

## کاربرد عناصر گروه پلاتین (PGE) در اکتشاف و ارزیابی اقتصادی در کانسارهای کرومیت کمر بند افیولیتی سبزوار

نوشته: حمیدرضا وطن‌پور\*، احمد خاکزاد\* و مجید قادری\*\*

\*دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
\*\*گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۵/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۰۸/۱۴

### چکیده

کمر بند افیولیتی سبزوار در شمال‌خاوری ایران و در شمال سبزوار واقع است. این تحقیق برای نخستین بار در ایران با هدف اکتشافی در بخش باختری این کمر بند انجام شده است. مطالعه عناصر گروه پلاتین (PGE) در پی بردن به شرایط اولیه تشکیل و ارزیابی اقتصادی کانسارهای کرومیت بویژه در مجموعه‌های افیولیتی اهمیت زیادی دارد. الگوی پراکنده‌گی PGE در برابر کندریت‌ها در کرومیت‌های مرتبط با افیولیت‌ها دارای شیب منفی است و این امر نشان می‌دهد که کرومیت در نخستین مراحل تبلور ماگما، عناصر سازگار گروه پلاتین را از ماگما جدا می‌سازد. این الگوها در کرومیت‌های منطقه سبزوار، نشان‌دهنده ارتباط کامل این سنگ‌ها با مجموعه‌های افیولیتی است. کانسارهایی که در آنها، نسبت عناصر ناسازگار به سازگار مانند Pd/Ir و Cu/Ni بالا باشد، از ماگمایی تفریق‌یافته‌تر حاصل ذوب بخشی با درصد کمتر، نتیجه شده‌اند. بنابراین، احتمال اقتصادی بودن آنها کمتر است. در کانسارهای کرومیتی غنی از AI، این نسبت‌ها بالاتر از نوع غنی از Cr است. نسبت Pd/Ir در کانسارهای کرومیت مورد مطالعه به طور میانگین، پایین (کمتر از ۱) و مشابه بسیاری از کانسارهای مهم افیولیتی جهان است. پایین بودن این نسبت همراه با بالا بودن عدد کروم (Cr/(Cr+Al) > ۰/۶) نوید حضور کانسارهای کرومیت با پتانسیل بالا و از درجه متالورژی را می‌دهد. کرومیت‌های منطقه مورد مطالعه از نظر عناصر کالکوفیل ترکیب یکسان ندارند. با استفاده از الگوی PGE مشخص شده است که پریدوت‌های منطقه گفت در بخش‌های بالایی بیشتر مشابه سنگ‌های فرابازی انباشتی پوسته اقیانوسی و در بخش‌های زیرین منطقه فرومد مشابه گوشته است.

**کلید واژه‌ها:** افیولیت، عناصر گروه پلاتین، کرومیت، پتانسیل اقتصادی، سبزوار

### مقدمه

رسوبی غیرافیولیتی محصور شده‌اند و با یکدیگر اغلب مرزهایی گسلی دارند. کانسارهای مهم کرومیتی درون سنگ‌های پریدوتیتی سریانتینی شده که حجم وسیعی از گستره را تشکیل می‌دهند، قرار دارند. از مهم‌ترین معادن منطقه، معدن گفت، رضا و معادن میر محمود در ناحیه فرومد را می‌توان نام برد. کرومیت‌های موجود در این معادن با عیار میانگین ۴۲ درصد اکسید کروم و عدد کروم بالاتر از ۰/۶، به طور عمده از نوع متالورژی بوده و پر عیار به شمار می‌آیند (Vatanpour et al., 2004). موقعیت کمر بند افیولیتی، زمین‌شناسی واحدها و معادن مذکور در تصویر ماهواره‌ای و نقشه ساده شده زمین‌شناسی از این منطقه در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

### کاربرد عناصر گروه پلاتین در اکتشاف و ارزیابی اقتصادی افیولیت‌ها برای کانسارهای کرومیت

از مهم‌ترین ویژگی‌های کرومیت‌های مرتبط با مجموعه‌های افیولیتی، غنی بودن آنها از نظر عناصر Os، Ir و Ru و پایین بودن نسبت (Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru) است. این امر نشان می‌دهد که کرومیت در نخستین مراحل تبلور ماگما، عناصر سازگار گروه پلاتین را از ماگما جدا می‌سازد (Econoumo-Eliopoulos, 1993; Peck & Keays, 1990). شیب مثبت الگوی پراکنده‌گی PGE در برابر کندریت‌ها در مجموعه‌های چینه‌سان مانند بوشولد (به علت بالا بودن مقادیر Pd و Pt نسبت به Ir و Os) در مقابل شیب منفی این الگو در مجموعه‌های افیولیتی (کمتر بودن مقدار Pd و Pt نسبت به Ir و Os) می‌تواند دلیل بر غنی بودن اولیه سولفیدهای فلزی از عناصر گروه پلاتین در این مجموعه‌ها باشد. توضیحی را که Irvine et al. (1986) درباره آمیختگی ماگمایی در سامانه سیلیس، اولیون و کرومیت برای تشکیل لایه‌های کرومیتی در مجموعه‌های چینه‌سان مانند استیل‌واتر و بوشولد ارائه دادند، در مورد مجموعه‌های افیولیتی نیز می‌تواند صادق باشد و تهنشینی کرومیت و سولفیدهای ناهم‌آمیز را نیز توجیه کند (Econoumo-Eliopoulos, 1995). Irvine et al. (1986) آمیختگی یک ماگمای منزیمی را به یک ماگمای تولیتی غنی از

اکتشاف و پی‌جویی پتانسیل‌های کرومیت و قضاوت در مورد اهمیت اقتصادی مجموعه‌های افیولیتی و آمیزه‌های افیولیتی، به علت پیچیدگی و درهم‌ریختگی واحدهای آن، بسیار دشوار است. مطالعات زمین‌شیمیایی در این مجموعه‌ها با هدف اکتشاف منابع کرومیت در کشور ما کمتر مورد توجه بوده است. با توجه به شباهت کانسارهای یک منطقه از نظر اکسیدهای عناصر اصلی، مطالعه عناصر جزئی و گروه پلاتین، کمک زیادی به قضاوت و پیش‌بینی پتانسیل و ارزش اقتصادی این مجموعه‌ها می‌نماید. این عناصر علاوه بر این که ممکن است خود تشکیل انباشته‌ها و پتانسیل‌های ارزشمند را بدهند، در اکتشاف و پی‌جویی کانسارهای کرومیت به کار گرفته می‌شوند. اظهار نظر در مورد پتانسیل کرومیت و پی‌جویی آن تاکنون در کشور ما و بویژه در منطقه سبزوار به شیوه سنتی و بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی و به ندرت نیز با روش‌های معمول زمین‌فیزیکی بوده است. در این تحقیق که برای اولین بار با هدف اکتشافی در ایران و در گستره مورد مطالعه صورت پذیرفته، سعی شده است با استفاده از عناصر گروه پلاتین و نسبت‌های میان آنها، در مورد ارزش اقتصادی و اهمیت مجموعه افیولیتی سبزوار در ارتباط با کانسارهای کرومیت و PGE و نیز ویژگی و جایگاه سنگ‌های دربرگیرنده کانسارهای کرومیت بحث شود.

### موقعیت گستره مورد مطالعه، زمین‌شناسی و پتانسیل‌های کرومیت

کمر بند افیولیتی سبزوار به طول تقریبی ۲۰۰ کیلومتر و عرض ۱۰ تا ۳۰ کیلومتر در شمال‌خاوری ایران و در شمال شهرستان سبزوار واقع است. جاده سبزوار-اسفراین، آن را به دو بخش خاوری و باختری تقسیم می‌کند. گستره مورد مطالعه در انتهای بخش باختری قرار دارد. واحدهای سنگی موجود در افیولیت سبزوار به طور کلی در دو گروه افیولیتی و غیرافیولیتی قرار می‌گیرند. مهم‌ترین واحدهای افیولیتی، پریدوت‌های سریانتینی شده، گابروها، دیابازها و بازالت‌های اقیانوسی هستند که به طور تقریبی در غلافی از سنگ‌های رسوبی، آتشفشانی و آتشفشانی-

- افیولیت‌هایی که دارای هر دو نوع کرومیتیت (غنی از کروم و غنی از آلومینیم) با نسبت Pd/Ir پایین هستند، شامل قطعات افیولیت‌هایی با دو منشأ مختلف یا حاصل از مراحل مختلف تکامل حوضه هستند که فعالیت زمین‌ساختی باعث همجواری آنها شده است. جایی که PGE نشان‌دهنده تفریق نسبتاً شدید باشد، آنها احتمالاً از آمیختگی مقدار کمی ماگمای بسیار تفریق‌یافته در سطوح بالاتر چینه‌شناسی (نزدیک مرز موهوی سنگ‌شناختی) با فاصله از زون گسترش حاصل شده‌اند، بنابراین اهداف مناسبی برای پی‌جویی و اکتشاف کرومیت و PGE نیستند.

- کرومیتیت‌هایی که دارای نسبت PGE/S بالا باشند (ضریب R بالا) و یا نسبت (Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru) و یا Pd/Ir بالا داشته باشند، در ارتباط با توده‌های کرومیتیت کوچک و کم‌ارزش‌تر و یا افیولیت‌هایی هستند که از نظر کرومیت، پتانسیل اقتصادی خوبی ندارند. این نکته می‌تواند راهنمای بسیار مناسبی برای انتخاب مناطق قابل پی‌جویی و اکتشاف باشد.

### روش کار

مطالعه عناصر گروه پلاتین به‌طور عمده در دو گروه از سنگ‌های مرتبط با مجموعه افیولیتی انجام پذیرفته است. کرومیتیت‌ها و پریدوتیت‌های دربرگیرنده آنها دو گروهی هستند که اغلب، بیشترین تمرکز از این عناصر را در مجموعه‌های بازی-فرا بازی به خود اختصاص می‌دهند.

روش نمونه برداری به دو صورت سامان‌مند و پراکنده بوده که علاوه بر بررسی‌های کلی زمین‌شیمیایی، تغییرات سامان‌مند نیز مورد مطالعه قرار گیرد. در تحقیق حاضر، تغییرات سامان‌مند کمتر مورد نظر است. به این منظور، ۱۳ نمونه از کرومیتیت‌های معادن مختلف در سطح منطقه، بویژه معادن گنفت و فرومد تجزیه شیمیایی شده است. از این تعداد، ۷ نمونه برای کل عناصر گروه پلاتین و ۶ نمونه برای سه عنصر Pd، Ir و Pt تجزیه شد. نمونه‌برداری به گونه‌ای بوده که نمونه‌ها نماینده مناسبی از کل منطقه سبزواری باشند. همچنین، ۱۶ نمونه پریدوتیت سرپانتینی شده از معادن مختلف منطقه برداشت شده است. از این تعداد، ۳ نمونه برای تمام عناصر و ۱۳ نمونه برای سه عنصر Pd، Ir و Pt تجزیه شده‌اند. آماده‌سازی اولیه نمونه‌ها در ایران و در شرکت تحقیقاتی بینالود و تجزیه‌های شیمیایی عمدتاً در سازمان زمین‌شناسی چین در پکن و با روش ICP-MS با دقت در حد ppb انجام شده است. میانگین به دست آمده از هر منطقه برای هر یک از عناصر در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

### نقش PGE در پی‌جویی و تعیین پتانسیل منابع کرومیت در گستره مورد مطالعه

همان‌گونه که اشاره شد عناصر گروه پلاتین برای اکتشاف کناسارهای کرومیت کاربرد دارند. علاوه بر ارتباط PGE با دما، فوگاسیته اکسیژن، فوگاسیته گوگرد، جدایش آنها در محیطی از کانی‌های اولیه شکل گرفته در ماگمای سیلیکاتی و بنابراین دخالت آنها در تبلور کرومیت‌ها اهمیت خاصی دارد. اطلاعات موجود از کناسارهای کرومیت بویژه نوع انبانی (پودیفرم) نشان می‌دهد که عناصر گروه پلاتین بخصوص نسبت Pd/Ir در پی‌بردن به شرایط اولیه تشکیل و پیش‌بینی اقتصادی بودن یا نبودن کناسارهای کرومیت بویژه در مجموعه‌های افیولیتی اهمیت زیادی دارند (Economou-Eliopoulos, 1993). کناسارهایی با نسبت عناصر ناسازگار به سازگار بالا (مانند Pd/Ir یا Cu/Ni)، از ماگمایی تفریق‌یافته‌تر حاصل شده‌اند و بنابراین، احتمال اقتصادی بودن آنها کمتر است. در کناسارهای کرومیت غنی از Al، این نسبت بالاتر از نوع غنی از کروم است. به عبارت دیگر، این کناسارها اهمیت اقتصادی کمتری از نظر کروم خواهند داشت. با توجه به آنچه در مورد نقش PGE در شناخت محیط تشکیل و موقعیت کناسارهای کرومیت و پتانسیل اقتصادی آنها گفته شد و با تطبیق ویژگی‌های زمین‌شیمیایی مناطق مورد مطالعه با مطالب فوق می‌توان اظهار کرد که:

آلومینیم و جابه‌جایی مسیر تبلور به سمت محدوده کرومیت و تشکیل لایه‌های کرومیت (در مجموعه‌های چینه‌سان) نسبت می‌دهند. در مجموعه‌های افیولیتی نیز یک ماگمای بونینیتی غنی از منیزیم که در طی چندین مرحله ذوب پریدوتیت دیرگداز حاصل شده است، با ماگمایی مشابه ماگمای بالزاتی میان اقیانوسی (MORB) که در حال صعود و حرکت به طرف زون گسترش است، مخلوط می‌شود (وطن پور، ۱۳۷۵).

مخلوط حاصل از آمیختگی این دو ماگما با ترکیب متفاوت، مخلوطی از سولفیدها فوق اشباع شده است (Economou-Eliopoulos, 1993). بنابراین قابلیت انحلال سولفیدها تغییر می‌کند. غنی شدن از سولفید باعث خواهد شد بسیاری از عناصر گروه پلاتین به صورت سولفید همراه با تبلور کانی‌هایی مانند اولیون و کرومیت ته‌نشین شوند. در افیولیت‌ها، تبلور کرومیت‌ها قبل از این آغشتگی و زمانی که هنوز ماگما از سولفید اشباع نشده است، اتفاق می‌افتد و بنابراین کرومیت‌ها از نظر Pd و Pt فقیر هستند. این عناصر به شدت کالکوفیل بوده و بعداً در یک ماگما که از گوگرد غنی است به صورت سولفید ته‌نشین می‌شوند. تمرکز و غلظت PGE در سولفیدها بستگی به مقدار سولفید نیز دارد. مقدار زیاد PGE در سولفیدهایی مانند سولفیدهای ریف مرنسکی و افق UG-2 کرومیتی پوشود تنها وقتی ممکن است که ضریب تفکیک و جدایش PGE بین مذاب سولفید و ماگمای سیلیکاتی بسیار بالا باشد (Economou-Eliopoulos, 1993; Naldrett et al., 1990).

عوامل دیگری نیز می‌توانند مقدار PGE را در مجموعه‌های افیولیتی کنترل کنند. مقدار PGE ماگمای سیلیکاتی یکی از مهم‌ترین آنهاست. این امر بستگی به درجه ذوب بخشی گوشته اولیه و یا شرایط تبلور ماگما دارد. اگرچه نسبت Pd/Ir که نشان‌دهنده درجه و میزان تفریق است در کرومیتیت‌های افیولیت‌ها پایین است (۰/۵ تا ۰/۲)، در بعضی مواقع این نسبت مقادیر بیشتری نشان می‌دهد. کرومیتیت‌های غنی از آلومینیم در همین مجموعه‌های افیولیتی در مقایسه با نوع غنی از کروم می‌توانند از ماگمایی که تکامل یافته‌تر و تفریق‌یافته‌تر باشد یا از ماگمایی که از ذوب بخشی با درجه کمتر حاصل شده باشد، مشتق شوند.

این تغییرات ترکیب کرومیتیت‌ها دلیلی بر آن است که می‌توان کناسارهای کرومیت را در مجموعه‌های افیولیتی، مشتق شده از ماگمایی دانست که از درجات مختلف ذوب بخشی در یک ناحیه وسیع از گوشته بالایی در زیر زون گسترش اقیانوسی حاصل شده‌اند. این ماگما به کانال و اتاقک‌های کوچک و بزرگ موجود در سطوح بالاتر وارد شده است. افزایش درجه ذوب بخشی پریدوتیت‌های گوشته‌ای نزدیک زون گسترش نسبت به آنهایی که دورتر از این زون هستند، در ترکیب گوشته باقی‌مانده مشخص است. ماگمایی که در یک منطقه وسیع از ذوب بخشی حاصل شده است به طرف محور زون گسترش و رو به بالا حرکت می‌کند. در این مسیر آمیختگی ماگمایی و تغییر ترکیب (همان‌طور که قبلاً گفته شد)، باعث تبلور، تفریق و انباشت کرومیت می‌شود. بنابراین، اطلاع از وضعیت و پراکنندگی عناصر PGE اطلاعات بارزتری را برای تشخیص و تمایز کناسارهایی با تفریق محدود و آنهایی که اساساً حاصل تفریق شدید هستند، فراهم می‌سازد. این در حالی است که این کناسارها از نظر عناصر اصلی بسیار شبیه همدیگر هستند.

به طور خلاصه، از بررسی‌های زمین‌شیمیایی و بویژه عناصر گروه پلاتین در افیولیت‌ها نتایج بسیار مهم زیر به دست می‌آید:

- میزان PGE، نسبت‌ها و الگوی پراکنندگی آنها شواهد مناسبی برای تشخیص کناسارهای کرومیتی هستند که از ماگمای اولیه حاصل می‌شوند و کناسارهایی که از ماگمایی تفریق‌یافته به دست می‌آیند.

- کناسارهای غنی از آلومینیم از ماگماهای تفریق‌یافته و تکامل یافته حاصل می‌شوند و به طور کلی اهمیت اقتصادی زیادی ندارند (برای پی‌جویی مناسب نیستند).

- مجموعه‌های افیولیتی که شامل یک نوع کرومیت با ترکیب ثابت و یکسان از نظر عناصر اصلی و کالکوفیل باشند، بیانگر شرایط همسان در یک ناحیه وسیع (و البته حجم زیاد ماگما) هستند و شامل پتانسیل‌های اقتصادی بااهمیت از کرومیت هستند.

در افق‌های پایین‌تر چینه‌شناسی تمرکز یافته باشند.  
- استفاده از الگوی عناصر PGE در برابر کندریت‌ها برای تفکیک پریدوتیت‌های نوع گوشته‌ای از انواع انباشتی پوسته‌ای سودمند است. بر این اساس، پریدوتیت‌های منطقه میرمحمود در بخش‌های زیرین، شباهت بیشتری با انواع گوشته‌ای داشته و پریدوتیت‌های سرپانتینی شده در بخش‌های بالایی منطقه گفت، شبیه نوع پوسته‌ای هستند. وجود لایه‌های کرومیتی منظم در این بخش نیز نشان‌دهنده انباشتی بودن آنها است. به این ترتیب می‌توان استدلال کرد که کرومیت‌های منطقه سبزوآر در یک زون انتقالی واقعند. بخشی از آنها در قسمت‌های عمقی‌تر و مرتبط با گوشته و بخشی در قسمت‌های سطحی‌تر مرتبط با قاعده پوسته اقیانوسی هستند. ساختار عدسی شکل اولیه در کرومیت‌ها به‌طور عمده متعلق به نوع گوشته‌ای و ساختار نواری و لایه‌ای که بیشتر دچار از هم‌تندگی شده است، متعلق به نوع پوسته‌ای است. در اکتشاف و استخراج کرومیت‌ها تفکیک این دو نوع کرومیت از اهمیت خاصی برخوردار است و باید مد نظر قرار گیرد.

جدول ۱- میانگین نتایج تجزیه شیمیایی کرومیت‌ها برای عناصر PGE در معادن مختلف در منطقه مورد مطالعه.

Sample location	Os	Ir	Ru	Rh	Pt ppb	Pd	Pd/Ir	Cr/Cr+Al
Gaft mine Average Ave/chondrite	51.60 0.10	13.52 0.03	68.10 0.10	6.10 0.03	3.63 0.00	10.84 0.02	0.80	0.76
M i r m a h m o o d mine Average Ave/chondrite	94.70 0.18	36.80 0.07	97.00 0.14	6.16 0.03	2.57 0.00	3.63 0.007	0.10	0.81
Reza mine Average Ave/chondrite	82.70 0.16	25.15 0.05	97.40 0.14	9.26 0.05	3.58 0.00	12.01 0.02	0.48	0.80
Total Average Ave/chondrite	76.33 0.15	25.16 0.05	87.50 0.13	7.17 0.04	3.26 0.00	8.83 0.02	0.46	0.79

جدول ۲- میانگین نتایج تجزیه شیمیایی پریدوتیت‌ها برای عناصر PGE در معادن مختلف منطقه مورد مطالعه.

Sample location	Os	Ir	Ru	Rh ppb	Pt	Pd	Pd/Ir
Gaft Mine Average Ave/chondrite	1.27 0.0025	2.00 0.0037	6.40 0.0093	0.77 0.0038	4.49 0.0046	11.34 0.0208	8.46
M i r m a h m o o d Mine Average Ave/chondrite	4.86 0.0095	1.79 0.0033	4.92 0.0071	0.74 0.0037	1.87 0.0046	0.64 0.0012	0.36
Reza Mine Average Ave/chondrite		2.17 0.0040			5.17 0.0046	14.00 0.0257	8.99
Nosrati Mine Average Ave/chondrite		2.5 0.0046			7 0.0046	15.00 0.0275	6.50
Total Average Ave/chondrite	1.73 0.0034	2.11 0.0039	5.66 0.0082	0.75 0.0038	4.63 0.0046	10.25 0.0188	6.08

جدول ۳- PGE در برخی از کانسارهای کرومیت مهم جهان و مقایسه آنها با منطقه سبزوآر (داده‌های جهانی از Proenza et al., 2001, Leblance and Ceuleneer, 1992). حسنی پاک، ۱۳۷۸.

	Os	Ir	Ru	Rh ppb	Pt	Pd	Σ PGE	Pd/Ir
Turkey		37.8	82.8	8	10.2	14.17	128.6	0.4
Caledonia	462.6	324	110.4	12	7.14	5.45	446.4	0.0
Vourinos	19.532	29.7	55.2	8	16.32	16.35	92.9	0.6
Oman	102.8	91.8	165.6	7	26.52	9.265	264.4	0.1
Shetland	23.13	13.5	34.5	7	15.3	8.72	55	0.6
Tedford	33.41	35.1	34.5	4.8	11.22	16.35	74.4	0.5
Bushveld	7.196	124.2	379.5	480	1530	872	983.7	7.0
Stillwater		108	186.3	280	581.4	817.5	574.3	7.6
Greece	77.1	40.5	96.6	7	2.448	3.815	144.1	0.1
Sabzevar	76.33	25.16	87.50	7.17	3.26	8.83	177.13	0.48

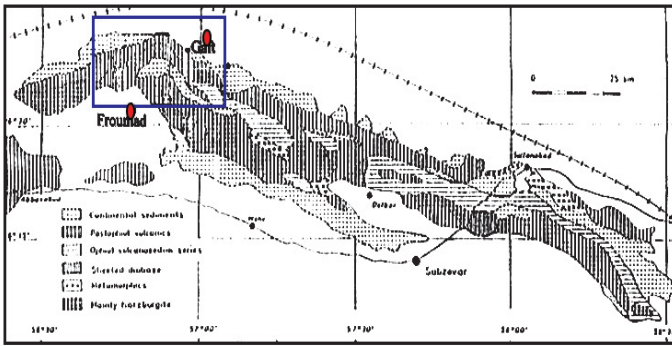
- طرح الگوی پراکندگی PGE در گستره مورد مطالعه (شکل ۲) نشان‌دهنده ارتباط کامل این کرومیت‌ها با کمپلکس‌های افیولیتی است. بنابراین، هرگونه طراحی اکتشافی و استخراجی باید بر مبنای ویژگی‌های کرومیت‌های افیولیتی و با در نظر گرفتن عدم امتداد لایه‌های کرومیتی و به‌هم‌ریختگی زمین‌ساختی و نقش گسل‌ها صورت گیرد. در این مجموعه، انتظار وجود هر دو نوع کرومیت غنی و فقیر از کروم را می‌توان داشت.  
- کانسارهای منطقه سبزوآر که نسبت Pd/Ir آنها به‌طور میانگین پایین‌تر از ۱ است، مشابه دیگر کانسارهای افیولیتی جهان بوده و از این نظر، دارای اهمیت اقتصادی برای کرومیت هستند، بویژه زمانی که نسبت پایین Pd/Ir که نشان‌دهنده تفریق‌یافتگی کمتر و ذوب بخشی بالاتر است، با بالا بودن عدد کرومی (Cr/Cr+Al) همراه باشد، می‌تواند نوید دهنده کانسارهایی با مقدار کروم بالا و از درجه متالورژیک باشد.  
- شباهت ترکیب اکسیدهای اصلی در سطح منطقه سبزوآر بسیار زیاد است (Vatanpour et al., 2004)، اما از نظر توزیع عناصر گروه پلاتین و نسبت گروه Ir به گروه Pd در یک کانسار و یا یک کانسار با کانسار دیگر در منطقه تفاوت‌هایی ملاحظه می‌شود. بنابراین می‌توان اظهار کرد که شرایط همسان و یکنواخت در یک ناحیه وسیع با حجم زیاد ماگمای غنی از کروم در منطقه حاکم نبوده است و از این نظر، دست‌کم در سطح نمی‌توان انتظار کانسارهای وسیع و حجیم را داشت.

- با استفاده از الگوی PGE در پریدوتیت‌های منطقه (شکل ۳) می‌توان تا حدودی ارتباط این پریدوتیت‌ها با گوشته یا بخش‌های قاعده‌ای پوسته را مشخص کرد؛ با توجه به این که عدسی‌های کرومیتی اغلب در بخش گوشته‌ای و در نهایت در بخش‌های زیرین پوسته تمرکز دارند و این دو نوع کرومیت، تفاوت‌های بافتی و ساختاری و حتی زمین‌شیمیایی با هم دارند، استفاده از الگوی PGE وسیله مناسبی برای تفکیک این مناطق و در نهایت پی‌جویی برای کانسارهای کرومیت محسوب می‌شوند. این الگو در منطقه سبزوآر نشان داده است که پریدوتیت‌های منطقه گفت بیشتر مشابه بخش پوسته‌ای هستند و در بخش‌های بالایی، ویژگی‌هایی از پریدوتیت انباشتی را به خوبی به نمایش می‌گذارند، در حالی که کمترین مقدار Pd/Ir (۰/۱) را در بین میانگین معادن ناحیه، کرومیت‌های منطقه میرمحمود داراست، و بیانگر شباهت با نوع گوشته‌ای است.  
- از تفاوت‌های اساسی کرومیت‌های نوع چینه‌سان با نوع انباشتی بالا بودن مقدار PGE در گروه اول است. بالا بودن این مقدار نشان‌دهنده تفریق‌یافتگی کمتر ماگمای تشکیل‌دهنده و نیز ذوب بخشی بیشتر است. بالا بودن این مقدار در افیولیت‌ها، همان‌طور که قبلاً گفته شد، دلیل بر وسعت و سرعت بیشتر گسترش و در نهایت کانسارهای کرومیت غنی از کروم است. مقایسه مقدار کل PGE در افیولیت‌های سبزوآر با دیگر مناطق افیولیتی مهم جهان مانند عمان، کالدونیا و ترکیه (جدول ۳) نشان می‌دهد که این منطقه با بسیاری از مناطق افیولیتی که دارای پتانسیل‌های قابل ملاحظه کرومیت هستند، همسان است و بنابراین می‌تواند از نظر پی‌جویی و اکتشاف کانسارهای کرومیت بسیار اهمیت داشته باشد.

## نتیجه‌گیری

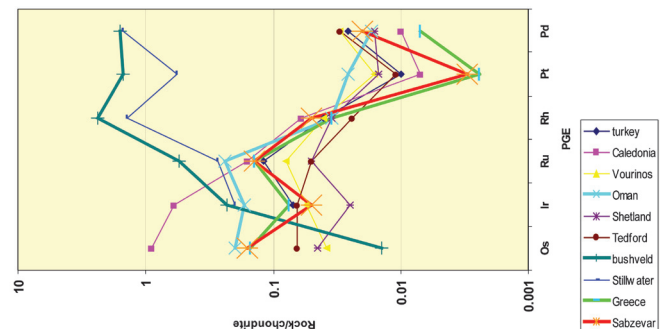
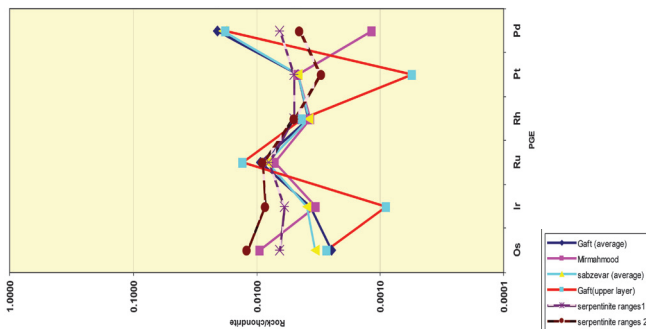
مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

- نسبت مجموع عناصر ناسازگار به سازگار در کانسارهای منطقه سبزوآر، مشابه دیگر کانسارهای مهم افیولیتی جهان است و از این نظر، دارای اهمیت اقتصادی برای کرومیت هستند. بویژه از آنجا که عدد کرومی آنها نیز بالاتر از ۰/۶۰ است، می‌توان انتظار کانسارهایی با مقدار کروم بالا و از درجه متالورژیک را در منطقه داشت.  
- اگرچه مقدار کلی PGE در نمونه‌های سطحی منطقه پایین است، ولی دیگر شواهد از جمله بالا بودن عدد کرومی و پایین بودن Pd/Ir و پایین بودن Al در کرومیت‌ها که نشان‌دهنده یک ذوب بخشی با درجه بالا در گوشته است، دلیل احتمال زیاد حضور PGE در این مجموعه است. با این استدلال می‌توان انتظار داشت عناصر گروه پلاتین



شکل ۱- a) تصویر ماهواره‌ای حاصل از تلفیق باندهای ۵ و ۳ و ۱ از منطقه مورد مطالعه و موقعیت معادن (نقاط زرد رنگ)

شکل ۱- b) نقشه ساده شده زمین‌شناسی از کمر بند افیولیتی سبزوار. محدوده مورد مطالعه در کادر مستطیل مشخص شده است (با تغییرات از لنج و همکاران ۱۹۷۷)



شکل ۳- الگوی PGE پریدوتیت‌های مناطق مورد مطالعه همراه الگوی

سریانتینیت‌های مرتبط با سنگ‌های فرابازی گوشته‌ای بهنجار شده با کندریت‌ها (سنگ‌های فرابازی گوشته‌ای از Leblance & Ceuleneer, 1992).

شکل ۲- مقایسه الگوی PGE کانسارهای کرومیت سبزوار با دیگر کانسارهای

کرومیت در جهان (داده‌های جهانی از وطن پور، ۱۳۷۵؛ Leblance and Ceuleneer, 1992 Proenza et al., 2001)

## کتابنگاری

حسنی پاک، ع.ا، ۱۳۷۸- اکتشافات ذخایر طلا، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۰۹ صفحه.

وطن پور، ح. ر، ۱۳۷۵- ویژگی‌های ژئوشیمیایی، بافت، ساخت و پیدایش کانسارهای کرومیت در مناطق گت و فرومد سبزوار، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۶۰ صفحه.

## References

- Economou-Eliopoulos, M., 1993- Platinum group element distribution in chromite ores from ophiolite complexes of Greece: Implications for chromite exploration: *Ophiolite*, v. 18, n. 1, p. 83-97.
- Economou-Eliopoulos, M. & Vacondios, I., 1995- Geochemistry of chromites and host rocks from the Pindos ophiolite complex, northwestern Greece: *Chemical Geology*, v. 122, p. 99-108.
- Irvine, T.N. & Sharpe, M.R., 1986- Magma mixing and origin of stratiform oxide ore zones in the bushveld and Stillwater complexes, *Metalogeny of basic and ultrabasic rocks. Mining Metallurgy*, London, p.183-198
- Konstantopoulou, G.P. & Economou-Eliopoulos, M., 1991- Distribution of platinum-elements and gold within the Vourinos chromitite ores, Greece. *Econ. Geol.*, v. 86, p. 1672-1682.
- Leblance, M. & Ceuleneer, G., 1992- Chromite crystallization in a multicellular magma flow: Evidence from a chromitite dike in the Oman ophiolite: *Lithos*, Elsevier Science Publishers, v. 27, p. 231-257.
- Lensch, G., 1980- Major element geochemistry of the Ophiolites in north eastern Iran. In: Panayiotou, A. (Ed). *Proceedings to International Ophiolite Symposium*. Ministry of Agriculture and Natural Resources, Geological Survey Department. Republic of Cyprus, p 384- 401.
- Naldrett, A.J., Brüggemann, G.E. & Wilson, A.H., 1990- Models for concentration of PGE in layered intrusions: Examples from the Bushveld, Great Dyke and Lac des Iles Complexes. *Can. Mineralogist*, v. 28, p. 389-408.
- Peck, D.C. & Keays, R.R., 1990- Geology, geochemistry and origin of platinum-group element-chromitite occurrences in the Heazlewood River Complex, Tasmania. *Econ. Geol.*, v. 85, p. 765-793.
- Proenza, J.A., Gervilla, F. & Melgarejo, J.C., 2001- Genesis of sulfide-rich chromite ores by the interaction between chromitite and pegmatitic olivine-norite dikes in the Potosi Mine, eastern Cuba, *Mineral. Deposita*, v. 36, p. 658-669.
- Roberts, S., 1988- Ophiolitic chromitite formation: A marginal basin phenomenon, *Econ. Geol.*, v. 83, p. 1034-1036.
- Vatanpour, H.R., Khakzad, A. & Ghaderi, M., 2004 -, Geochemical characteristics and petrology of Sabzevar chromite deposits, Iran, *The sixth international conference on geochemistry*, Alexandria university of Egypt, p.174-176