگنتیت استفاده نمود [۲۰، ۶]. با ترسیم ترکیب مگنتیت‌های توده نفوذی نامن بر نمودارهای متمایز کننده‌ی Ti+V نسبت به Al+Mn و Ni/(Cr+Mn) مشخص می‌شود که همه مگنتیت‌ها خاستگاه ماگمایی دارند و در رده مگنتیت‌های Fe-Ti,V قرار می‌گیرند (شکل ۳).

چنانکه در بخش قبل گفته شد ترکیب عناصر کمیاب در بلورهای مگنتیت HG تفاوت قابل ملاحظه‌ای با نمونه‌های MHG و MG دارد. در شکل‌های ۳ و ۴ از نمودارهای دوتایی Sc نسبت به سایر عناصر برای نشان دادن تمایز بین این دو گروه استفاده شده است. انتخاب Sc بدین علت است که گستره‌ی تغییرات این عنصر در هر دو دسته یکسان است.

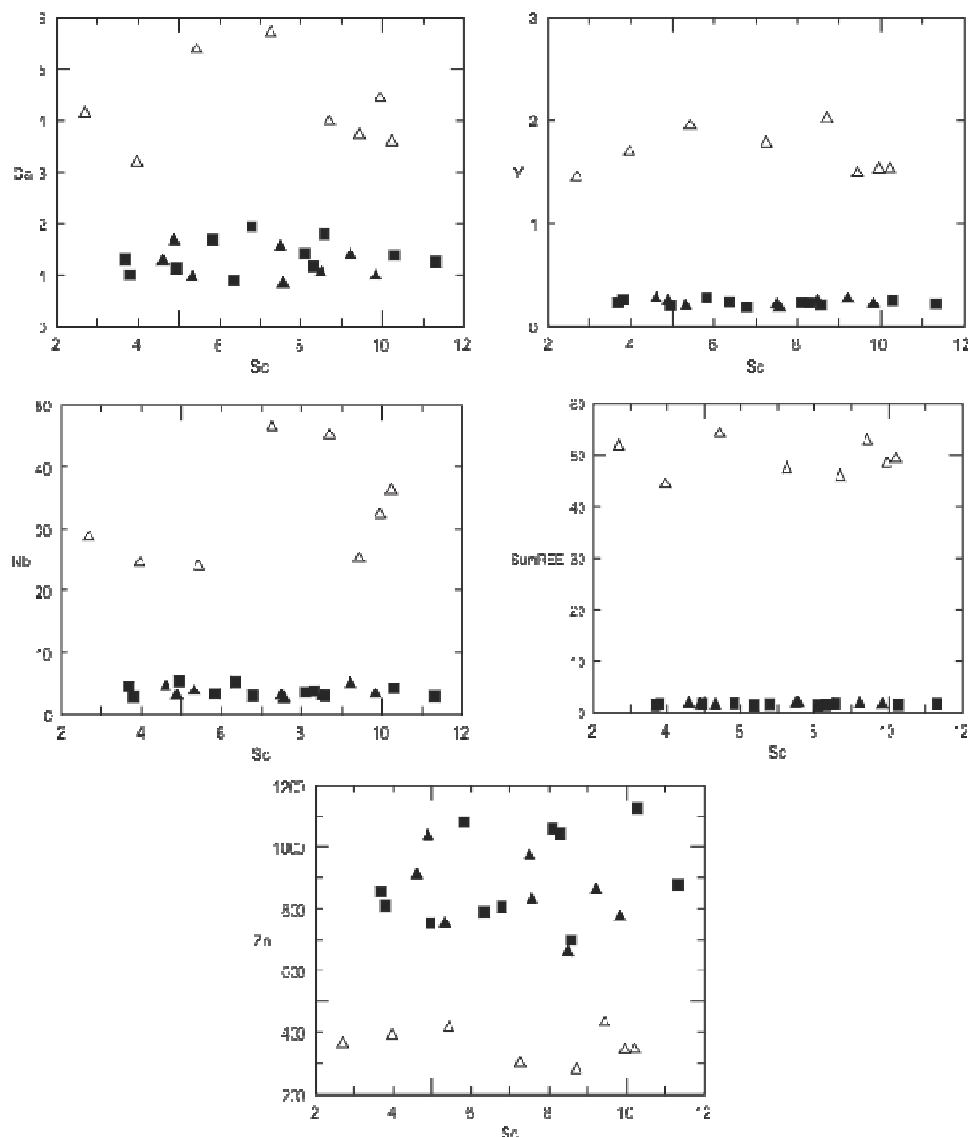
Ti (۱۴۵۰۰-۱۵۶۰۰ ppm)، V (۲۳۰۰-۲۸۶۰ ppm)، Cr (۲۵-۳۳ ppm)، Co (۳۷۰-۵۰۰ ppm)، Mn (۴۰-۴۸ ppm) و Zn (۳۰۰-۴۰۰ ppm) در نمونه HG کمتر از دو نمونه دیگر است. از سوی دیگر بسیاری از عناصر بویژه عناصر با شدت یونی بالا (HFSE) و REE در این نمونه تمرکز ی چندین برابر نمونه‌های MHG و MG دارند: Mg (۵۰۰-۷۳۰ ppm)، Al (۱۲۰-۱۸۰ ppm)، Y (۳۵۸-۵۷۰ ppm)، Ga (۲۰۱-۲۷۰ ppm)، Nb (۲۴-۴۷ ppm) و عناصر خاکی نادر (۵۴ ppm). $\Sigma\text{REE} = ۴۵$ نیز به ترتیب در گستره ۲/۶۹-۱۰/۲۲، ۰/۸۲-۰/۹۷ و ۰/۲۲-۲/۶۳ تغییر می‌کند که در گستره ترکیبی نمونه‌های MHG و MG قرار می‌گیرد.

بحث

تحقیقات مختلف بر روی شیمی عناصر کمیاب مگنتیت در محیط‌های مختلف نشان می‌دهد که انواع کانسنگ‌ها دارای



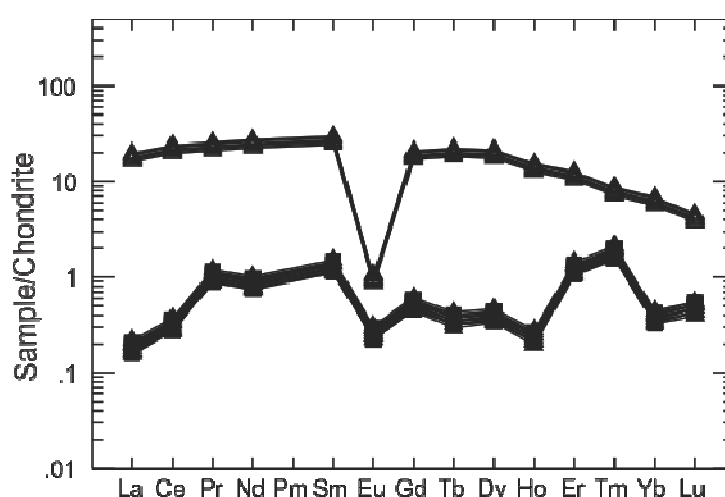
شکل ۳ نمودار دوتایی نشان دهنده‌ی تغییرات ترکیب عناصر کمیاب نسبت به Sc. تمرکز همه عناصر برحسب ppm است. HG = Δ ; MG = $\blacksquare$; MHG = $\blacktriangle$



شکل ۴ تغییرات سایر عناصر کمیاب نسبت به Sc. تمرکز همه عناصر برحسب ppm است. علائم همانند شکل ۳ هستند.

شکل (چاروجهی) با تهی شدگی LREE $[(La/Yb)_N = 0.46]$ هستند (شکل ۵). ناهنجاری منفی Eu در مگنتیت‌های این گروه $(Eu/Eu^* = 0.32)$ به نسبت HG کمتر است. تهی شدگی Eu مربوط به تبلور همزمان پلاژیوکلاز از ماگما است. در سنگ‌های گابرویی توده نامن، پلاژیوکلاز به عنوان کانی اصلی در تمام نمونه‌ها وجود دارد و بنابراین ناهنجاری منفی در الگوی REE برای مگنتیت‌های ماگمایی بدیهی به نظر می‌رسد. تفاوت شدت این ناهنجاری در مگنتیت‌های این دو گروه را می‌توان به تفاوت میزان سایر عناصر REE نسبت داد. از آنجا که فراوانی این عناصر در نمونه HG به مراتب بیشتر است، جدایش Eu در طی تبلور پلاژیوکلاز موجب ایجاد ناهنجاری شدیدتر در الگوی REE شده است.

مگنتیت‌های MG از نظر عناصر Ti, V, Cr, Mn و Zn نسبت به MHG و MG تهی شده‌تر هستند؛ در حالیکه عناصر HFSE و REE در این مگنتیت‌ها نسبت به نمونه‌های حاوی کانسنگ و مگنتیت‌های خود کانسنگ به شدت افزایش یافته است (شکل‌های ۳ و ۴). علاوه بر تفاوت در میزان عناصر خاکی نادر بین این دو گروه (میزان ΣREE در مگنتیت‌های HG به بیش از ۳۰ برابر مگنتیت‌های MHG و MG می‌رسد)، الگوی نمودار عنکبوتی نیز در آنها متفاوت است. مگنتیت‌های HG یک غنی‌شدگی نسبی عناصر خاکی نادر سبک (LREE) به سنگین (HREE) با شیب ملایم $[(La/Yb)_N = 2.67]$ با تهی-شدگی شدید یوروپیم $(Eu/Eu^* = 0.4)$ را نشان می‌دهند؛ ولی مگنتیت‌های MHB و MG دارای الگوی REE تقریباً W



شکل ۵. الگوی REE بهنجار شده نسبت به کندریت [۲۱] برای نمونه های مورد بررسی. علائم همانند شکل ۳ هستند.

دهد. همانند سنگ کل، مگنتیت‌ها نیز در نمونه‌های HG به نسبت MHG غنی‌تر از عناصر HFSE و REE و تهی شده از بسیاری از فلزات هستند. علاوه بر این، ترکیب مگنتیت موجود در کانسنگ (MG) مشابه با MHG است. این امر نشان می‌دهد که طی جدایش گدازه اکسیدی غیرقابل امتزاج از ماگمای گابرویی MHG، تغییری در ترکیب عناصر کمیاب مگنتیت‌ها بوجود نیامده است.

برداشت

نتایج حاصل از تجزیه مگنتیت‌ها به روش LA-ICP-MS در توده نفوذی نامن نشان می‌دهد که همه آنها در رده‌ی مگنتی-های ماگمایی قرار می‌گیرند. این داده‌ها حاکی از آن است که تفاوت بارزی بین ترکیب عناصر کمیاب این کانی در نمونه‌های MHG-MG با HG وجود دارد. مگنتیت‌های گروه نخست غنی از Zn، Mn، Cr، V، Ti و بلورهای مگنتیت‌های HG غنی از Mg، Al، Ga، Y، Nb و REE هستند. نمودارهای عنکبوتی این دو گروه نیز الگوهای متفاوتی را برای آنها ترسیم می‌سازد. هماهنگی داده‌های عناصر کمیاب مگنتیت در گابروهای توده نامن با شیمی سنگ کل می‌تواند بیانگر تأیید نقش جدایش فاز فرار در تحول فاز ماگمایی باشد.

قدردانی

بخشی از هزینه‌های این تحقیق در قالب طرح پژوهانه مصوب دانشگاه پیام نور تأمین شده است که بدین وسیله از مسئولین دانشگاه پیام نور تشکر می‌گردد. دو داور محترم نظریات

برای درک بهتر علت تفاوت ترکیب مگنتیت در نمونه‌های توده نفوذی نامن بهتر است از داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ-های گابرویی (داده‌های سنگ کل) کمک گرفت. چنان که گفته شد، ویژگی‌های شیمیایی توده نامن توسط مظهري و همکاران [۹] ارائه شده است. داده‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که سنگ‌های MHG و HG از نظر ترکیب کلی نیز با هم تفاوت‌های آشکاری دارند. نمونه‌های MHG دارای آهن، تیتانیوم، منگنز و کلسیم بیشتر و آلومینیوم، منیزیم، سدیم، پتاسیم و فسفر کمتری نسبت به گابروهای HG هستند [۹]. از نظر عناصر کمیاب نیز سنگ‌های MHG و HG ترکیب متفاوتی دارند: درحالی‌که نمونه‌های MHG از نظر گوگرد و عناصر فلزی V، Cr، Co و Cu نسبت به HG غنی‌شدگی نشان می‌دهند، در سایر عناصر LILE و HFSE (Ba، Sr، Rb، Y، Sc، Nb، Ta، Mo، Sn، Pb، Th و REE) تهی‌شدگی شدید دیده می‌شود؛ میزان F در HG نیز بسیار بالاتر از MHG است [۹]. مجموع داده‌های زمین‌شیمیایی حاکی از آن است که جدایش فاز فرار [یک بخش غنی از F و P (که تشکیل HG را داده است) و بخش دیگر غنی از آب و گوگرد (که MHG را شکل داده است)] در طی دگرگونی ماگمای گابرویی موجب تمایز ترکیب شیمیایی، به‌ویژه عناصر کمیاب، در این دو گروه شده و جدایش گدازه اکسیدی غیرقابل امتزاج از ماگمای گابرویی موجب ایجاد کانسنگ‌های مگنتیت در توده نامن شده است [۹]. بررسی ترکیب عناصر کمیاب مگنتیت در سنگ‌های مورد بررسی همخوانی خوبی با داده‌های سنگ کل نشان می‌-

Emeishan Large Igneous Province, SW China", Ore Geology Review 65 (2015) 853-871.

[۹] مظهری س.ع.، مجتهدی فر و.، جعفریان ع.، "ژئوشیمی، سنگ زایی و کانی زایی سنگهای نفوذی نامن، جنوب غربی پهنه سبزوار"، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲۳ (۱۳۹۴) ص ۵۱۷-۵۳۲.

[۱۰] نبوی، م.ح.، "دیباچه‌ای بر زمین شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین شناسی (۱۳۵۵).

[11] Khalatbari Jafari M., Babaie H.A., Gani M., "Geochemical evidence for Late Cretaceous marginal arc-to-backarc transition in the Sabzevar ophiolitic extrusive sequence, northeast Iran", Journal of Asian Earth Sciences, 70-71 (2013) 209-230.

[12] Shafaii Moghadam H., Zaki Khedr M., Arai S., Stern R.S., Ghorbani G., Tamura A., Ottley C., "Arc-related harzburgite-dunite-chromitite complexes in the mantle section of the Sabzevar ophiolite, Iran: A model for formation of podiform chromitites", Gondwana Research 27 (2015) 575-593.

[13] Rossetti F., Nasrabadi M., Vignaroli G., Theye T., Gerdes V., Razavi M. H., Moin Vaziri H., "Early Cretaceous migmatitic mafic granulites from the Sabzevar range (NE Iran): implications for the closure of the Mesozoic peri-Tethyan oceans in central Iran", Terra Nova 22 (2010) 26-34.

[14] Khalatbari Jafari M., Babaie H.A., Mirzaie M. "Geology, petrology and tectonomagmatic evolution of the plutonic crustal rocks of the Sabzevar ophiolite, northeast Iran", Geological Magazine, 150 (2013) 862-884.

[15] Alamnia Z., Karimpour M.H., Homam S.M., Finger F., "The magmatic record in the Arghash region (northeast Iran) and tectonic implications", International Journal of Earth Science, 102 (2013) 1603-1625.

[۱۶] قورچی روکی م.، کریمپور م.ح.، ابراهیمی نصرآبادی خ.، "تعیین سن، منشأ و جایگاه تکتونیکی توده‌های نفوذی جنوب سبزوار"، پترولوژی، شماره ۱۶ (۱۳۹۲) ص ۲۰-۱.

[17] Mazhari S.A., "Petrogenesis of adakite and high-Nb basalt association in the SW of Sabzevar Zone, NE of Iran: Evidence for slab melt-mantle interaction", Journal of African Earth Sciences, 116 (2016) 170-181.

ارزشمندی برای بهبود متن مقاله ارائه دادند که کمال تشکر را نسبت به آنها اعلام می‌دارم.

مراجع

[1] Giacomini F., Tiepolo M., Dallai, L., Ghezzi, C., "On the onset and evolution of the Ross-orogeny magmatism in North Victoria Land-Antarctica", Chemical Geology 240 (2007) 103-128.

[2] Molina J.F., Scarrow J.H., Montero P.G., Bea F., "High-Ti amphibole as a petrogenetic indicator of magma chemistry: evidence for mildly alkalic-hybrid melts during evolution of Variscan basic-ultrabasic magmatism of Central Iberia", Contribution to Mineralogy and Petrology 158 (2009) 69-98.

[۳] مظهری، س.ع.، قلمقاش، ج.، مظلومی بجستانی، ع.ر.، حاج علیلو، ب.، "کاربرد ترکیب عناصر جزئی کوارتز در تفسیر پتروژنتیکی گرانیتوئیدهای نرده، شمال غرب زون سندج-سیرجان"، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران (۱۳۹۱) سال بیستم، شماره ۳، صفحات ۵۱۴-۵۰۵.

[4] Jacamon F., Larsen R.B., "Trace element evolution of quartz in the charnockitic Kleivan granite, SW-Norway: The Ge/Ti ratio of quartz as an index of igneous differentiation", Lithos 107 (2009) 281-291.

[۵] مظهری، س.ع.، "تغییر ترکیب شیمی آپاتیت در انواع گرانیت و کاربرد آن در سنگ شناسی: بررسی موردی از توده های نرده، زوزن، بانه و شیرکوه"، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران (۱۳۹۳) سال بیست و دوم، شماره ۲، صفحات ۲۴۳-۲۵۶.

[6] Nadoll P., Angerer T., Mauk J.L., French D., Walshe J., "The chemistry of hydrothermal magnetite: a review", Ore Geology Review 61 (2014) 1-32.

[7] Zhao W.W., Zhou M.F., "In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: the Mesozoic Tengtie skarn Fe deposit in the Nanling Range, South China", Ore Geology Review 65(2015) 872-883.

[8] Liu P.P., Zhou M.F., Chen W.T., Gao J.F., Huang X.W., "In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: Fe-Ti(V) oxide-bearing mafic-ultramafic layered intrusions of the

- [20] Dupuis C., Beaudoin G., "Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types", Mineral. Deposita 46 (2011) 319-335.
- [21] Nakamura N., "Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites", Geochimica et Cosmochimica Acta (1974) 38 757-775.
- [18] Nadoll P., Mauk J.L., Hayes T.S., Koeni A.E., Box S.E., "Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic Belt Supergroup, United States" Economic Geology, 107 (2012), 1275-1292.
- [19] Dare S.A.S., Barnes S.-J., Beaudoin G. "Variation in trace element content of magnetite crystallized from a fractionating sulfide liquid, Sudbury, Canada: implications for provenance discrimination", Geochimica et Cosmochimica Acta, 88 (2012) 27-50.