

## توزیع عناصر گروه پلاتین (PGE) در کرومیتیت‌های سبزوار، شمال شرق ایران

سید علی مظهري\*

دانشگاه پیام نور، گروه علمی زمین شناسی، تهران ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۱۲/۹، نسخه نهایی: ۹۷/۴/۶)

**چکیده:** کرومیتیت‌های پهنه افیولیتی سبزوار به دو گروه غنی از کروم و غنی از آلومینیوم تقسیم می‌شوند. در نمونه‌های غنی از کروم، مقدار  $As$ ،  $Cr_2O_3$ ،  $S$  و برخی فلزات سنگین ( $Cu$ ،  $Ni$ ،  $Ag$ ،  $Co$  و  $Zn$ ) بالاتر از نمونه‌های غنی از آلومینیوم است؛ در حالیکه در کرومیتیت‌های غنی از آلومینیوم مقادیر  $SiO_2$ ،  $Al_2O_3$ ،  $TiO_2$  و سایر عناصر کمیاب بیشتر است. مقدار عناصر گروه پلاتین (PGE) در نمونه‌های غنی از کروم بیشتر از نوع غنی از آلومینیوم است و با افزایش  $Cr_2O_3$  بر مقدار PGE افزوده می‌شود. الگوی PGE بهنجار شده نسبت به کندریت در کرومیتیت‌های غنی از کروم ظاهری تفکیک یافته ( $Pd/Ir = 0.25$ ) با شیب منفی و غنی‌شدگی عناصر ( $Ru$ ،  $Ir$ ،  $Os$ ) IPGE نسبت به PPGE ( $Pd$ ،  $Pt$ ،  $Rh$ ) (به طور متوسط  $IPGE/PPGE = 6.22$ ) نشان می‌دهد؛ در حالیکه کرومیتیت‌های غنی از آلومینیوم الگویی تقریباً یکنواخت ( $Pd/Ir = 1.9$  و  $IPGE/PPGE = 2.88$ ) دارند. شیمی عناصر گروه پلاتین در کرومیتیت‌های غنی از کروم نشان از تشکیل آنها در جایگاه‌های کم‌انرژی و در نتیجه ذوب‌بخشی درجه بالا (مذاب بونینیتی) دارد. در مقابل، نمونه‌های غنی از آلومینیوم از ذوب‌بخشی درجه پایین (مذاب تولییتی) در یک محیط کششی (پشته‌های میان اقیانوسی یا حوضه‌های پشت کم‌انرژی) تشکیل شده‌اند. نتایج به دست آمده از داده‌های PGE در کرومیتیت‌های سبزوار با نتایج برآمده از شیمی بلورهای کرومیت در این نمونه‌ها همخوانی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** کرومیتیت؛ عناصر گروه پلاتین (PGE)؛ مذاب بونینیتی؛ مذاب تولییتی؛ سبزوار.

### مقدمه

بخشی در گوشته و ماگماهای اشباع از گوگرد محسوب می‌شوند. بنابراین، تعیین مقدار و تفسیر تغییرات PGE در کرومیتیت‌ها و سنگ‌های فرامافیک مجموعه‌های افیولیتی می‌تواند نقش مهمی در شناخت روند دگرگونی زمین شیمیایی و بازسازی محیط زمین ساختی ماگمایی داشته باشد [۵]. پهنه افیولیتی سبزوار، به عنوان بزرگترین مجموعه افیولیتی ایران، شامل رخنمون‌های متعدد از کرومیتیت‌های انبانی است. در پژوهش‌های مختلف انجام شده پیرامون این مجموعه، بررسی زمین‌شیمی این کانسنگ‌ها [۶] و به ویژه شیمی کرومیت [۶، ۷] مورد توجه خاص قرار گرفته است. در این پژوهش‌ها نشان داده شده است که نهشته‌های کرومیتی سبزوار به دو گروه غنی از کروم و غنی از آلومینیوم (فقیر از کروم)

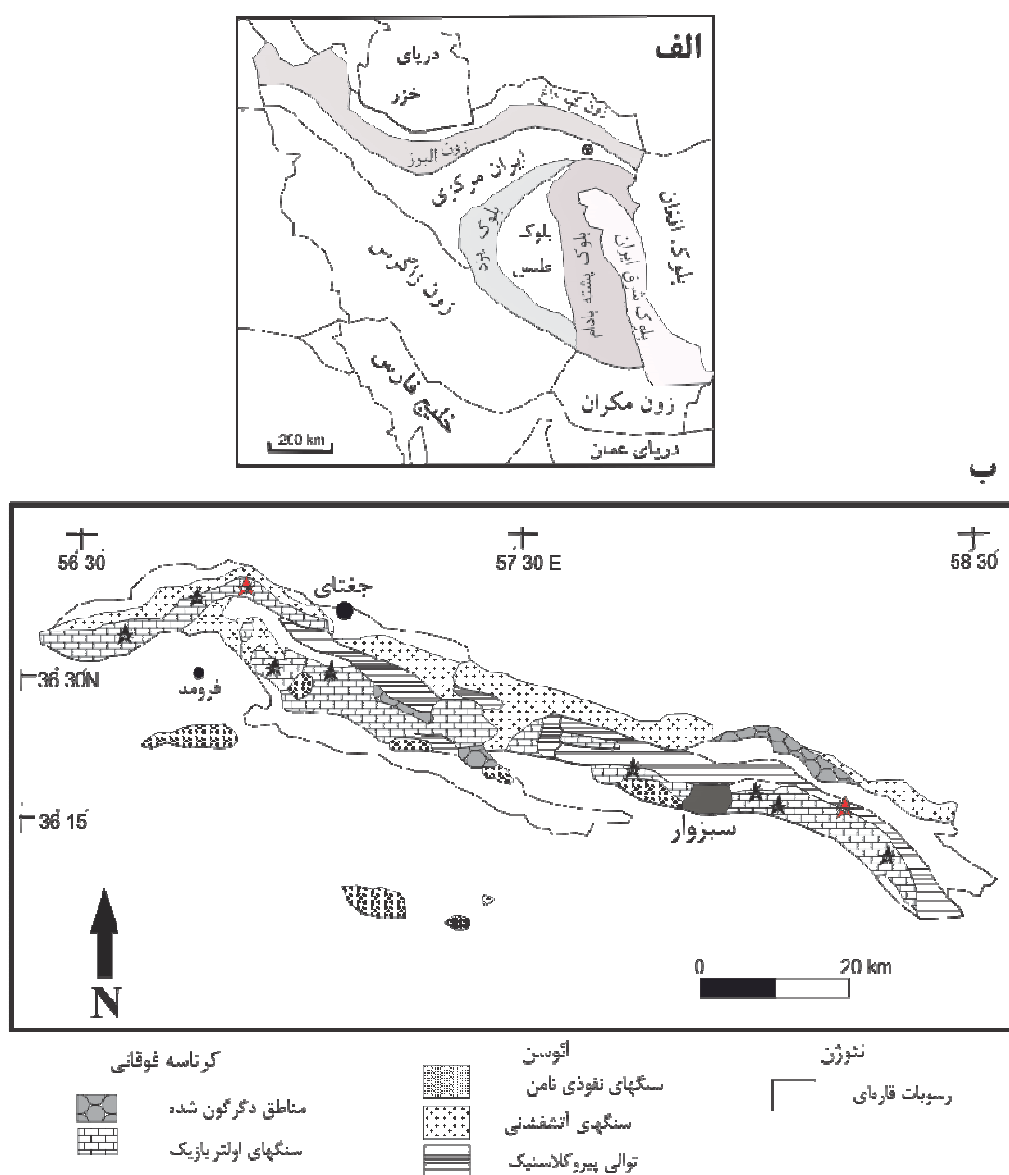
کرومیتیت‌ها در مجموعه‌های افیولیتی اغلب شامل مقادیر قابل توجه عناصر گروه پلاتین (PGE) هستند. این عناصر به عنوان یک شاخص زمین‌شیمیایی ممکن در ردیابی فرایندهای انتقال ماده از گوشته به پوسته در نظر گرفته می‌شوند [۱، ۲]. نظم و الگوی فراوانی عناصر PGE اطلاعات مفیدی در مورد ماهیت سنگ‌شناسی و دگرگونی محل منبع گوشته‌ای ارائه می‌دهد. در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی پیرامون رفتار زمین شیمیایی عناصر PGE در طی ذوب گوشته‌ای و به ویژه جایگاه‌های دربردارنده کرومیت صورت گرفته است (برای مثال [۳، ۴]). عناصر PGE به شدت آهن دوست و گوگرد دوست هستند و شاخص‌های حساسی در فرایندهای تفکیک بلوری، ذوب

پهنه سبزوار شامل کمر بند افیولیتی بزرگی است که به صورت نواری با روند تقریبی شمال غربی- جنوب شرقی در کرانه شمال شرقی ایران مرکزی واقع است. این مجموعه افیولیتی شامل همه بخش‌های یک توالی افیولیتی است که البته به طور کامل زمین‌ساخته شده و بین بخش‌های مختلف گسستگی ایجاد شده است. افیولیت سبزوار شامل بخش گوشته‌ای سرپانتینی شده و توالی سنگ‌های رسوبی- شیمیایی، دایک- های دیابازی و گابروهای لایه‌ای و توده‌ای است که سن کرتاسه پسین تا پالئوسن را به آن نسبت داده‌اند [۶، ۸].

قابل تفکیک هستند و ماگماهای مختلف تولییتی یا بونینیتی می‌توانند در تشکیل آنها نقش داشته باشند [۶، ۷]. بررسی ترکیب و توزیع عناصر PGE در درک بهتر خاستگاه ماگمای اولیه بسیار مؤثر است. در این پژوهش برای نخستین بار ترکیب PGE کرومیتیت‌های سبزوار و ارتباط پارامترهای مختلف زمین شیمیایی با مقدار PGE بررسی می‌شود.

#### جایگاه زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری نمونه‌ها

منطقه مورد بررسی در پهنه سبزوار (شمال شرق ایران) و در قلمرو پهنه ایران مرکزی واقع است (شکل ۱ الف). بخش عمده



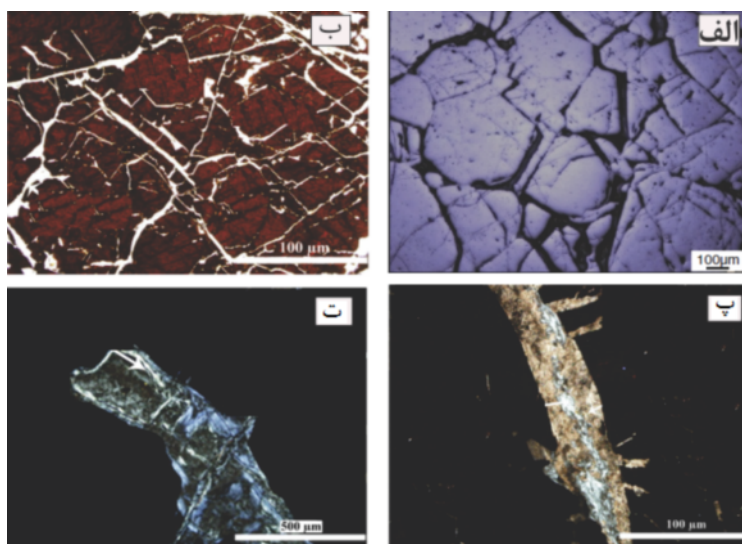
شکل ۱ الف) جایگاه منطقه مورد بررسی در نقشه واحدهای زمین‌شناسی ایران [۹]. منطقه مورد بررسی با علامت مشخص شده است. ب) نقشه ساده زمین‌شناسی پهنه افیولیتی سبزوار [۱۰]. محل برداشت نمونه‌ها با ستاره مشخص شده است. ستاره‌های قرمز محل نمونه برداری کرومیتیت- های غنی از آلومینیوم و ستاره های سیاه نمونه‌های غنی از کروم را نشان می‌دهند.

کرومیتیت‌ها بیشتر به صورت قطعات عدسی یا صفحه‌ای شکل در پریدوتیت‌ها توزیع شده‌اند. ساخت و بافت کرومیتیت‌ها در سبزوار بسیار متنوع و شامل انواع بافت‌های گرهکی، پراکنده یا توده‌ای است. در این پژوهش برای نیل به اهداف مورد نظر، نمونه‌برداری و آزمایش‌های شیمیایی بر کرومیت‌های دارای بافت توده‌ای با بیش از ۹۰٪ حجمی کرومیت انجام گرفت (شکل ۲).

کرومیتیت‌های نمونه‌گیری شده از توده‌های کوچک و بیضی شکل مجزا با عرض بین ۰/۵ تا ۱ متر و طول تا ۱/۵ متر برداشت گردید. این کرومیتیت‌ها اغلب با پریدوتیت‌های اطراف مرز مشخص دارند و از مجموعه کرومیت‌های نیمه شکلدار تا شکلدار متوسط تا درشت دانه (حتی با قطر بزرگتر از یک میلی متر) تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۲ الف و ب) که توسط رگچه‌های سرپانتین، کلریت و کلسیت قطع می‌شوند (شکل‌های ۲ پ و ت). الیوین در کرومیتیت‌ها دچار دگرسانی گسترده شده و به کریزوتیل، لیزادریت یا کلریت تبدیل شده‌اند (شکل‌های ۲ پ و ت). در برخی نمونه‌ها، دانه‌های مگنتیت در لبه بلورهای پیروکسن و الیوین‌های سرپانتینی شده دیده می‌شوند. در بیشتر کرومیت‌ها بافت کشتی [۱۴، ۱۳] دیده می‌شود. حضور بلورهای ریز سرپانتین، کلریت و کلسیت در دانه‌های کرومیت رایج است. البته در برخی از دانه‌های کرومیت میانبارهایی از الیوین دگرسان نشده نیز دیده می‌شود.

افزون براین، سنگ‌های بازی دگرگون شده (شیست آبی، شلیست سبز و آمفیبولیت) در اندازه‌های مختلف نیز در مجموعه افیولیتی ظاهر می‌شوند. این سنگ‌ها در کرتاسه پیشین (آلبین) دستخوش بیشترین دگرگونی شده‌اند [۱۰]. علاوه بر سنگ‌های آذرین وابسته به توالی افیولیتی که در پهنه سبزوار ظاهر شده‌اند، بخش قابل ملاحظه‌ای از این ناحیه توسط سنگ‌های ماگمایی غیرافیولیتی پوشیده شده است (شکل ۱ ب). این سنگ‌ها یا به صورت توده‌های نفوذی، نیمه عمیق و روانه‌های خروجی در نوار مجموعه افیولیتی رخنمون یافته‌اند [۸] و یا در خارج از نوار افیولیتی (در نیمه جنوبی پهنه سبزوار) قرار گرفته‌اند [۱۱]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از سنگ‌های آتشفشانی ماهیت آداکیتی دارند [۱۲]. توده‌های ماگمایی نیز متنوع بوده و شامل فازهای مختلف فلسی و مافیک هستند [۹].

کرومیتیت‌های انبانی در بخش گوشته‌ای و همراه با پریدودتیت‌های افیولیت سبزوار (که اغلب به شدت سرپانتینی شده‌اند) به وفور دیده می‌شوند. این کرومیت‌ها اغلب همراه با هارزبورژیت‌ها و دونیت‌ها و گاهی لرزولیت‌های بخش گوشته‌ای مجموعه ظاهر می‌شوند. در کرومیتیت‌های سبزوار، همچون سایر کرومیتیت‌های آلی، ذخایر به طور پراکنده در سنگ‌های میزبان پخش شده‌اند و تمرکز در یک منطقه خاص محدود است؛ به همین علت، عمر بهره برداری از این ذخایر کوتاه است و معادن فعال و متروک فراوان در این ناحیه وجود دارد.



شکل ۲ الف و ب) نمایی کلی از بافت کرومیتیت‌های توده‌ای سبزوار که انباشت بلورهای کرومیت به وسیله شبکه‌ای از رگچه‌های کانی‌های دگرسان شده قطع می‌شوند در نور بازتابی (الف) و نیکول متقاطع بازتابی (ب). پ) رگچه‌های بینابین کرومیت‌ها که به کلسیت (لبه رگه) و کلریت (مرکز رگه) دگرسان شده‌اند؛ نور PPL. ت) نمونه‌ای دیگر از کانی‌های بینابینی کرومیت‌ها که توسط سرپانتین (لبه رگچه) و کلریت (مرکز رگچه) پر شده است؛ نور XPL.

## روش انجام پژوهش

پس از بررسی‌های میدانی و کتابخانه‌ای، از کرومیتیت‌های ناحیه سبزوار به طور هدفمند نمونه‌برداری شد که در بالا اشاره شد، نمونه‌ها تنها از کرومیتیت‌های توده‌ای برداشت شد. دلیل این امر اهداف مورد نظر در این پژوهش بود، چرا که تجزیه عناصر PGE و کمیاب باید بر سنگ کل انجام می‌شود و بنابراین تنها کرومیتیت‌های توده‌ای که دارای بیشترین کرومیتیت مُودال هستند، نمونه‌برداری شدند. از ۲۵ نمونه کرومیتیت توده‌ای برداشت شده مقطع نازک صیقلی تهیه گردید و پس از بررسی نتایج سنگ‌نگاری، ۱۰ نمونه برای انجام تجزیه‌های شیمیایی انتخاب شد. نمونه‌های انتخاب شده از سنگ میزبان-های مختلف برداشت شدند. موقعیت نمونه‌های برگزیده در شکل ۱ ب نمایش داده شده است. تجزیه‌های شیمیایی برای تعیین مقدار عناصر سنگ کل، در آزمایشگاه Actlabs کانادا انجام گرفت. برای این منظور از روش‌های طیف‌سنجی فلئورسانس پرتو X (XRF) و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) به ترتیب برای اندازه‌گیری مقدار اکسیدهای اصلی و عناصر کمیاب استفاده شد. مقدار اکسیدهای اصلی به روش XRF پس از گدازش با تترابورات لیتیم تعیین گردید. دقت آزمایش برای تراکم ۱۰٪ وزنی اکسیدهای اصلی  $\pm 1/5\%$  است. مقدار عناصر کمیاب به روش ICP-MS برپایه فرایند هضم چهار اسید تعیین شد. برای این منظور، نخست ۰/۲۵ گرم از نمونه خاک در مخلوطی از  $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4$  گرمادهی شد تا بخار شده و کاملاً خشک شود. سپس باقیمانده آن در  $\text{HCl}$  حل گردید. دقت نتایج به دست آمده از این روش  $\pm 5\%$  است. از آنجا که مقدار عناصر خاکی نادر (REE) و عناصر PGE در کرومیتیت‌ها بسیار پایین و از مرتبه ppb است، برای تعیین مقدار این عناصر ابتدا فرایند سنجش گداخت سولفید نیکل (آمیختن نمونه با خاکستر سود، بوراکس، سولفور سیلیس و کربنات نیکل یا اکسید نیکل) انجام شد. سپس محلول نمونه با طیف سنج جرمی اندازه‌گیری شد. حد تشخیص این روش ۲ ppb برای Os, Ir, Ru, Pt, Pd و ۱ ppb برای Rh، ۵ ppb برای Au و مقادیر بین ۲ تا ۵۰ ppb برای عناصر مختلف REE است.

مقاطع نازک صیقلی تهیه شده از کرومیتیت‌های سبزوار در گروه علوم زمین Academia Sinica، تایوان با دستگاه ریزپردازنده الکترونی JEOL JXA-8900R برای تعیین ترکیب کانی کرومیت در نمونه‌های برگزیده، تجزیه شدند. شرایط اجرایی برای بررسی‌های ریزپردازشی 15kV و 25nA و قطر باریکه ۵-1 $\mu\text{m}$ ، بسته به اندازه بلور کرومیت، بود. زمان شمارش برای هر عنصر اصلی ۱۰s و برای عناصر کمیاب ۲۰s بود.

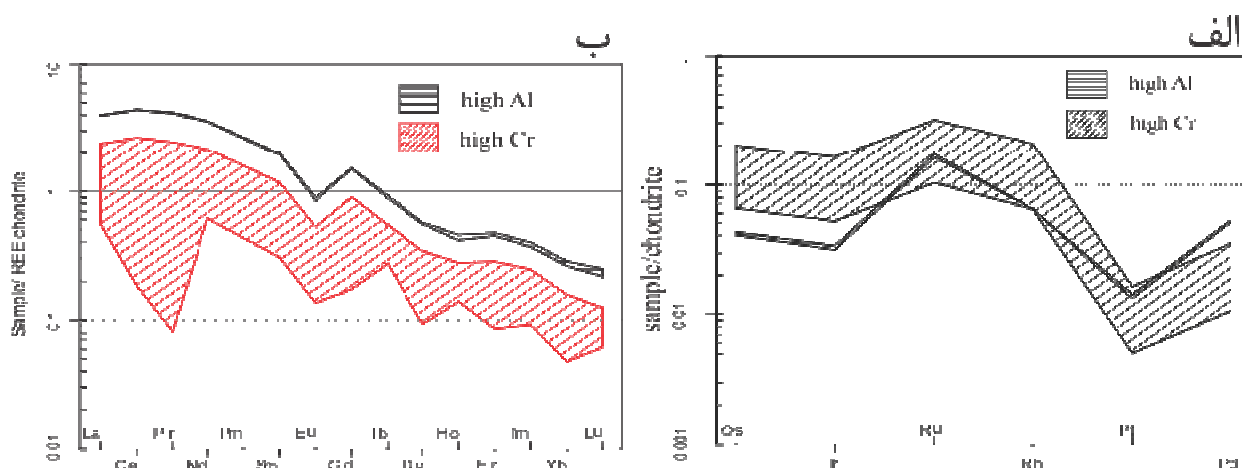
## نتایج

## داده‌های سنگ کل

ترکیب شیمیایی نمونه‌های سنگ کل کرومیتیت‌های سبزوار تغییرات قابل توجهی نشان می‌دهد (جدول ۱). این تغییرات هم در اکسیدهای اصلی، و هم در عناصر کمیاب قابل مشاهده است. از نظر اکسیدهای اصلی کرومیتیت‌های غنی از کروم نسبت به نمونه‌های غنی از آلومینیوم دارای مقادیر بالاتری  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (به طور میانگین ۴۶/۴۶ نسبت به ۳۸/۷۴ درصدوزنی) و  $\text{CaO}$  (۲/۲۲ در برابر ۰/۱۹ درصد وزنی) و تراکم کمتری از  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (۲۰/۷۸ نسبت به ۱۱/۵۱)،  $\text{SiO}_2$  (۲/۷۹ در برابر ۳/۶۸) و  $\text{TiO}_2$  (۰/۱۵ در برابر ۰/۳۳ درصد وزنی) هستند. به منظور دسته‌بندی نمونه‌های کرومیتیتی سبزوار، روابط، نمودارها و الگوهای گوناگون در بین عناصر مختلف تجزیه و تحلیل شد. در این بررسی‌ها مشخص گردید که عناصر PGE بهترین الگو را برای گروه‌بندی کرومیتیت‌ها ارائه می‌دهند. با رسم الگوی عناصر PGE بهنجار شده نسبت به کندریت، نمونه‌های مورد بررسی در دو گروه با روندهای متفاوت قرار می‌گیرند (شکل ۳ الف). در کرومیتیت‌های سرشار از کروم، عناصر IPGE (Os, Ir و Ru) نسبت به PPGE (Pt, Rh و Pd) غنی شده‌اند ( $\text{IPGE}_N/\text{PPGE}_N = 2/7$ ) و نسبت بالای  $\text{IPGE}_N/\text{PPGE}_N$  و نسبت بالای  $\text{Os}_N/\text{Pd}_N$  (۶-۵/۶) در آنها بارز است. در نمونه‌های غنی از آلومینیوم، الگوی PGE به نسبت هموار شکل می‌گیرد که در آن تفکیک قابل ملاحظه‌ای بین عناصر PGE دیده نمی‌شود ( $\text{Os}_N/\text{Pd}_N = 0/8$ ) و غنی-شدگی IPGE به نسبت گروه اول کمتر است ( $1/8 = \text{IPGE}_N/\text{PPGE}_N$ ).

جدول ۱ نتایج تجزیه‌ی شیمیایی عناصر اصلی (wt%) و کمیاب (ppm) برای نمونه‌های کرومیتیتی سبزوار. تراکم عناصر REE و PGE بر حسب ppb است. SD=دونیت سرپانتینی شده؛ S=سرپانتینی؛ SH=هارزبورژیت سرپانتینی شده؛ SL=لرزلویت سرپانتینی شده؛ H=هارزبورژیت؛ PL=پلاژیوکلاز لرزلویت؛ Al=کرومیتیت غنی از آلومینیوم؛ Cr=کرومیتیت غنی از کروم.

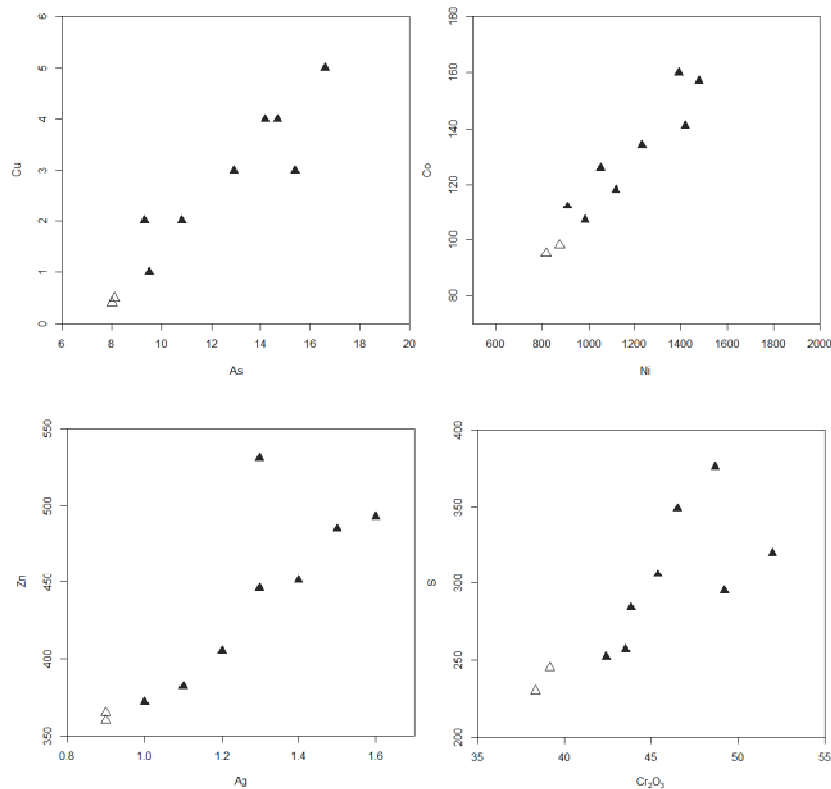
شماره نمونه	CS1	CS8	CS6	CS3	CS7	CS10	CS9	CS4	CS5	CS2
سنگ میزبان	SD	S	SH	SL	S	SD	S	H	PL	SH
شیشه	Al	Al	Cr	Cr	Cr	Cr	Cr	Cr	Cr	Cr
SiO <sub>2</sub>	۳۶۳	۳۷۲	۳۱۸	۲۶۸	۲۴۵	۲۹۴	۳۱۱	۲۶۲	۲۲	۳۱۷
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳۸۳۲	۳۹۱۵	۴۲۳۷	۴۳۵۶	۴۳۸۸	۴۵۴۱	۴۶۵۴	۴۸۷۰	۴۹۲۳	۵۱۹۹
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۰۱۶	۲۱۴۰	۱۷۶۴	۱۶۰۶	۱۴۲۲	۱۱۹۷	۸۱۳	۸۱۱	۸۰۵	۷۸۹
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۴۵۲	۱۴۱۸	۱۴۲۶	۱۵۰۵	۱۵۶۴	۱۳۸۳	۱۶۱۰	۱۳۱۱	۱۵۷۷	۱۴۵۹
MnO	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۲۷
MgO	۱۷/۹۱	۱۷۶۳	۱۷۴۵	۱۶۵۷	۱۸۳۲	۱۷۷۰	۱۸۵۹	۱۶۸۹	۱۹۳۶	۱۸۲۱
CaO	۰/۲	۰/۱۷	۱/۷۳	۲/۱۸	۰/۸۶	۳/۴۸	۲/۷۵	۵/۳۰	۰/۲۴	۱/۱۸
Na <sub>2</sub> O	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
K <sub>2</sub> O	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱
TiO <sub>2</sub>	۰/۳۰	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۸
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲
افت گرمایی	۳۲۷	۳۴۵	۲۸۴	۲۶۰	۳۸۱	۴۶۴	۳۶۸	۴۲۶	۴۴۳	۲۹۲
As	۸۱	۸۰	۹۵	۹۳	۱۰۸	۱۲۹	۱۵۴	۱۴۲	۱۴۷	۱۶۶
Br	۱۱۸	۱۲۲	۱۳۵	۱۰۴	۱۲۰	۱۴۸	۱۱۳	۷۷	۱۲۴	۶۶
Sc	۷۵	۷۸	۸۴	۹۰	۱۰۵	۵۷	۶۳	۸۱	۷۵	۶۲
Sb	<۰/۲	<۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۳	۰/۵	۰/۶
Cd	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۵	۰/۶	۰/۵	۰/۶	۰/۶
Cu	<۱	<۱	۱	۲	۲	۳	۳	۴	۴	۵
Ni	۸۱۶	۸۷۵	۹۰۸	۹۸۳	۱۰۵۱	۱۱۱۸	۱۲۳۴	۱۴۸۰	۱۳۹۲	۱۴۲۰
S	۲۳۰	۲۴۵	۲۵۲	۲۵۷	۲۸۴	۳۰۶	۳۴۹	۳۷۶	۲۹۵	۳۲۰
Ag	۰/۹	۰/۹	۱/۰	۱/۱	۱/۳	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۶	۱/۵
Co	۹۵	۹۸	۱۱۲	۱۰۷	۱۲۶	۱۱۸	۱۳۴	۱۵۷	۱۶۰	۱۴۱
Zn	۳۶۰	۳۶۵	۳۷۲	۳۸۲	۴۴۶	۴۰۵	۵۳۱	۴۵۱	۴۹۳	۴۸۵
Ga	۲۷۳	۲۷۷	۲۲۸	۲۰۲	۱۸۹	۱۵۵	۱۲	۱۱۴	۹۷	۸۱
Ge	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵
Y	۱/۲۵	۱/۲۷	۱/۰۸	۰/۹۳	۰/۷	۰/۵۴	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۱۱	۰/۰۸
Zr	۶	۶	۵	۵	۴	۳	۳	۲	۱	۱
Nb	۱/۲۵	۱/۲۸	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۸۱	۰/۷۶	۰/۷۰	۰/۶۶	۰/۶۱	۰/۵۹
Hf	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۵	<۰/۰۵
Ta	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۲۱
W	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵
Tl	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵	<۰/۵
Pb	۵۸	۵۷	۶۲	۷۵	۵۲	۸۳	۶۵	۸۰	۷۷	۶۴
Th	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۰۶	<۰/۰۵	۰/۰۵	<۰/۰۵	<۰/۰۵
U	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲
V	۹۴۴	۸۶۵	۷۰۵	۹۶۵	۵۱۷	۶۸۰	۷۵۴	۳۶۲	۱۰۶۱	۸۵۴
Sr	۹	۱۱	۴۳	۵۶	۱۵	۱۰۲	۸۵	۱۹۶	۶	۱۹
Ba	۱۸۴	۱۷۶	۲۲۴	۲۰۸	۱۵۸	۲۹۱	۲۵۰	۳۷۳	۱۳۵	۱۲۲
La	۱۲۲۰	۱۲۳۵	۷۴۰	۶۲۰	۴۱۰	۳۷۰	۲۲۰	۲۰۰	۱۷۳	۱۶۰
Ce	۳۵۵۰	۳۵۷۰	۲۱۴۰	۱۸۲۰	۱۲۰۰	۱۱۱۰	۶۵۰	۶۳۰	۱۵۰	۱۷۰
Pr	۵۰۰	۵۱۰	۳۰۰	۲۵۰	۱۶۰	۱۴۰	۸۰	۷۵	۱۰	۱۰
Nd	۲۱۲۰	۲۱۵۰	۱۲۹۰	۱۰۰	۷۱۰	۶۵۰	۳۹۰	۳۷۰	<۵۰	<۵۰
Sm	۳۸۰	۳۹۰	۲۳۰	۱۹۰	۱۲۰	۱۱۰	۷۰	۶۰	<۱۰	<۱۰
Eu	۶۳	۶۶	۳۹	۲۳	۲۱	۱۹	۱۱	۱۰	<۵	<۵
Gd	۳۹۰	۳۹۵	۲۳۵	۲۰۰	۱۳۰	۱۲۰	۷۰	۶۵	۴۵	۵۰
Tb	۴۲	۴۴	۲۶	۲۲	۱۴	۱۳	<۱۰	<۱۰	<۱۰	<۱۰
Dy	۱۸۰	۱۸۵	۱۱۱	۹۴	۶۱	۵۵	۳۳	۳۰	<۱۰	<۱۰
Ho	۳۰	۳۳	۲۰	۱۷	۱۱	۱۰	<۱۰	<۱۰	<۱۰	<۱۰
Er	۹۵	۱۰۰	۶۰	۵۱	۳۳	۳۰	۱۸	<۱۰	<۱۰	<۱۰
Tm	۱۲	۱۳	۸	۷	۵	۵	۳	<۵	<۵	<۵
Yb	۶۰	۵۵	۳۳	۲۸	۱۸	۱۵	۱۰	<۱۰	<۱۰	<۱۰
Lu	۸	۷	۴	۳	۲	۲	<۲	<۲	<۲	<۲
Os	۲۱	۲۰	۳۲	۳۹	۴۹	۵۹	۷۱	۷۹	۹۱	۹۹
Ir	۱۶	۱۵	۲۵	۳۱	۳۹	۴۷	۵۶	۶۲	۷۲	۷۸
Ru	۱۱۷	۱۱۱	۷۰	۸۷	۱۰۹	۱۳۱	۱۵۷	۱۷۵	۲۰۱	۲۱۹
Rh	۹	۹	۹	۱۱	۱۴	۱۷	۲۱	۲۳	۲۶	۲۹
Pt	۱۴	۱۳	۵	۶	۸	۹	۱۱	۱۲	۱۴	۱۶
Pd	۳۰	۲۹	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰
SPGE	۲۰۷	۱۹۷	۱۴۷	۱۸۲	۲۲۹	۲۷۵	۳۳۰	۳۶۷	۴۲۲	۴۶۱
Pd/Ir	۱/۸۸	۱/۹۳	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۶
IPGE	۱۵۴	۱۴۶	۱۲۷	۱۵۷	۱۹۷	۲۳۷	۲۸۴	۳۱۶	۳۶۴	۳۹۶
PPGE	۵۳	۵۱	۲۰	۲۵	۳۲	۳۸	۴۶	۵۱	۵۸	۶۵
IPGE,PPGE	۲۹۱	۲۸۶	۶۳۵	۶۳۸	۶۱۶	۶۲۴	۶۱۷	۶۲۰	۶۲۸	۶۰۹
Ru/Pt	۸/۳۶	۸/۵۴	۱۴	۱۴/۵	۱۳/۶۳	۱۴/۵۶	۱۴/۲۷	۱۴/۵۸	۱۴/۳۶	۱۳/۶۹



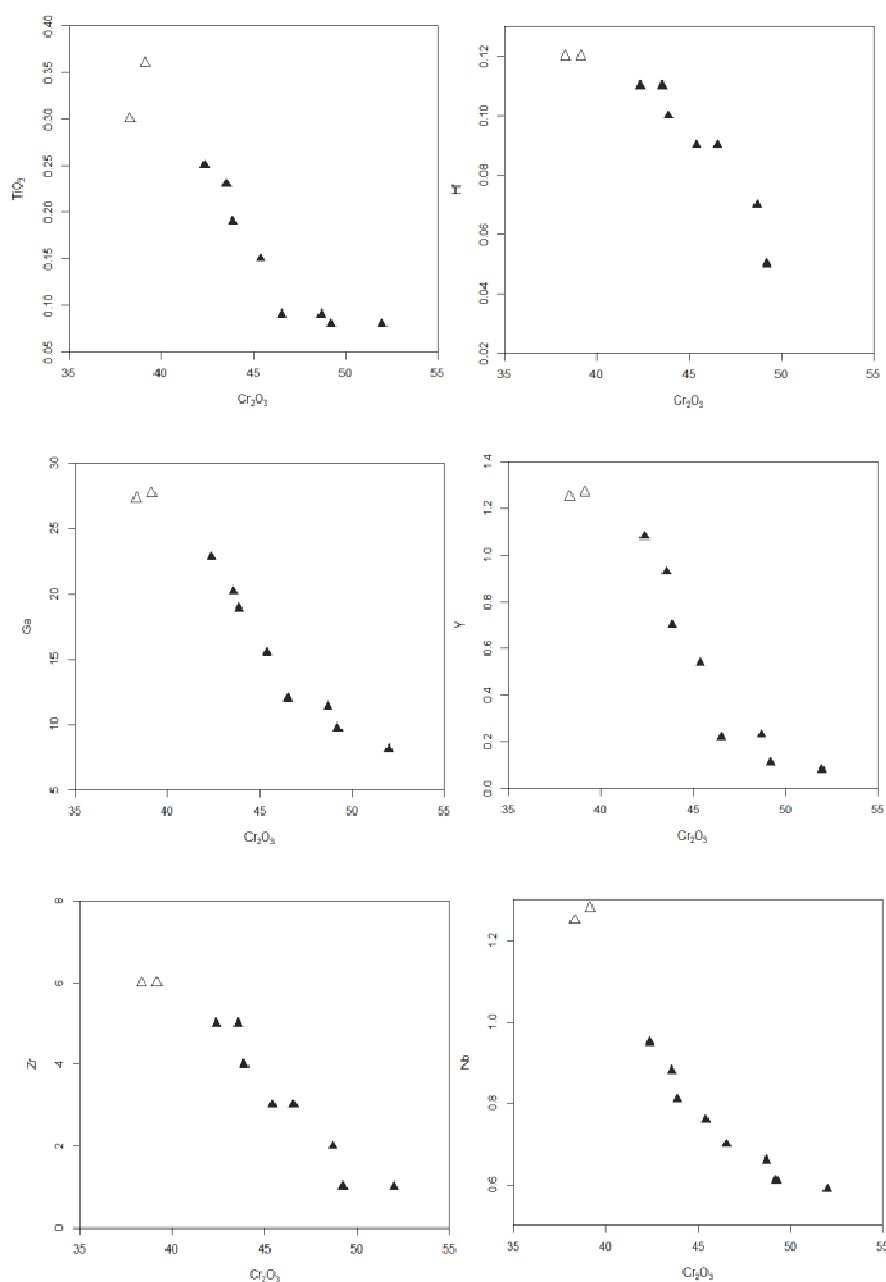
شکل ۳ (الف) الگوی PGE و (الف) REE بهنجار شده نسبت به کندریت [۱۵] برای کرومیت‌های سبزوار. تفاوت دو گروه کرومیت‌های غنی از آلومینیوم و غنی از کروم کاملاً نمایان است.

چون  $\text{Th}$ ،  $\text{Hf}$ ،  $\text{Nb}$ ،  $\text{Zr}$ ،  $\text{Y}$ ،  $\text{Ga}$ ،  $\text{P}$ ،  $\text{Ti}$  غنی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۵). افزون بر این، فراوانی عناصر خاکی نادر (REE) در کرومیت‌های غنی از آلومینیوم افزایش چشمگیری نسبت به نمونه‌های غنی از کروم نشان می‌دهد (شکل ۳ ب).

ترکیب سایر عناصر کمیاب نیز در کرومیت‌های غنی از آلومینیوم و غنی از کروم متفاوت است. در کرومیت‌های غنی از کروم، مقدار  $\text{S}$ ،  $\text{As}$  و برخی فلزات سنگین  $\text{Ag}$ ،  $\text{Ni}$ ،  $\text{Cu}$  و  $\text{Co}$  بالاتر است (شکل ۴)؛ در حالیکه کرومیت‌های غنی از آلومینیوم در بسیاری از عناصر با شدت میدان بالا (HFSE)



شکل ۴ نمودارهای دوتایی تفکیک ترکیب کرومیت‌های غنی از آلومینیوم ( $\Delta$ ) و غنی از کروم ( $\blacktriangle$ ) در کرومیت‌های سبزوار. غلظت  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  به درصد وزنی و سایر عناصر به ppm است.



شکل ۵ نمودارهای دوتایی  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  در برابر عناصر کمیاب برای کرومیت‌های سبزوار. علائم به کار رفته مانند شکل ۴ است.

#### شیمی کانی کرومیت

تجزیه به روش ریزپردازش الکترونی (EPMA) بر ۵۳ نقطه در ۱۰ نمونه کرومیتی سبزوار انجام گرفت. در جدول ۲ میانگین داده‌ها برای هر نمونه آورده شده است. در همخوانی با ترکیب سنگ کل، بلورهای کرومیت در نمونه‌های غنی از کروم دارای  $\text{Cr}\#$  (نسبت اتمی  $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ ) بالاتری (۰٫۸۳-۰٫۵۳) نسبت به کرومیت‌های غنی از آلومینیوم (۰٫۴۴-۰٫۴۳) ( $\text{Cr}\#$ ) هستند. با توجه به مقدار  $\text{Cr}\#$  و  $\text{Mg}\#$  (نسبت اتمی  $\text{Mg}+\text{Fe}$ )

شیمی کانی کرومیت سبزوار نیز در دو گروه سرشار از آلومینیوم و سرشار از کروم قرار می‌گیرند (شکل ۶ الف). ترکیب کرومیت‌ها می‌تواند کمک بسیاری به درک دگرگونی-های ماگمایی و محیط زمین‌ساختی ماگمایی نماید [۱۳]. باور این است که ترکیب کرومیت شاخص نوع ماگماست، به طوریکه کرومیت‌های غنی از کروم از ترکیبات بونینیتی و کرومیت‌های غنی از آلومینیوم از ماگمای تولیتی شبیه بازالت-های پشته‌های میان اقیانوسی (MORB) نتیجه می‌شوند

در نظر گرفته می‌شود [۱۵، ۱۶]. غلظت Al مذابی که کرومیت از آن متبلور شده است را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۱۷]:

$$(Al_2O_3 \text{ wt}\%)_{\text{spinel}} = 0.035 (Al_2O_3 \text{ wt}\%)_{\text{melt}}^{2.42}$$

نسبت FeO/MgO مذابی که کرومیت از آن متبلور شده نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\ln (FeO/MgO)_{\text{spinel}} = 0.47 - 1.07 Al\#_{\text{spinel}} + 0.64 Fe^{3+}\#_{\text{spinel}} + \ln (FeO/MgO)_{\text{melt}}$$

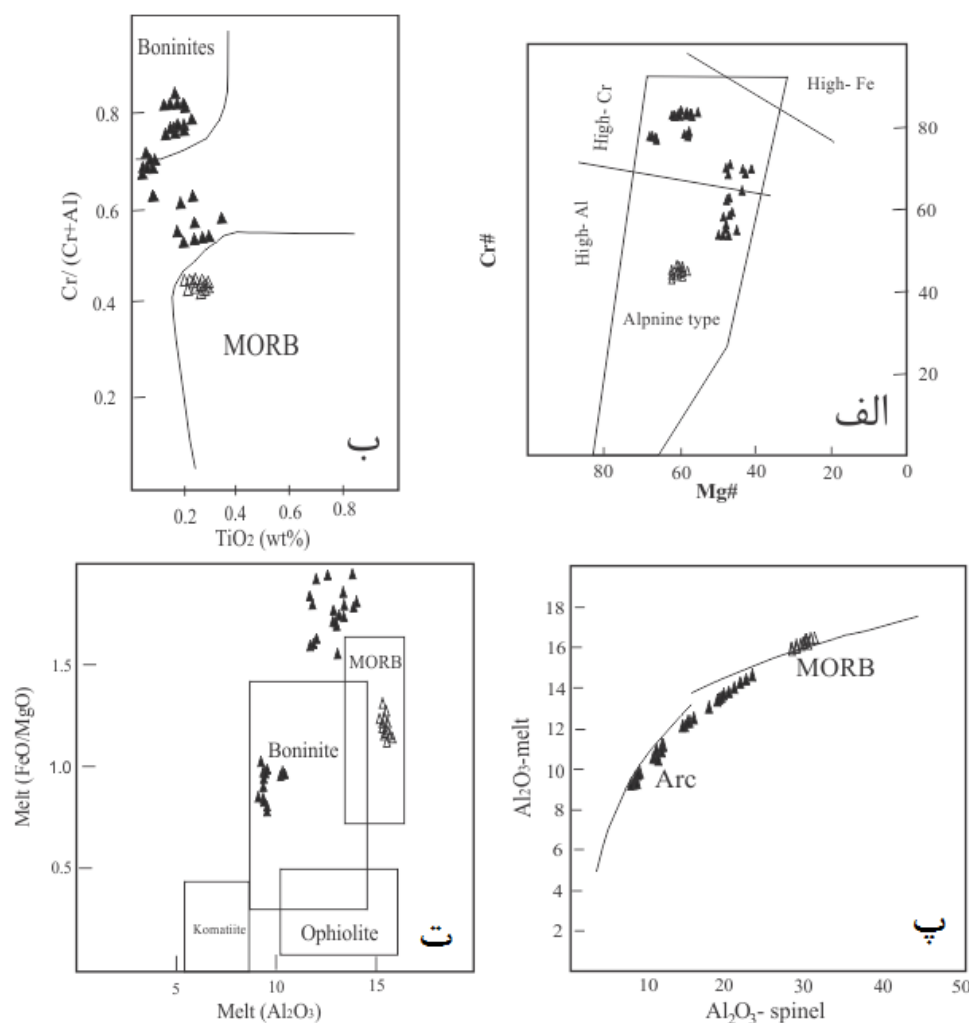
[۱۴]. بر این اساس، بیشتر کرومیت‌های غنی از کروم در کرومیت‌های سبزوار از ماگمای بونینیتی به دست آمده‌اند، درحالی‌که نمونه‌های غنی از آلومینیوم شبیه ماگماهای MORB هستند (شکل ۶ ب).

از ترکیب کرومیت برای محاسبه ترکیب شیمیایی مذاب-هایی که از آن متبلور شده است استفاده می‌شود و به همین علت کرومیت به عنوان یک ردیاب مهم برای تعیین خاستگاه

جدول ۲ میانگین ترکیب کروم (wt%) در کرومیت‌های افیولیت سبزوار بر اساس داده‌های ریزپردازش الکترونی. n = تعداد تجزیه‌ها در هر نمونه.

شناسه نمونه	CS1	CS8	CS6	CS3	CS7	CS10	CS9	CS4	CS5	CS2
n	۶	۸	۴	۵	۴	۵	۴	۶	۵	۵
SiO <sub>2</sub>	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
TiO <sub>2</sub>	۰.۲۲	۰.۲۶	۰.۲۴	۰.۲۳	۰.۱۸	۰.۰۶	۰.۱۵	۰.۱۷	۰.۱۷	۰.۱۶۷
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۹.۲۰	۲۹.۹۴	۲۱.۷۳	۲۱.۱۸	۱۸.۸۳	۱۵.۳۵	۱۱.۸۱	۱۱.۰۵	۸.۶۶	۸.۶۷
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳۵.۷۹	۳۵.۱۰	۳۷.۰۷	۴۲.۰۵	۴۶.۷۸	۵۰.۹۶	۵۸.۴۷	۵۷.۰۶	۶۱.۶۲	۶۱.۱۶
NiO	۰.۱۷	۰.۱۷	۰.۲۰	۰.۲۳	۰.۲۵	۰.۲۸	۰.۲۹	۰.۲۷	۰.۳۴	۰.۳۸
FeO	۱۷.۹۲	۱۷.۶۰	۲۵.۹۸	۲۳.۳۶	۲۲.۲۳	۲۲.۶۶	۱۳.۶۷	۱۷.۲۹	۱۵.۸۸	۱۷.۰۸
MnO	۰.۲۵	۰.۲۵	۰.۴۴	۰.۳۸	۰.۳۶	۰.۳۲	۰.۲۷	۰.۳۰	۰.۲۴	۰.۲۷
MgO	۱۵.۳۲	۱۵.۵۰	۱۳.۵۵	۱۲.۰۳	۱۱.۰۰	۱۰.۳۱	۱۵.۶۱	۱۳.۴۵	۱۳.۶۶	۱۲.۷۳
CaO	۰.۰۱	۰	۰.۰۵	۰.۰۱	۰.۰۱	۰	۰.۰۱	۰	۰	۰
Na <sub>2</sub> O	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۱	۰	۰	۰.۰۱	۰	۰.۰۱
K <sub>2</sub> O	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مجموع	۹۸.۸۸	۹۸.۸۵	۹۹.۲۶	۹۹.۵۰	۹۹.۶۴	۹۹.۹۵	۱۰۰.۲۷	۹۹.۶۰	۱۰۰.۵۸	۱۰۰.۴۵
کاتیون‌ها (فرمول ساختاری بر پایه ۴ اکسیژن)										
Si	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Ti	۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Al	۱.۰۲	۱.۰۴	۰.۷۹	۰.۷۸	۰.۷۱	۰.۵۸	۰.۴۴	۰.۴۲	۰.۳۳	۰.۳۳
Cr	۰.۸۴	۰.۸۲	۰.۹۰	۱.۰۳	۱.۱۷	۱.۳۰	۱.۴۵	۱.۴۵	۱.۵۷	۱.۵۷
Ni	۰	۰	۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱
Mn	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱
Mg	۰.۶۸	۰.۶۸	۰.۶۲	۰.۵۶	۰.۵۱	۰.۵۰	۰.۷۳	۰.۶۵	۰.۶۶	۰.۶۲
Fe <sub>3</sub>	۰.۱۳	۰.۱۲	۰.۳۰	۰.۱۷	۰.۱۲	۰.۱۲	۰.۱۰	۰.۱۲	۰.۱۰	۰.۰۹
Fe <sub>2</sub>	۰.۳۲	۰.۳۱	۰.۳۷	۰.۴۳	۰.۴۷	۰.۵۰	۰.۲۶	۰.۳۵	۰.۳۳	۰.۳۸
Mg#per	۶۰.۳۷	۶۱.۱۰	۴۸.۱۹	۴۷.۸۷	۴۶.۸۷	۴۴.۸۰	۶۷.۰۵	۵۸.۱۲	۶۰.۵۴	۵۷.۰۵
Cr#per	۴۵.۱۳	۴۴.۲۰	۵۳.۳۵	۵۷.۰۶	۶۲.۵۱	۶۹.۰۲	۷۶.۸۶	۷۷.۶۰	۸۲.۶۸	۸۲.۵۶
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> مذاب	۱۶.۱۱	۱۶.۲۸	۱۴.۲۶	۱۴.۱۱	۱۳.۴۳	۱۲.۳۵	۱۱.۰۸	۱۰.۷۸	۹.۷۵	۹.۷۵
(FeO/MgO) مذاب	۱.۲۲	۱.۲۰	۱.۶۹	۱.۷۵	۱.۷۸	۱.۸۱	۰.۶۷	۰.۹۷	۰.۸۴	۰.۹۷





شکل ۶ نمودارهای تفکیک نوع ماگمای اولیه برای کرومیت‌های سبزوار بر اساس ترکیب بلورهای کرومیت. الف) نمودار  $Mg\#$  نسبت به  $Cr\#$  [۱۸]. ب) نمودار  $TiO_2$  نسبت به  $Cr\#$  [۱۷]. پ) نمودار  $Al_2O_3$  محاسبه شده برای مذاب نسبت به  $Al_2O_3$  کرومیت [۱۹]. ت) نمودار اکسید آلومینیوم نسبت به  $FeO/MgO$  محاسبه شده برای مذاب [۱۷]. علائم همانند شکل ۴ است.

بیشتر کرومیت‌های غنی از کروم ماهیت بونینیتی داشته‌اند درحالی‌که نمونه‌های غنی از آلومینیوم در گستره کرومیت‌های برآمده از MORB قرار می‌گیرند (شکل ۶ ت).

#### بحث

داده‌های EPMA بر روی بلورهای کرومیت سبزوار در این پژوهش، بیانگر از وجود دو نوع ماگمای مختلف در تشکیل آنهاست. این نتیجه همسو با پژوهش‌های پیشین است که بر وجود کرومیت‌های غنی از کروم و غنی از آلومینیوم در این ناحیه اشاره کرده‌اند [۶، ۷]. داده‌های شیمیایی سنگ کل به ویژه عناصر PGE می‌تواند اطلاعات تکمیلی در مورد ماهیت و

در این معادله،  $Al\#$  و  $Fe^{3+}\#$  به ترتیب نسبت‌های اتمی  $Al/(Al + Fe^{3+} + Cr)$  و  $Fe^{3+}/(Al + Fe^{3+} + Cr)$  هستند. با به کارگیری این روابط مشخص می‌شود که کرومیت‌های غنی از آلومینیوم سبزوار از یک ماگما با  $16.3 - 16.1$  درصد وزنی  $Al_2O_3$  متبلور شده در حالیکه مقدار  $Al_2O_3$  در ماگمای مادر کرومیت‌های غنی از کروم کمتر از  $15$  درصد وزنی ( $14.3 - 9.8$ ) بوده است. این مقادیر  $Al_2O_3$  نشان از ماهیت متفاوت ماگمای اولیه کرومیت‌های غنی از کروم (روند مشابه ماگماهای کمائی) و غنی از آلومینیوم (مشابه MORB) دارد (شکل ۶ پ). در نمودار متمایز کننده بر پایه مقدار  $Al_2O_3$  و  $FeO/MgO$  محاسبه شده در مذاب، ماگمای تشکیل دهنده

چگونگی شکل گیری ماگماهای مختلف دخیل در فرایندهای زمین ساختی ماگمایی منطقه ارائه دهد.

میانگین نسبت‌های Ru/Pt, Pd/Ir و IPGE/PPGE در کرومیتیت‌های غنی از کروم به ترتیب ۰/۲۵، ۱۴/۲۰ و ۶/۲۲ است. الگوی عناصر PGE بهنجارشده نسبت به کندریت در کرومیتیت‌های غنی از کروم (شکل ۳ الف) شبیه سایر کرومیتیت‌های انبانی در افیولیت‌های بالای مناطق فرورانش (SSZ) است [۲۰]. در این کرومیتیت‌ها، غنی‌شدگی IPGE/PPGE نمایان است که موجب شیب منفی در الگوها می‌شود [۵، ۱۵]. غنی‌شدگی عناصر IPGE به حضور میانبار کانی‌های ریز دربردارنده این عناصر در کرومیتیت‌ها نسبت داده می‌شود [۱۵]. در جایگاه‌های SSZ که درجه ذوب بخشی بالاتر از پشته‌های میان اقیانوسی است (مذاب‌های بونینیتی)، عناصر PGE به ویژه PPGE طی ذوب‌بخشی رفتار ناسازگار دارند. این امر سبب می‌شود که کرومیتیت‌های انبانی برآمده از مناطق SSZ به شدت تهی از PPGE شده و بنابراین غنی از کروم و IPGE شوند [۵]. البته در الگوی PGE این کرومیتیت‌ها ناهنجاری منفی شدید Pt و مثبت Ru بارز است (شکل ۳ الف). پلاتینیوم نسبت به سایر عناصر PGE ناسازگارتر عمل می‌کند و معمولاً در آلیاژ Pt-Fe جدایش یافته متمرکز می‌شود؛ بنابراین یک ناهنجاری منفی Pt در کرومیتیت‌هایی که در مراحل اولیه تشکیل می‌شوند، بوجود می‌آید [۲۱]. در کرومیتیت‌های غنی از کروم سبزواری با افزایش مقدار کروم، مقدار PGE افزایش می‌یابد (جدول ۱) که مشابه به برخی دیگر از کرومیتیت‌های انبانی دنیا است [۱۶، ۲۲، ۲۳]. از سوی دیگر در کرومیتیت‌های غنی از آلومینیوم، میانگین نسبت‌های Pd/Ir, Ru/Pt و IPGE/PPGE به ترتیب ۱/۹۰، ۸/۴۵ و ۲/۸۸ است. مقادیر Pd/Ir به عنوان شاخصی از تفکیک عناصر PGE در نظر گرفته می‌شود [۲]. بر این اساس، مقدار تفکیک PGE در کرومیتیت‌های غنی از آلومینیوم سبزواری به مراتب کمتر از انواع غنی از کروم بوده و الگوی عناصر PGE بهنجارشده نسبت به کندریت در این کرومیتیت‌ها مشابه ماگماهای تولیتی است، زیرا در جایگاه‌های زیر پشته‌های میان اقیانوسی به دلیل تحرک محدود Cr و PGE، این عناصر طی ذوب‌بخشی در گوشته

بالایی (مذاب‌های MORB) به شکل سازگار عمل می‌کنند [۱۶]. غنی‌شدگی Ru در کرومیتیت‌های غنی از آلومینیوم نیز مانند همتای غنی از کروم آنها دیده می‌شود (شکل ۳ الف). ناهنجاری مثبت Ru در الگوهای PGE به وجود لاریت در کرومیتیت‌ها نسبت داده می‌شود [۱۷]. مذاب‌های تولید شده شبه MORB که از ذوب درجه پایین تشکیل شده‌اند، فراوانی PGE پایین دارند، در حالیکه در مذاب‌های بونینیتی تشکیل شده بوسیله ذوب آبدار مقدار PGE به نسبت بالاتر است [۲۴]. در نمونه‌های مورد بررسی، فراوانی PGE در کرومیتیت‌های غنی از کروم بیشتر از انواع غنی از آلومینیوم است (شکل ۳ ب). افزون بر این، مقدار پایین عناصر HFSE و REE در کرومیتیت‌های غنی از کروم در ناحیه سبزوار (شکل ۵) مشابه افیولیت‌های SSZ است [۲۰]؛ در حالیکه مقادیر بالاتر HFSE در نمونه‌های کرومیتیتی با Al بالا مشابه پریدوتیت‌های پشته میان اقیانوسی است [۲۵].

تفکیک ماگمایی، ذوب‌بخشی و فرایندهای دگرسانی گرمایی سه عاملی هستند که مقدار PGE در سنگ‌های آذرین را کنترل می‌کنند [۲۵]. دو عامل نخست (تفکیک ماگمایی و ذوب بخشی) مؤثرتر هستند در حالیکه فرایندهای دگرسانی تنها اثر محدودی بر بازتحرک Au و تا حد کمتری Pt و Pd دارد [۱۹]. عناصر PGE براساس مقدار سازگاری طی ذوب بخشی به دو گروه تقسیم می‌شوند: گروه نخست عناصر IPGE (شامل Os, Ir و Ru) که دارای بالاترین نقاط ذوب هستند و گروه دوم عناصر PPGE (شامل Pt, Rh و Pd) که نقطه ذوب پایین‌تر دارند [۲۵]. عناصر PGE و Cr در سنگ‌های گوشته بوسیله ترکیبی از فرایندهای ذوب‌بخشی و واکنش مذاب/سنگ در گوشته ایجاد می‌شوند [۵]. گستره تقریباً ثابت تغییرات نسبت Pd/Ir در کرومیتیت‌های سبزوار (۱/۹) در نمونه‌های غنی از آلومینیوم و ۰/۲۴ - ۰/۲۶ در نمونه‌های غنی از کروم) نشان می‌دهد که ذوب‌بخشی نقش بیشتری نسبت به تفکیک ماگمایی در تشکیل آنها داشته است [۱]. معادلات مختلفی برای ارتباط بین درجه ذوب‌بخشی و Cr# در کرومیتیت‌ها ارائه شده است. به عنوان مثال می‌توان به معادله زیر اشاره کرد [۲۶]:

$$F\% = 10 \times \ln (Cr\#_{spi}) + 25/8$$

براساس این رابطه، مقدار ذوب‌بخشی محاسبه شده در کرومیتیت‌های غنی از کروم بین ۱۷/۷ تا ۲۲/۲ درصد تغییر می‌کند، در حالیکه این مقدار برای کرومیتیت‌های غنی از آلومینیوم ۱۶/۱-۱۵/۵ درصد است. بنابراین کرومیتیت‌های غنی از کروم در درجه‌های ذوب بالاتری نسبت به نمونه‌های غنی از آلومینیوم تشکیل شده‌اند.

در سنگ‌های گوشته بالایی، کانی‌های سولفیدی فلزات پایه، میزبان اصلی عناصر PPGE یعنی Pd و Pt هستند [۲۷]. در درجه‌های ذوب‌بخشی بالا (تولید ماگمای بونینیتی)، Pd و Pt از ماگماهای اشباع از S خارج می‌شوند و یک بازمانده گوشته‌ای به شدت تهی شده از این عناصر باقی می‌ماند [۵]. تهی‌شدگی شدید کرومیتیت‌های غنی از کروم سبزوار نشان می‌دهد که درجه بالای ذوب‌بخشی یا ذوب‌بخشی یک پریدوتیت گوشته‌ای تهی شده (ذوب مرحله دوم)، عامل تشکیل آنها بوده است [۱۸]. از آنجا که انباشته‌های سولفیدی در پریدوتیت‌های میزبان دیده نمی‌شود، واکنش متقابل سنگ/مذاب می‌تواند منجر به تهی‌شدگی Pd و Pt در کرومیتیت-های غنی از کروم سبزوار شده باشد [۲۲]. افزایش تراکم عناصر IPGE با نسبت پایین Pd/Ir در کرومیتیت‌های با Cr بالا در سبزوار، نیازمند درجه ذوب‌بخشی بالای گوشته همراه با نفوذ مذاب غنی از سیال است. اسپینل‌های با Cr بالا شاخص ماگماهای بونینیتی یا تولیت‌های با Mg بالا در جایگاه SSZ هستند (شکل ۶ ب). ذوب‌بخشی درجه بالا معمولاً موجب غنی‌شدگی ماگما از عناصر دیرگداز چون Ni، Co، Cr و PGE می‌شود [۲۸]. این ویژگی‌ها در کرومیتیت‌های غنی از کروم سبزوار دیده می‌شود (شکل‌های ۳، ۴).

ذوب‌بخشی گوشته اولیه می‌تواند هم مذاب‌های اشباع از گوگرد و هم مذاب‌های اشباع از آن را تشکیل دهد. اگر مذاب‌ها اشباع از S باشند، با کاهش دما و فشار، مایعات سیال حل‌ناپذیر سولفیدی از مذاب اولیه جدا شده و در گوشته بازمانده باقی می‌مانند. این امر به علت ماهیت آهن دوست عناصر PGE، موجب تهی‌شدن مذاب از PGE می‌شود. مذاب‌های بازالتی تشکیل شده در زیر مناطق در حال گسترش (پشته‌های میان اقیانوسی یا حوضه‌های پشت کمانی) بوسیله ذوب‌بخشی

درجه پایین (در مقایسه با ماگمای بونینیتی) ایجاد می‌شوند. ذوب‌بخشی درجه پایین برای خروج همه سولفیدهای گوشته کافی نیست و بنابراین مذاب‌های ایجاد شده مقادیر کمتری PGE خواهند داشت [۱۶، ۱۴، ۲۲]. مقدار پایین PGE و غنی‌شدگی نسبی عناصر HFSE و REE (شکل‌های ۳، ۵) در کرومیتیت‌های سرشار از Al در افیولیت‌های سبزوار ماهیت اشباع از S ماگمای اولیه و تشکیل آنها در نتیجه ذوب بخشی درجه پایین را تأیید می‌کند [۱۳، ۲۳].

پژوهش‌های اخیر بر پهنه افیولیتی سبزوار بر وجود دو محیط زمین‌ساختی ماگمایی طی تشکیل این مجموعه افیولیتی در کرتاسه پسین تأکید دارند، اما تفسیرهای ارائه شده در این مورد متفاوت است. خلعتبری و همکاران [۸] با استفاده از بررسی توالی سنگ‌های خروجی افیولیت سبزوار تبدیل محیط زمین‌ساختی ماگمایی از یک حوضه کمانی حاشیه‌ای به یک حوضه پشت کمانی را پیشنهاد داده‌اند. در حالی که شفایی مقدم و همکاران [۶] با بررسی ترکیب کانی‌ها (پیروکسن و کرومیت) در سه مقطع از پریدوتیت‌های افیولیت سبزوار و با توجه به روابط صحرایی بین سنگ‌های میزبان، فرضیه دیگری را مطرح کرده‌اند: نخست مذاب‌های شبه MORB (بازالت‌های پیش قوس) شکل‌گیری شده و باعث تشکیل کرومیتیت‌های فقیر از کروم و ایجاد کلینوپیروکسن-پلاژیوکلاز شده‌اند. پس از آن با افزایش مقدار سیال‌های برآمده از ورقه فرورونده، مذاب‌های کمانی یا بونینیتی شکل گرفته و به نوبه خود دونیت‌ها و کرومیتیت‌های غنی از کروم را تشکیل داده‌اند. نتایج این پژوهش نیز نقش دو نوع ماگمای مختلف بونینیتی و تولییتی در شکل‌گیری کرومیتیت‌ها و سنگ‌های فرامافیک افیولیت سبزوار را تأیید می‌کند. از این رو، امکان وجود حوضه‌های پیش کمانی یا پشت کمانی طی تشکیل افیولیت سبزوار وجود دارد. البته داده‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مستندات اشاره شده در بررسی شفایی مقدم و همکاران [۶] برای همه افیولیت‌های سبزوار صدق نمی‌کند. برخلاف فرضیه ایشان، کرومیتیت‌های فقیر از کروم (غنی از آلومینیوم) تنها منحصر به سنگ میزبان لرزولیت غنی از پلاژیوکلاز نیستند چراکه نمونه CS1 با یک سنگ میزبان دونیتی، یک کرومیتیت غنی از

شده‌اند. بین نوع پریدوتیت میزبان و مقدار کروم در کرومیتیت های سبزوار ارتباط مشخصی دیده نمی‌شود و برای تعیین تقدم تشکیل محیط‌های کمانی و کششی و تفسیر زمین دینامیک ناحیه‌ای، سایر عوامل زمین شناسی را نیز باید در نظر گرفت.

#### قدردانی

بخشی از هزینه‌های این پژوهش از طریق پژوهانه دانشگاه پیام نور تأمین شده است. که بدینوسیله از مساعدت معاونت پژوهشی دانشگاه قدردانی می‌شود. متن اولیه این مقاله توسط سه داور محترم مجله با دقت مورد بررسی قرار گرفت و پیشنهادهای ارزنده‌ای از جانب آنها برای بهبود کیفیت متن نهایی ارائه گردید که از این بزرگواران تقدیر می‌شود.

#### مراجع

- [1] Garuti G., Fershtater G., Bea F., Montero P., Pushkarev E.V., Zaccarini F., "Platinum group elements as petrological indicators in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: preliminary results", Tectonophysics 276 (1997) 181-194.
- [2] Naldrett A.J., Hoffman E.L., Green A.H., Chou C.L., Naldrett S.R., Alcock R.A., "The composition of Ni-sulfide ores, with particular reference to their content of PGE and Au", Canadian Mineralogist 17 (1979) 403-415.
- [3] Barnes S.J., Fiorentini M.L., "Iridium, ruthenium and rhodium in komatiites: evidence for iridium alloy saturation", Chemical Geology 257 (2008) 44-58.
- [4] Locmelis M., Pearson N.J., Barnes S.J., Fiorentini M.L., "Ruthenium in komatiitic chromite", Geochimica et Cosmochimica Acta 75 (2011) 3645-3661.
- [5] Zhou M.F., Sun M., Keays R.R., Kerrich R.W., "Controls on platinum-group elemental distributions of podiform chromitites: a case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belts", Geochimica et Cosmochimica Acta 62 (1998) 677-688.
- [6] 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

آلومینیوم است (جدول ۱). از سوی دیگر، نمونه CS5 که یک کرومیتیت غنی از کروم است، از یک سنگ میزبان لرزولیتی برداشت شده است. افزون بر این، روابط صحرایی (قطع شدگی) بیان شده در مورد کرومیتیت‌ها و سنگ‌های میزبان در همه پریدوتیت‌های سبزوار مشابه سه مقطع بررسی شده در مرجع [۶] نیستند. بنابراین، تنوع ترکیبی و توزیع کرومیتیت‌های سبزوار باوجود تأکید بر حضور محیط کمانی و کششی طی تشکیل افیولیت سبزوار، به تنهایی برای تعیین محیط زمین ساختی ماگمایی این پهنه کافی نیست و بررسی سایر عوامل (توالی سنگ‌های آتشفشانی یا سن سنگ‌های میزبان) ضروری است.

#### برداشت

براساس داده‌های تجزیه نقطه‌ای بلورهای کرومیت و شیمی سنگ کل کرومیتیت‌ها، در پهنه افیولیتی سبزوار دو نوع کرومیتیت غنی از کروم و غنی از آلومینیوم قابل شناسایی است. کرومیتیت‌های غنی از کروم که فراوان‌تر هستند، مقدار  $\text{Cr\#}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{S}$  و فلزات سنگین ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Co}$  و  $\text{Zn}$ ) بیشتری نسبت به گروه دوم دارند. در حالی که در کرومیتیت‌های غنی از آلومینیوم، مقدار REE و HFSE ( $\text{Ti}$ ,  $\text{P}$ ,  $\text{Ga}$ ,  $\text{Y}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Nb}$  و  $\text{Hf}$  و  $\text{Th}$ ) بیشتر است. ترکیب بلورهای کرومیت نشان می‌دهد که اغلب کرومیتیت‌های غنی از کروم از ماگمای بونینیتی شکل گرفته‌اند، در حالیکه ماگمای تولییتی شبه MORB نقش اصلی را در تولید کرومیتیت‌های غنی از آلومینیوم داشته است. فراوانی عناصر PGE در کرومیتیت‌های سرشار از کروم به نسبت بیشتر از نمونه‌های غنی از آلومینیوم است. الگوی توزیع PGE و نسبت بین عناصر مختلف این گروه از عناصر اشاره به ماهیت متفاوت ماگمای تشکیل دهنده دو گروه کرومیتیت‌های سبزوار دارد که با نتایج تجزیه نقطه‌ای کرومیت‌ها همخوانی دارد. کرومیتیت‌های غنی از کروم از ذوب-بخشی درجه بالا (مذاب بونینیتی) و در شرایط اشباع از گوگرد در یک محیط کمانی (SSZ) شکل گرفته‌اند. از سوی دیگر، نمونه‌های غنی از آلومینیوم از ذوب‌بخشی درجه پایین (مذاب تولییتی) در شرایط اشباع از گوگرد و در یک محیط کششی (پشته‌های میان اقیانوسی یا حوضه‌های پشت کمانی) تشکیل

- element (PGE, REE) and isotope data*", Mineralium Deposita 34 (1999) 250–272.
- [16] Uysal I., Tarkian M., Sadiklar M.B., Zaccarini F., Meisel T., Garuti G., Heidrich S., "Petrology of Al- and Cr-rich ophiolitic chromitites from the Muğla, SW Turkey: implications from composition of chromite, solid inclusions of platinum-group mineral, silicate, and base-metal mineral, and Os-isotope geochemistry", Contributions to Mineralogy and Petrology 158 (2009) 659–674.
- [17] Ismail S.A., Kettanah, Y.A., Chalabi S.N., Ahmed A.H., Arai S., "Petrogenesis and PGE distribution in the Al- and Cr-rich chromitites of the Qalander ophiolite, northeastern Iraq: Implications for the tectonic environment of the Iraqi Zagros Suture Zone", Lithos 202–203 (2014) 21–36.
- [18] Najafzadeh A.R., "Ahmadipour H., Using platinum-group elements and Au geochemistry to constrain the genesis of podiform chromitites and associated peridotites from the Soghan mafic-ultramafic complex, Kerman, Southeastern Iran", Ore Geology Reviews 60 (2014) 60–75.
- [19] Xiong F., Yang J., Robinson P.T., Xu X., Liu Z., Zhou W., Feng G., Xu J., Li J., Niu X., "High-Al and high-Cr podiform chromitites from the western Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet: Implications from mineralogy and geochemistry of chromian spinel, and platinum-group elements", Ore Geology Reviews 80 (2017) 1020–1041.
- [20] Orberger B., Lorandb J.P., Girardeau J., Merciera J.C.C., Pitragool S., "Petrogenesis of ultramafic rocks and associated chromitites in the Nan Uttaradit ophiolite", Northern Thailand. Lithos 35 (1995) 153–182.
- [21] Bacuta G.K., Kay R.W., Gibbs A.K., Lipin B.R., "Platinum-group elements abundance in chromite deposits of the Acoje ophiolite block, Zambales ophiolite complex, Philippines", Journal of Geochemical Exploration 37 (1990) 113–145.
- [22] Ahmed A.H., Arai S., "Unexpectedly high-PGE chromitite from the deeper mantle section of the northern Oman ophiolite and its tectonic implications", Contributions to Mineralogy and Petrology 143 (2002) 263–278.
- [23] Uysal I., Tarkian M., Sadiklar B.M., Sen C. "Platinum-group-element geochemistry and mineralogy of ophiolitic chromitites from the Cop podiform chromitites", Gondwana Research 27 (2015) 575-593.
- [7] Shirzadi A.R., Masoudi F., Rahimzadeh B., "Nature of Chromite parent magma In Sabzevar ophiolite (North-East of Iran)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 21 (2013) 49-58.
- [8] 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.
- [9] Mazhari S.A., "The investigation of trace elements composition and role in the Magnetiteore genesis of Namen pluton, West of Sabzevar by LA-ICP-MS", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 25 (2017) 739-748.
- [10] Nasrabadi M., Moeinvaziri H., Razavi M.H., Mohajjel M., "Mineralogical paragenesis changes of NW granulites of Sabzevar during metamorphic evolutions", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 18 (2009) 531-544.
- [11] Mazhari S.A., Mojtahedifar V., Jafarian A., "Geochemistry, petrogenesis and mineralization of Namen plutonic rocks, SW of Sabzevar zone", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 23 (2015) 517- 532.
- [12] 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.
- [13] Rollinson H., "The geochemistry of mantle chromitites from the northern part of the Oman ophiolite: inferred parental melt compositions", Contribution to Mineralogy and Petrology 156 (2008) 273–288.
- [14] González-Jiménez J.M., Proenza J.A., Gervilla F., Melgarejo J.C., Blanco-Moreno J.A., Ruiz- Sánchez R., et al., "High-Cr and high-Al chromitites from the Sagua de Tánamo district, Mayarí-Cristal ophiolitic massif (eastern Cuba): constraints on their origin from mineralogy and geochemistry of chromian spinel and platinum-group elements" Lithos 125 (2011) 101–121.
- [15] Melcher F., Grum W., Thalhammer T.V., Thalhammer O.A.R., "The giant chromite deposits at Kempirsai, Urals: constraints from trace

- [27] Luguët A., Lorand J.P., Seyler M., "Sulfide petrology and highly siderophile element geochemistry of abyssal peridotites: a coupled study of samples from the Kane Fracture Zone (45°W 23°20' N, MARK area, Atlantic Ocean)", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67 (2003) 1553–1570.
- [28] Pearce J.A., Van De Lann S.R., Arculus R.J., Murton B.J., Ishii T., Peate D.W., et al., "Boninite and harzburgite from leg 125 (Bonin–Mariana forearc): a case study of magma genesis during the initial stage of subduction. In: Fryer, P., Pearce, J.A., Stokking, L.B. (Eds.)", *Proceedings of Ocean Drilling Program Leg 125 Bonin/Mariana region* (1992) 623–656.
- Mountains northeastern Turkey*", *The Canadian Mineralogist* 45 (2007) 355–377.
- [24] Prichard H.M., Neary C.R., Fisher F.C., O'Hara M.J., "PGE-rich podiform chromitites in the Al'Ays ophiolite complex, Saudi Arabia: an example of critical mantle melting to extract and concentrate PGE", *Economic Geology* 103 (2008) 1507–1529.
- [25] Dilek Y., Rassios A.H.E., Furnes H., Shallo M., "Mesozoic–Cenozoic tectonics and Tethyan evolution of the western Balkan Peninsula: an ophiolite perspective", *Geophysical Research Abstracts* 9 (2007) 9–27.
- [26] Hellebrand E., Snow J.E., Dick H.J.B., Hofmann A.W., "Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites", *Nature* 410 (2001) 677–681.