ارزیابی مبادله جرم عناصر بر اساس معادلات گرنت-گریسنز و روش ایزوکن – طلای پهنه برشی کرویان

فرشاد دارابی‌گلستان[۱]*، رضا قوامی ریابی [۲]، بهزاد سعیدی[۳] ، محمدرضا هزاره[۴]

۱- دانشجوی دکترای دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

۲- استادیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک – دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد قروه، گروه معدن

۴- بخش ژئوشیمی- واحد اکتشافات طلا- سازمان زمین‌شناسی کشور

*pooyan@aut.ac.ir

دریافت: ۹۱/۱۰/۵ پذیرش: ۹۲/۳/۴

چکیده

کانی‌سازی طلا در منطقه کرویان بر اساس مطالعات انجام شده به عنوان تیپ طلای پهنه برشی شناخته شده است. کانه‌زایی طلا در این منطقه تحت کنترل عواملی همچون پهنه‌های برشی خمیری و دگرسانی هیدروترمال قرار گرفته است. غالب دگرسانی‌ها در منطقه کلریتی- سرسیتی می‌باشند و در بعضی جاها دگرسانی سیلیسی- کربناتی وجود دارد، از این‌رو مقایسه اختصاصات ژئوشیمیایی سنگ‌های دگرسان شده با غیر دگرسان منطقه کمک می‌کند تا بتوان اثرات فرآیندهای دگرسانی بر روی پراکندگی عناصر را ارزیابی و رفتارهای ژئوشیمیایی عناصر مختلف را در این شرایط بررسی نمود. رفتار ژئوشیمیایی عناصر (میزان تحرک‌پذیری و نوع تحرک‌پذیری) می‌تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی کمی تعیین محدوده‌های مرتبط با کانی‌سازی محسوب گردد. در روش ایزوکن روندی تعریف می‌گردد که در آن متغیرهایی که رفتار غیرمتحرک داشته باشند نسبت به افزودگی و یا شسته شدن تفکیک و شناسایی می‌شود. محاسبات عددی صورت گرفته با هدف شناسایی متحرک یا غیر متحرک بودن عناصر در واحدهای سنگی مختلف (توده نفوذی، متاولکانیک‌ها و پـهنه برشی) و هم‌چنین بررسی نسبت‌های مختلف این عناصر در محدوده‌های دگرسان شده و غیر دگرسان شده نشان داد که عناصر Al, Ti و به میزان کمتر Cr ،Na دارای رفتار غیر متحرک هستند و به عنوان عناصر مبناء انتخاب شده و نمودار تغییر جرم سایر عناصر نسبت به آن‌ها ترسیم گشته است. در این میان عناصر As, La, Mo, Ba, Mn و Au در تمامی واحدها افزودگی دارند و عنصر As در واحدهای پهنه‌برشی منطقه بیش‌ترین عکس‌العمل غنی‌شدگی را از خود بروز می‌دهد. عناصر Zn, Ca, Sr و تا حدودی Mg در کلیه واحدهای سنگی دارای روند کاهشی است. نسبت‌های اکتشافی که دورشدگی و نزدیک شدگی به مناطق کانی‌سازی را نشان می‌دهند از نسبت مجموع عناصر غنی شده به تهی شده تشکیل می‌شوند و با این بررسی‌ها می‌توانند به عنوان شاخص‌های اکتشافی تعریف گردند.

واژه‌های کلیدی: تغییرات جرم، طلای کرویان، روش ایزوکن، پهنه برشی، غنی شدگی و تهی شدگی.

مقدمه

ذخایر تیپ پهنه‌ی برشی در زون تصادم و همراه با فعالیت‌های ماگماتیزم تشکیل می‌شوند. رخدادهای طلادار منطقه سقز، از نظر مشخصات و کنترل کننده‌های زمین-شناسی و کانی‌سازی با شاخصه‌های شناخته شده برای کانسارهای طلای کوهزائی تشکیل شده در کمربندهای کوهزائی فانروزوئیک، تطابق نشان می‌دهند [۱، ۲ و ۳].

در این ذخایر، سیالات حاوی کانه تحت تاثیر فشار لیتواستاتیکی در داخل پهنه‌های برشی که به عنوان مجرای عبور سیال عمل می‌کنند به سمت بالا مهاجرت کرده و در موقعیت‌های مناسب با تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی سیال و دگرسانی سنگ دیواره کانه‌زایی صورت می‌گیرد [۹]. واکنش‌های محلول‌های کانسارساز در مسیر حرکت با سنگ‌های دیواره سبب اضافه شدن یا خروج یون‌های شیمیایی از محلول‌ها و سنگ‌های مسیر حرکت می‌شوند. رخدادهای مذکور، باعث ایجاد تغییرات کانی‌شناسی - ژئوشیـمیایی در محیط اطـراف کانسار می-گردد. این تغییرات در مطالعات ژئوشیمیایی با تغییر مقدار پراکندگی عناصر در محیط اطراف کانسار نمایان، و در کانسارهای مختلف وابسته به نوع کانی‌سازی یا به عبارتی جزء اختصاصات تیپ کانسار محسوب می‌شود. سرسیتی

شدن، کربناتی شدن و پیریتی شدن شایع‌ترین فرآیندهای دگرسانی در منطقه سقز می‌باشد [۲ و ۴].
مقایسه اختصاصات ژئوشیمیایی سنگ‌های دگرسان شده با غیر دگرسان منطقه کمک می‌کند تا بتوان اثرات فرآیندهای دگرسانی بر روی پراکندگی عناصر را ارزیابی و رفتارهای ژئوشیمیایی عناصر مختلف را در این شرایط بررسی نمود. رفتار ژئوشیمیایی عناصر می‌تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی کمی تعیین محدوده‌های مرتبط با کانی‌سازی محسوب گردد. لازمه این امر آن است تا عناصری را که در شرایط زمین‌شناسی منطقه کمترین عکس‌العمل ژئوشیمیایی در برابر تغییرات به وجود آمده از خود نشان می‌دهند، شناسایی نمود [۱۰ و ۱۱]. واحدهای آتشفشانی- رسوبی دگرگون شده در حد رخساره شیست‌سبز سنگ میزبان بخشی از پهنه‌های برشی بوده و موقعیت کانی‌سازی‌ها توسط شرایط ساختاری شکل‌پذیر تا شکننده کنترل می‌گردد. روش‌های بررسی و تحلیل تغییرات جرم ایجاد شده بین سنگ درونگیر و سیالات یا مناطق دگرسانی به عنوان یک ابزار سودمند به منظور محاسبه و تعیین میزان غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر در سنگ‌ها به کار برده می‌شود. در بین روش‌های مختلف بررسی هاله‌های لیتوژئوشیمیایی اولیه از روش تغییرات جرم استفاده شده است، که با استفاده از این روش می‌توان نزدیک شدن و دور شدن از کانسار و هم‌چنین موقعیت کانسار را به دست آورد. به منظور ارزیابی غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر که تحت تأثیر فرآیندهای دگرسانی در حین کانی‌سازی قرار گرفته‌اند، معادلات مبادله جرم حاکم است. این معادلات و روابط اساسی در کنار روش‌های گرافیکی بایستی برای محاسبه تغییرات جرم مورد استفاده قرار گیرند. به منظور محاسبات تغییر جرم روش‌های متعدد از جمله روش‌های زیر وجود دارند:

۱- معادله فاکتور حجم یا گریسنز[1]: در این روش به ارزیابی تغییرات حجمی به وجود آمده در سنگ که به صورت کاهیدگی و یا افزودگی بیان می‌گردد و بر اساس جرم بیان می‌شود پرداخته می‌شود [۱۶ و ۱۷]. در روش گریسنز عناصری که ظاهراً با ایجاد دگرسانی غیر متحرک می‌مانند می‌توانند به عنوان یک معرف برای تغییر حجم اتفاق افتاده استفاده شوند. اگر فرض گردد که تغییرات حجم به عنوان یک فاکتور برای همه اجزاء باشد این امکان میسر می‌شود که افزودگی‌ها و یا کاهیدگی‌های دیگر اجزاء یا عناصر محاسبه گردد [۱۷].

۲- متد مک‌لین[2]: این روش بر چهار اصل عنصر ناظر بی‌تحرک[3]، عامل غنی شدگی[4]، ترکیب بازسازی شده[5] و تغییر جرم عناصر[6] استوار است که بر این اساس به محاسبات تغییر جرم عناصر می‌پردازد [۱۴].

۳- آنالیز آیزوکن: در راستای توسعه و اصلاح معادله گریسنز، در سال ۱۹۸۶ میلادی، گرانت[7] روش و تحلیل آیزوکن را معرفی نمود. آنالیز آیزوکن در واقع یک روش ساده از معادله گریسنز برای دگرسانی متاسوماتیک است. این روش وسیله‌ای مناسب برای محاسبات عددی و کمی تغییرات جرم یا غلظت عناصر جابجا شده است، که با رسم نمودار ترکیبات دگرسان شده در مقابل ترکیبات اولیه ممکن می‌گردد. آیزوکن واقعی براساس روند تغییرات متغیرهایی که دچار کمترین تغییرپذیری و بی‌تحرکی یونی باشند، تعریف می‌گردد یعنی اینکه عناصری که بر روی یک خط با شیب مشخص قرار دارند به عنوان ایزوکون شناخته می‌شوند. بر این اساس، تغییر جرم‌های صورت پذیرفته در حین فرآیند دگرسانی و متاسوماتیزم و پارامترهای مربوطه قابل تشخیص خواهد بود. در این میان شدت عکس‌العمل و رفتارهای عناصر متحرک متفاوت بوده و در برخی موارد عکس یکدیگر می‌باشند [۱۲].

روش‌شناسی

انتخاب عناصر غیر متحرک نقش مهمی در محاسبات تغییر جرم دارد، لذا لازم است که قبل از محاسبات، عناصر غیرمتحرک مورد بررسی قرار داده شوند [۱۳]. معادله گریسنز و گرانت برای ترکیبات مختلف وابسته در دگرسانی‌ها عبارت است از:

$$C_i^A = M^O/M^A (C_i^O + \Delta C_i) \qquad \text{معادله ۱}$$

در این معادله، C_i معرف غلظت عنصر مورد نظر (i) و M جرم نمونه‌ی سنگ اولیه و دگرسان شده مدنظر است.

[1] - Gresens

[2] - Maclean 1990
[3] - Monitor Immobile Element
[4] - Enrichment Factor, E.F
[5] - Reconstructed Composition, R.C
[6] - Mass Change, M.C
[7] - Grant

ΔCi تغییرات غلظت ایجاد شده ناشی از فرآیندهای تاثیرگذار بر روی نمونه می‌باشد. بر اساس ماهیت عناصر غیرمتحرک می‌توان مقدار ثابت نسبت M^O/M^A را محاسبه نمود. شیب b=MO/MA معادله ۱ معیاری برای فرآیند دگرسانی و معرف جرم غنی‌شده و تهی‌شده است. بر اساس ماهیت عناصر غیرمتحرک، معادله حاکم بر تغییرات غلظت به صورت زیر نوشته می‌شود:

معادله ۲ $$C_i^A = (M^O/M^A)C_i^O$$

بر اساس نمودار آیزوکن که به بررسی میزان غلظت عناصر در نمونه دگرسان شده (Ca[8]) در مقابل غلظت عناصر در نمونه غیر دگرسان (Co[9]) می‌پردازد، ماهیت و تحرک‌پذیری یونی عناصر تعریف می‌گردند. متغیرهایی که رفتار غیرمتحرک داشته باشند بسیار نزدیک به روند خط ایزوکن خواهند بود. عناصری که به تدریج میل به تحرک‌پذیری داشته باشند، از عناصر بی‌تحرک و روند مذکور فاصله خواهند گرفت. در این میان ممکن است نحوه فاصله‌گیری عناصر بر اساس اختصاصات ژئوشیمیایی آن‌ها در شرایط متاسوماتیزم یا دگرسانی به وجود آمده در منطقه متفاوت باشد. گروهی از عناصر میل به افزودگی[10] بالایی دارند و عده دیگری میل به شستشدگی[11] (کاهیدگی) از خود نشان خواهند داد. به منظور ارزیابی افزودگی و تهی‌شدگی می‌توان از فرمول زیر کمک گرفت:

معادله ۳ $$\Delta C_i/C_i^O = \left(C_{Im}^C/C_{Im}^A\right)\left(C_i^A/C_i^O\right) - 1$$

که در این معادله C_{Im}^O و C_{Im}^A غلظت‌های عناصر غیرمتحرک می‌باشند [۱۲ و ۱۵].

در ترسیم نمودار آیزوکن ابتدا مشاهده شد که استفاده دلخواهانه مقیاس در نمودار آیزوکن می‌تواند منجر به خطا شود. گرانت آیزوکن را با مقیاس دلخواهی برای مقدار غلظت عناصر رسم کرد، به طوری که یک توزیع معقول برای نقاط بر روی نمودار به دست آید و عناصر غیر متحرک بر روی روند خطی خاصی مشخص شود. پیشنهاد گردید که به منظور از بین بردن خطاهای مقیاس از نمودار لگاریتمی استفاده گردد که در این صورت معادله را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۲].

معادله ۴ $$\log C_i^A = \log(M^O/M^A) + \log C_i^O$$

این نمودار اغلب شیب برابر یک دارد. قابل توجه است که نمودار ایزوکن برای مقادیر صفر تعریف نشده است، مگر اینکه تغییرات جرم کلی برابر صفر باشد. با این اوصاف از ایزوکن بحث در مورد شیب ایزوکن مناسب نیست. همانا این نمودارها بصورت لگاریتمی- لگاریتمی و با محورهای بر مبنای درصد وزنی تعریف می‌گردد [۱۷].

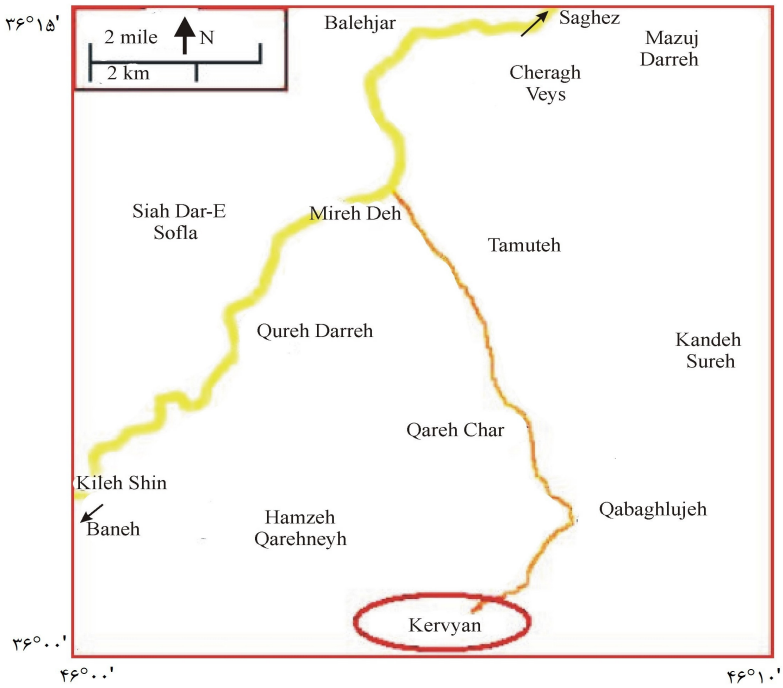
زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه (کانی‌سازی طلای کرویان) در جنوب غربی شهرستان سقز و بین طول‌های جغرافیایی '۰۳ ,°۴۶ تا '۰۷ ,°۴۶ شرقی و عرض‌های جغرافیایی '۰۰ ,°۳۶ و تا '۰۳ ,°۳۶ شمالی در محدوده‌ای به وسعت ۱۰ کیلومتر مربع در استان کردستان واقع شده است. جاده سقز- بانه مناسب‌ترین مسیر دسترسی به منطقه مورد مطالعه می‌باشد به طوری‌که در این مسیر پس از طی ۱۸ کیلومتر، از سقز به روستای میرده و از آن‌جا پس از پیمودن ۱۰ کیلومتر جاده روستایی میرده- پیرعمران به روستای کرویان می‌رسیم (شکل ۱). آب و هوای منطقه به لحاظ مرتفع بودن و ماهیت کوهستانی آن سردسیر می‌باشد. درجه حرارت در تابستان حداکثر ۳۷ و در زمستان ۲۹- درجه است [۵]. از نگاه ساختاری این منطقه در حاشیه شمال غربی نوار دگرگونه سنندج- سیرجان واقع شده است. کانه‌زایی طلا در این منطقه تحت کنترل عواملی همچون پهنه‌های برشی خمیری و دگرسانی هیدروترمال قرار گرفته است.

بر اثر عملکرد نیروهای تکتونیکی ساختار کلی منطقه به صورت دگرشکلی‌های شکل‌پذیر (چین‌ها) و شکننده (درزه‌ها وگسل‌ها) بوده است. فابریک میلونیتی مجموع واحدهای سنگی منطقه، تحت تاثیر پهنه‌های برشی خمیری، توالی و نظام اولیه خود را در طی فعالیت‌های شدید تکتونیکی از دست داده و واحدهای لیتولوژی مختلف با ساختارها و فابریک‌های متفاوت از آن حاصل شده‌اند [۶ و ۷]. لیتولوژی واحدها بر روی ساختارها و فابریک‌های به وجود آمده در سنگ‌ها موثر می‌باشد.

[8] - Concentration in altered sample: C^a
[9] - Concentration in original sample: C^o
[10] - gain
[11] - loss

شدت دگرشکلی از واحدهای کمتر دگرشکل شده (پروتومیلونیت) تا واحدهای به شدت دگرشکل یافته (میلونیت و الترامیلونیت) در تغییر می‌باشد [۵]. واحدهای رخنمون یافته در منطقه بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ شامل: ۱- واحدهای رسوبی- دگرگونی: فیلیت‌ها، آهک‌های بلورین (رسوبات پلیتیک و آهک دگرگون شده)، دولومیت‌های آهن‌دار، رسوبات تراورتنی، کوارتزیت. ۲- واحدهای آتشفشانی- دگرگونی: متاولکانیک‌های فلسیک و متاولکانیک‌های بازیک. ۳- توده‌های نفوذی گرانیتی که زمان تشکیل آن‌ها را به مزوزوئیک و به خصوص کرتاسه نسبت می‌دهند، می‌باشد [۳]. ۴- واحدهای برشی که کانی‌زایی طلا در محدوده‌ای با وسعت بیش از ۲/۵ کیلومتر و پهنای ۶۰ متر تمرکز یافته است. بررسی‌های صورت گرفته در منطقه حاکی از آن است که واحدهای سنگی منطقه ابتدا تحت تاثیر دگرگونی ناحیه‌ای پیشرونده در حد رخساره شیست سبز بالایی قرار گرفته‌اند به طوری که کانی‌های بیوتیت و هورنبلند در این شرایط به تعادل رسیده و سپس تحت تاثیر عملکرد پهنه‌های برشی و دگرسانی‌های وابسته به آن، کانی‌های بیوتیت و هورنبلند (کانی‌های آهن‌دار) به کلریت، سرسیت و موسکویت دگرسان شده‌اند و پاراژنز کانی‌های دگرگونی از رخساره شیست‌سبز بالایی به رخساره شیست‌سبز متوسط و پایین تنزل نشان داده و یک نوع دگرگونی قهقرایی در واحدهای سنگی دگرشکل یافته منطقه ایجاد کرده است [۵] (شکل ۲).



شکل ۱. موقعیت منطقه کرویان و راه‌های دسترسی به آن.

نمونه‌برداری و آنالیز شیمیایی نمونه‌های منطقه

روش نمونه‌برداری در این فاز لبپری[1] بوده است، نمونه-برداری به گونه‌ای انجام شده که دایره‌های به شعاع ۵۰ متر حول نقطه نمونه‌برداری در نظر گرفته شد و حداقل ۱۰ و حداکثر ۱۵ قطعه از سنگ برجا به صورت رخنمون‌های تازه توده سنگ اصلی برداشت گردیده و در حین نمونه‌برداری مشخصات دگرسانی، کانی‌سازی، مشخصات فیزیکی، درصد سیلیس و نکات مهم دیگری ثبت شده است. در کل تعداد ۲۱۶ نمونه از محدوده مورد مطالعه برداشت شده است که همگی نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی اولیه می‌باشند. کلیه نمونه‌ها بعد از خردایش و آسیاب تا حد ۲۰۰ مش و طی نمودن مراحل محلول‌سازی با روش جذب اتمی برای طلا و سایر عناصر مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفته است. کلیه تصمیم‌گیری‌ها و اختیارات جهت مکان و چگونگی

[1] - Chip sampling

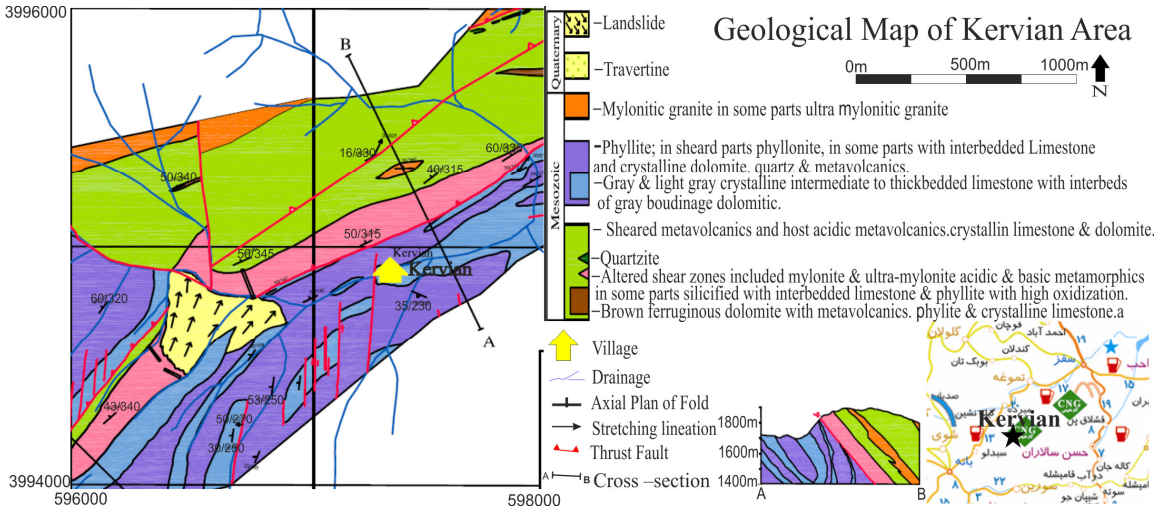
آنالیزها با سازمان زمین‌شناسی کشور بوده است. از جمله عناصر تجزیه شده می‌توان به عناصر Au ، Ag، Al، As، Ba، Be، Bi، Ca، Cd، Co، Cr، Cu، Fe، Hg، K، La، Mg، Mn، Mo، Na، Ni، P، Pb، S، Sc، Sb، Sr، Ti، U، V، W، Zn اشاره نمود. دقت آنالیز نمونه‌ها بر اساس نمونه‌های تکراری کنترل شده است. در بین داده‌ها غلظت‌های سنسورد ملاحظه نگردیده است.

آنالیز آیزوکن داده‌های محدوده مورد مطالعه

با توجه به اینکه نمونه‌های برداشت شده از منطقه و داده‌های به دست آمده از آن‌ها شامل واحدهای سنگی توده‌های نفوذی گرانیتی، متاولکانیک‌ها، فیلیت‌ها و بخش تعریف شده به عنوان پهنه‌برشی بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه می‌باشد، لذا لازم است که بررسی-های به طور مستقل صورت پذیرد. برای این منظور در خصوص هر یک از واحدهای سنگی به طور جداگانه به ارزیابی تغییرات جرم پرداخته شده است و بر روی نمودار آیزوکن نمایش داده شده است. مطالعات سنگ-شناسی و کانی‌شناسی پیشینه کارهای انجام شده جهت بررسی‌های صورت گرفته در این مقاله است که توسط افراد و تحقیقات فراوان مطرح شده است [۲، ۵ و ۸].

آنالیز آیزوکن داده‌های توده‌های نفوذی گرانیتی

در روش آیزوکن قبل از انتخاب یک عنصر به عنوان متحرک و یا غیر متحرک بودن محاسبات عددی صورت می‌گیرد که بر این اساس و نسبت‌هایی که از این عناصر به دست می‌آید میزان یا شدت غیر متحرک بودن عناصر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای انتخاب جفت نمونه‌ها نیز محاسبات زیادی بر روی نمونه‌های محدوده دگرسانی و غیر دگرسانی صورت گرفته است. بر اساس ارزیابی صورت گرفته به منظور انتخاب بهترین معادل نمونه دگرسان شده (بر اساس محاسبه Chi-square و تحلیل دوگانه) در بین نمونه‌های مرتبط با این واحد سنگی که از جنس گرانیت میلونیتی و در بعضی موارد الترامیلونیتی می‌باشد، جفت نمونه ۸۶۸ (Ca) و ۷۶۴ (Co) انتخاب گردیده است و مبنای غیر متحرک بودن عناصر Al و Ti در نظر گرفته شده است. سنگ‌های این قسمت دارای دگرسانی سرسیتی و کلریتی هستند. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی برای نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده و نمودار آیزوکن جفت نمونه ۸۶۸ (با مقدار طلای ppb ۲۰۰۰) در مقابل ۷۶۴ (با مقدار طلای ppb ۲/۵) در شکل ۲A ترسیم گردیده است. در این نمودار بخشی از عناصر مانند Sc، K، Fe، Co و Ba نیز همانند Al و Ti از ویژگی‌های عناصر غیرمتحرک پیروی می‌نمایند. همان‌طور که در کلیه این نمودارها دیده می‌شود شیب آیزوکن ۴۵ درجه و به گونه‌ای است که Al و Ti را قطع نماید. عناصر Au، V، Cr، Na، As، S، Ca، Mg، Pb، Zn و Sr در توده‌ی گرانیتی متحرک به نظر می‌رسند. در این میان عناصر Au، Cr، As، V و Na بیش‌ترین افزودگی و عناصر Mo، S، Ag، Ni و Mn از نظر غنی‌شدگی در درجه پایین‌تری نسبت به آن‌ها قرار دارند. اما Ca و Mg دارای کاهیدگی بالا و عناصر Zn، Pb و Sr نیز تا حدودی از سنگ‌های مورد نظر شسته شده-اند (شکل ۲A).



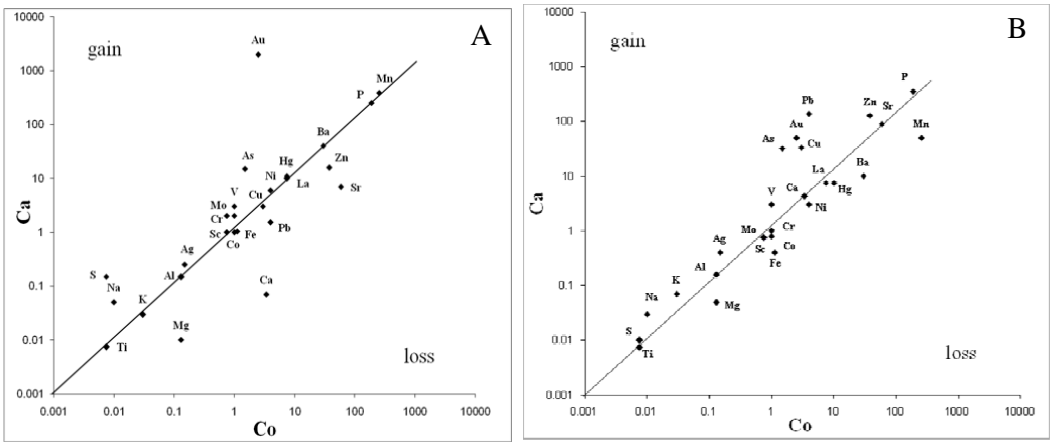
شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی اطراف روستای کرویان.

بر اساس تکرار ارزیابی‌های صورت گرفته در بین نمونه-های کمتر متأثر از فرآیندهای کانی‌سازی نمونه ۹۸۶ (۵۰ ppb طلا) با نمونه غیر دگرسان (۷۶۴) انتخاب شده است. تغییرات عناصر حول خط آیزوکن دارای پراکندگی بیش‌تری نسبت به نمودار قبلی است. عناصر Pb، Au، As و Cu دارای غنی‌شدگی بالا و عناصر K، Na، Ag، Zn و V در درجه دوم غنی‌شدگی نسبت به گروه اول قرار دارد. عناصر Fe, Mn, Ba, Ni, Hg, Co و Mg تحت شسته‌شدگی قرار گرفته است. احتمالاً بیش‌ترین تاثیر فرآیندهای کانی‌سازی بر روی رفتار عناصر K، Na، Pb، Zn، As، Au و Cu بوده است (شکل 2B). چنانچه عکس‌العمل ناشی از فرآیندهای دگرسانی و کانی‌سازی حادث شده در منطقه را که بر اساس نمودارهای آیزوکن ترسیم نموده‌ایم را تبدیل به تغییرات جرم نموده و میزان یا شدت تغییرات را محاسبه نمائیم، می‌توان به ارزیابی بهتری از تبادلات یونی صورت گرفته در منطقه پرداخت (نمودارهای A و B شکل ۳). به منظور تسهیل در ارزیابی، تغییرات جرم به صورت نمودارهای میله‌ای عناصر ترسیم گردیده است. تغییر جرم‌های به وجود آمده را در دو مقیاس متفاوت (کوچکتر از ۵ ± و بزرگتر از ۵ ±) (اختلاف واحد مقادیر ppm, ppb یا بر حسب درصد) با یکدیگر مقایسه نموده‌ایم. در میان رفتارهای ملاحظه شده، عکس العمل عناصر Mn و Au در برابر غنی‌شدگی تغییرات جرم قابل ملاحظه‌ای نشان داده و در مرحله کم اهمیت‌تر عناصر Hg، Ni، Mo، Sc، La و S واقع گردیده‌اند. در مقابل، عناصری مانند Cu، Zn، Pb، Sr و Ca تهی‌شدگی قابل‌ملاحظه جرمی نشان داده است. بی‌تحرکی عناصر Al، Ti، Cr، K و Sc نیز در این محیط قابل تائید می‌باشد. در فرآیند نزدیک شدن به منطقه کانی‌سازی در محدوده سنگ‌های گرانیتی Mn, As, Au, P افزودگی بالایی و عناصر Hg, La, Mo, Ni, S افزودگی کمتر Ca کاهیدگی کمتر نشان می‌دهد.

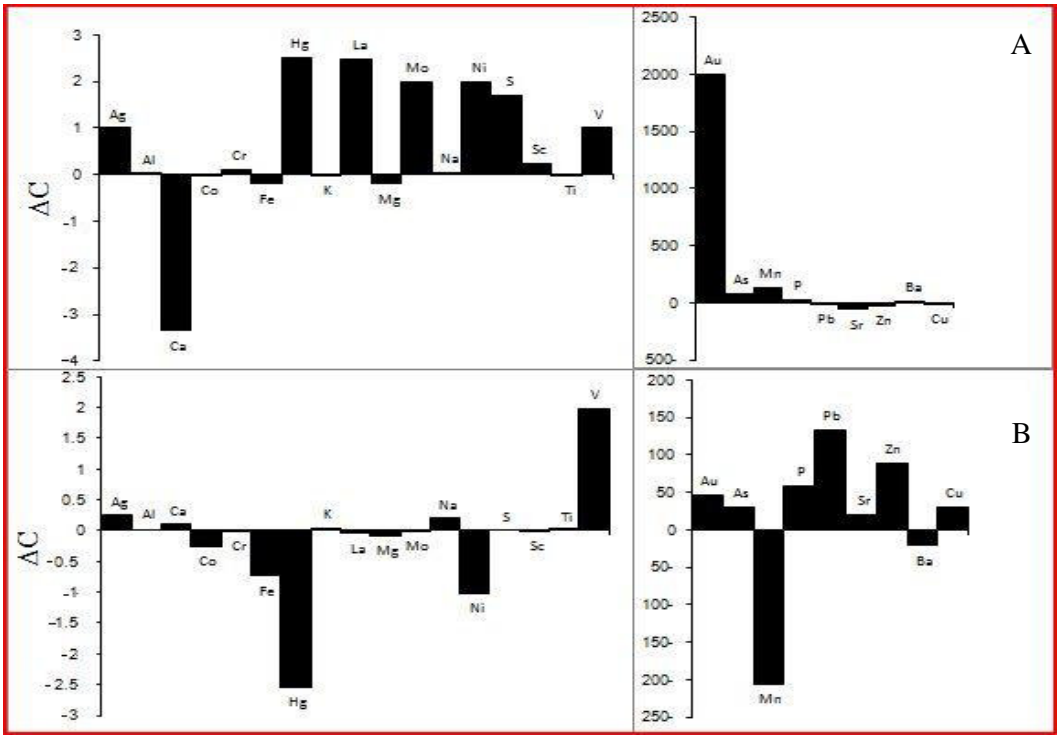
آنالیز آیزوکن سنگ‌های متاولکانیک

بر اساس ارزیابی صورت گرفته به منظور برآورد بهترین معادل نمونه دگرسان شده نمودار آیزوکن نمونه ۹۹۸ (دارای ۴۵۰۰ ppb طلا) با نمونه معادل غیر کانی‌سازی شده آن (نمونه ۹۸۰) انتخاب شد و عناصر Al و Ti مبناء قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها از متاولکانیک‌هایی با سنگ میزبان متاولکانیک‌های اسیدی، سنگ‌آهک بلورین و دلومیت‌ها برداشت شده است و دگرسانی‌های کلریتی، سرسیتی، سیلیسی و کربناتی دارند. شکل 4A نشان می‌دهد که عناصر Au، Co، Ba، Cu و Ni دارای غنی‌شدگی بالا و عناصر As، Mo، Ag، Fe، S و Mn در درجه دوم از غنی‌شدگی قرار دارند، عناصر K، Ca، Sr، Pb و Na تحت شسته‌شدگی قرار گرفته است و عناصر Cr، Sc، Mg، V و Zn همانند Al و Ti تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهند. ارزیابی صورت گرفته در بین نمونه‌های متأثر از کانی‌سازی نمودار آیزوکن نمونه دوم (دارای ۴۹۰ ppb طلا) (شکل 4B) مبادلات عنصری را بدین ترتیب تفسیر می‌نماید که عناصر Au، Ca، Pb، Hg، Ni و تا حدود کمتری عناصر Mg، Cr، Sr و Zn غنی‌شدگی نشان می‌دهند. عناصر Ba، Cu، Sc، P، K و Na و تا حدودی Sc شسته شده است. از طرفی برای نمونه‌های با حداقل تأثیر پذیری از کانی‌سازی، نمودار آیزوکن نمونه سوم (نمونه ۸۶۵ با ۶۰ ppb طلا) (شکل 4C) مبین آن است که عناصر Au، As، Cu، Co، Ni، Fe، V، Sr، Ba، Ca و Zn غنی‌شده و عناصر Pb، Cr و K شسته شده است.

این مطالب شاید گویای آن باشد که به طور نسبی میزان عناصر Co, Ni, Cu, As, Pb, Au در سنگ‌های ولکانیکی بالاست و تاثیر دگرسانی حاصل از فرآیند کانی‌سازی بر روی برخی عناصر Ca, Pb کاهیدگی و Co, Au, Ba افزودگی بوده است. نتایج محاسبات تغییرات جرم انجام شده بر اساس تحلیل آیزوکن به دست آمده از قسمت قبل (برای نمونه‌های مورد نظر به منظور تسهیل در مقایسه) به صورت نمودارهای میله‌ای ترسیم شده است (شکل ۵). بر اساس این نتایج، در یک روند افزایشی همراه با Au عناصر La و S را مشاهده می‌شود. عناصر Zn و Sr به همراه Ca در مقابل غنی‌شدگی طلا رفتار تهی‌شدگی از خود بروزه می‌دهند. بی‌تحرکی عناصر Al، V, Sc, Na،Ti و به طور نسبی Mg در این واحدهای سنگی قابل مشاهده است. به طور نسبی فرآیند کانی‌سازی و تبادلات یونی دگرسانی در سنگ‌های ولکانیکی منجر به افزودگی Au, As, Ba, Co, Mn و به مقدار کمتری La و S گشته و عامل کاهیدگی Ca سنگ‌ها شده است.



شکل ۲. نمودار آیزوکن جفت نمونه ۸۶۸ و ۷۶۴ (A) و ۹۸۶ و ۷۶۴ (B) در سنگ‌های گرانیتی.

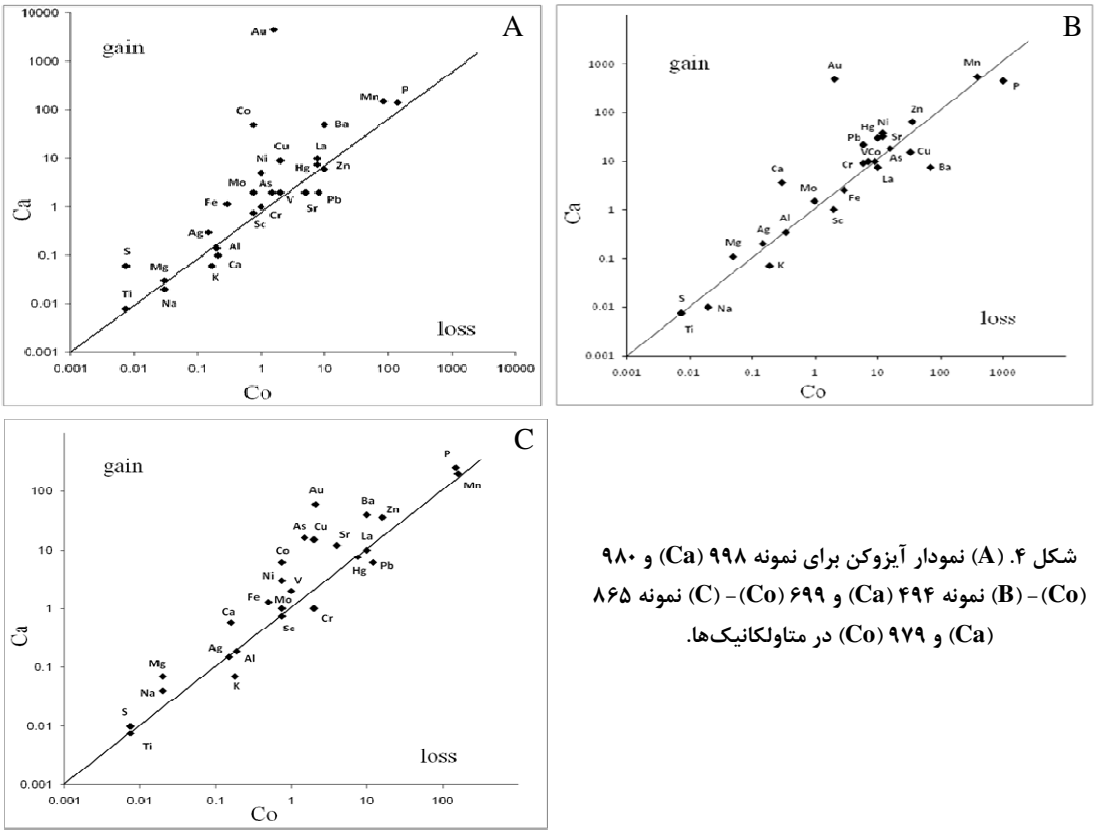


شکل ۳. هیستوگرام تغییرات جرم سنگ‌های گرانیتی A) نمونه ۸۶۸ B) نمونه ۹۸۶.

آنالیز آیزوکن واحد سنگی پهنه‌برشی

این محدوده برشی دگرسان شده شامل میلونیت، الترامیلونیت اسیدی، سنگ‌های دگرگونی در سنگ‌آهک‌های سیلیسی شده درون لایه‌ای و فیلیت با درجه اکسیداسیون بالا می‌باشد و غالب دگرسانی‌ها سرسیتی و سیلیسی هستند. در میلونیت‌ها و الترامیلونیت‌های موجود در سنگ‌های دگرگونی بیشترین میزان اختلاف جرم طلا وجود داشته است. بر اساس محاسبات و ارزیابی صورت گرفته بر روی واحدهای سنگی پهنه‌برشی در منطقه، دو نمونه ایده‌آل مشخص گردیده است. بر اساس نتایج نمودار آیزوکن ترسیمی نمونه اول (به شماره ۷۵۸ دارای ppb ۳۵۰ طلا)، عناصر Au، As و S دارای غنی‌شدگی بالا و عناصر Ba، Mo، Na، Fe و Sc در درجه دوم غنی‌شدگی قرار دارند. در مقابل این گروه، عناصر Ca، Ni، Cr، Mg و در درجه پایین‌تر عناصر Sr، Zn، Pb و Co تحت شسته شدگی قرار گرفته است (شکل ۶A). بر اساس نمودار آیزوکن نمونه دوم (نمونه ۵۷۶ دارای ppb ۷۵ طلا) عناصر Au، Sr، Ca، Pb، Mg و تا حدودی As و S غنی شده‌اند. عناصر Co، Cr، Cu، K، Ni و P به همراه Fe، V، Mn و Zn اثرات شسته‌شدگی و یا کاهیدگی ژئوشیمیایی

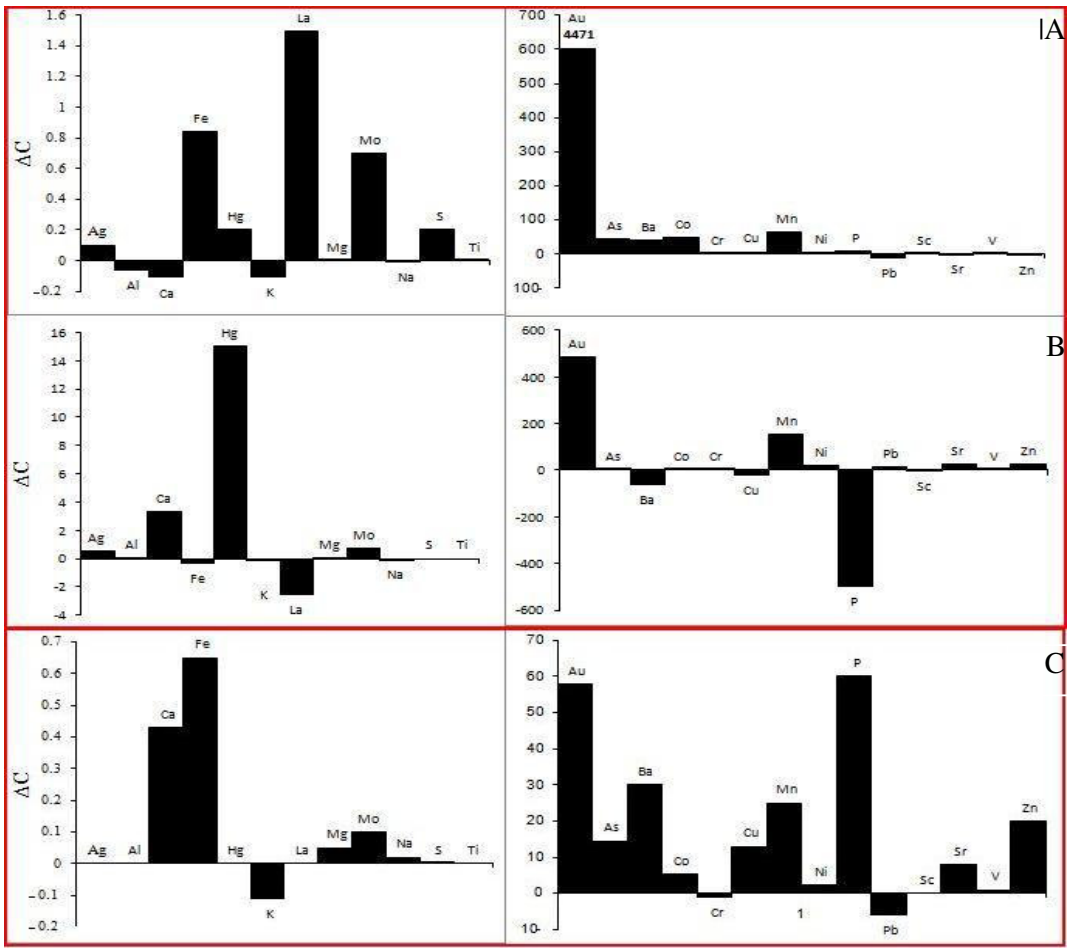
در این واحدهای سنگی را نشان می‌دهند (شکل ۶B). بر اساس محاسبات تغییرات جرم و جهت تسهیل در تفسیر، نمودار میله‌ای مرتبط با تغییرات جرم به وجود آمده، ترسیم شده است (شکل ۷). نتایج مذکور گویای آن است که عناصر As، Au، P و Ba و تا حدودی Fe، Mo و La در نمونه تحت غنی‌شدگی قرار گرفته و عناصری مانند Pb, Mg, Ca, Sr دچار کاهیدگی نسبی شده‌اند (شکل ۷A). افزودگی As نسبت به دو محیط سنگی دیگر در این قسمت بارزتر است. بی‌تحرکی عناصر Al، Ti، La، Hg و Ag در این واحدهای سنگی قابل تائید است (شکل ۷B).



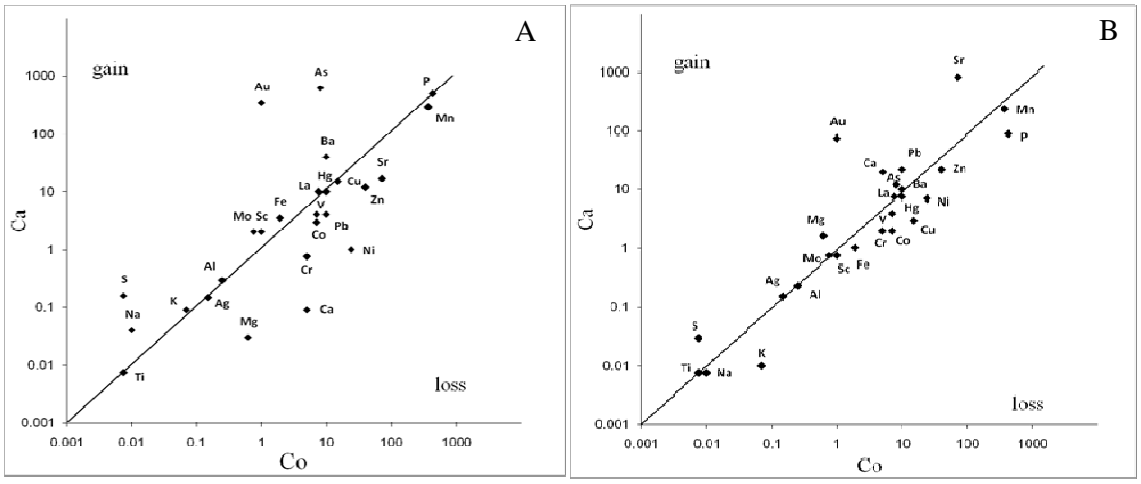
شکل ۴. (A) نمودار آیزوکن برای نمونه ۹۹۸ (Ca) و ۹۸۰ (Co) - (B) نمونه ۴۹۴ (Ca) و ۶۹۹ (Co) - (C) نمونه ۸۶۵ (Ca) و ۹۷۹ (Co) در متاولکانیک‌ها.

جدول ۱. مقادیر حاصل از آنالیز شیمیایی نمونه‌های ایده‌آل در توده نفوذی گرانیتی جهت آنالیز آیزوکن.

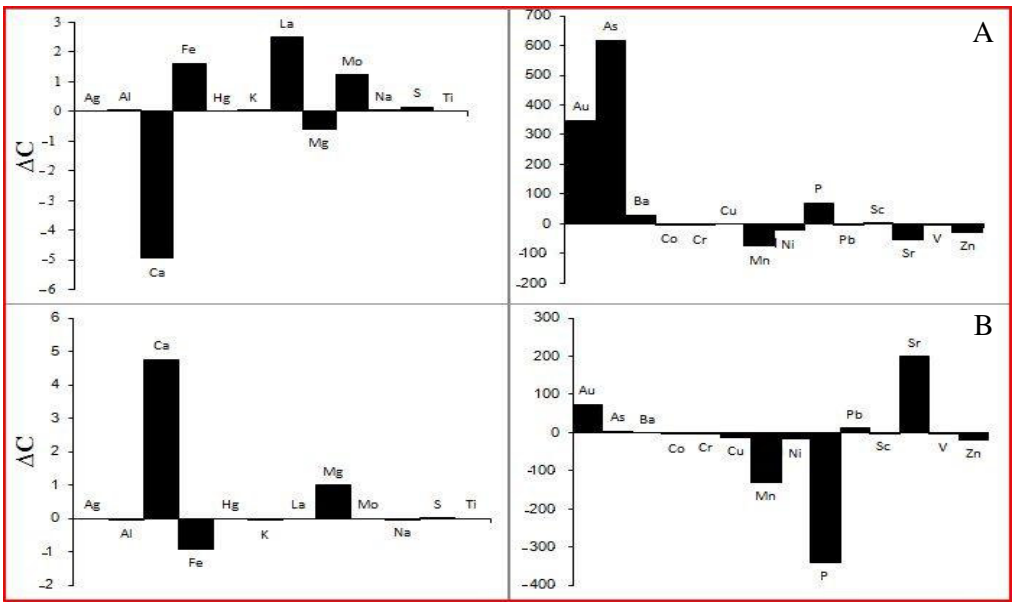
SAMPLE	868	764	986	SAMPLE	868	764	986	SAMPLE	868	764	986
Au	2000	2.5	50	Cu	3	3	33	Pb	1.54	4	138
Ag	0.15	0.15	0.40	Fe	1.32	1.12	0.4	S	0.0075	0.0075	0.0075
Al	0.15	0.13	0.16	Hg	7.5	10	7.5	Sb	1.5	1.5	2
As	1.5	1.5	32	K	0.03	0.03	0.07	Sc	1.000	0.750	0.750
Ba	40	30	10	La	10	7.5	7.5	Sr	7	59	2
Be	0.375	0.375	0.375	Mg	0.01	0.13	0.05	Ti	0.008	0.008	0.010
Bi	1.5	1.5	1.5	Mn	385	255	50	U	7.5	7.5	7.5
Ca	0.07	3.41	0.09	Mo	1	0.75	0.75	V	3	1	3
Cd	0.375	0.375	0.375	Na	0.050	0.010	0.010	W	7.5	7.5	7.5
Co	1	1	0.75	Ni	6	4	3	Zn	16	38	128
Cr	2	1	1	P	250	190	250				



شکل ۵. هیستوگرام تغییرات جرم در متاولکانیک‌ها A) نمونه ۹۹۸ B) نمونه۸۳۰ C) نمونه ۴۹۴ (تذکر: تغییر جرم طلا در نمونه ۹۹۸، حدود ۴۴۷۱+ بوده که جهت نمایش تغییرات جرم در دیگر متغیرها مقدار آن کاهش داده شده است).



شکل ۶. نمودار آیزوکن (A) نمونه ۷۵۸ (Ca) و ۵۲۳ (Co) و (B) نمونه ۵۷۶ (Ca) و ۵۲۳ (Co).



شکل ۷. هیستوگرام تغییرات جرم منطقه پهنه برشی A) نمونه ۷۵۸ B) نمونه ۵۷۶.

نتیجه‌گیری

بررسی فراوانی و توزیع عناصر در داده‌های لیتوژئوشیمیایی در پهنه‌برشی طلای کرویان نشان می‌دهد که تأثیر محلول‌های کانسارساز بر روی محیط‌های سنگی متفاوت بوده اما با این وجود عناصر Cr, Na و تا حدود کمی Sc, K عموماً رفتار بی تحرکی همانند Ti و Al را در این واحدها از خود نشان داده‌اند و به عنوان عنصر مبناء بررسی شده‌اند. تمام این بررسی‌ها نسبت به نمونه دگرسان نشده (نمونه مبناء) مطالعه گشته‌اند. در این میان عناصر Ca, Mn, Zn, Pb, Mo, La, Au, As, Sr, و Ba تحرک‌پذیری بالای در این واحدها از خود نشان می‌هند که این رفتار عموماً در خصوص عناصر Au, As, La, Mo, Mn, Ba به صورت تمایل به افزودگی و در عناصر Ca, Sr, Zn (و تا حدودی Mg) تمایل به کاهیدگی نسبی است.

بر اساس نتایج به دست آمده، تغییرات جرم افزایشی مشترک در تمامی واحدهای سنگی مرتبط با عناصر La و Au بوده است. بیش‌ترین تغییرات جرم طلا در ارتباط با متاولکانیک‌های منطقه می‌باشد و در گرانیت‌ها به حد متوسط و در پهنه‌برشی از همه کمتر است. عنصر As در واحد سنگی پهنه‌برشی بیش‌ترین عکس‌العمل را در مقایسه با دو واحد سنگی دیگر تمایل به افزودگی از خود نشان داده است. در شناسایی و تفکیک اختصاصات مناطق کانی‌سازی و تا حدودی غنی‌شده به این مناطق سعی می‌شود از نسبت‌های مجموع و حاصل‌ضرب عناصر غنی‌شده به تهی‌شده استفاده شود. لذا اهمیت شناسایی عکس‌العمل‌های عناصر در مناطق کانی‌سازی و دور از کانی‌سازی می‌تواند راهنمای تفکیک عناصر بر اساس اختصاصات ژئوشیمیایی آن‌ها محسوب می‌شود.

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانیم که از ریاست محترم سازمان زمین شناسی کشور و واحد اکتشاف طلای آن سازمان کمال سپاس و تشکر را به منظور دسترسی به اطلاعات اعلام نمائیم. هم‌چنین از کارشناسانی که در برداشت و مطالعات زمین‌شناسی منطقه مشارکت داشته‌اند و از نتایج کارهای آن‌ها نیز استفاده شده است تشکر به عمل می‌آید.

منابع

[۱] زرین‌فر ر.، شمسا م.ج. و غضنفری، م (۱۳۸۲) "اکتشافات سیستماتیک طلا در منطقه کرویان با نگرشی ویژه بر شاخصه‌های کاربردی"، بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور.

[۲] حیدری م.، راستاد ا.، محجل م. و شمسا، م (۱۳۸۳) "کانه‌زایی طلا در پهنه‌برشی شکل‌پذیر کرویان (جنوب باختر سقز-کردستان) "، علوم زمین (شماره۵۷) ص ۱۸ تا ۳۷.

[۳] علی‌یاری ف. و راستا، ا (۱۳۸۵) "ژئوشیمی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب و کاربرد آن‌ها در اکتشاف طلا در پهنه‌برشی قلقله، جنوب غرب سقز"، دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران دانشگاه تربیت مدرس، ص ۳۳۱ تا ۳۴۰.

[۴] مقصودی ع.، رحمانی م. و رشیدی، ب (۱۳۸۴) "کانسارها و نشانه های طلا در ایران"، انتشارات مرکز پژوهشی آرین پارس، ۳۵۰ ص.

[۵] حیدری، س.م (۱۳۸۳) "کانی‌شناسی، ژئوشیمی و فابریک کانه‌زائی طلا در پهنه‌برشی خمیری منطقه کرویان"، پایان نامهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۵۰ ص.

[۶] عابدیان، ن (۱۳۸۸) " گزارش زمین‌شناسی اقتصادی ۱:۱۰۰۰ محدوده اکتشافی قبغلوچه"، سازمان زمین-شناسی و اکتشاف معدنی کشور.

[۷] حریری ع (۱۳۸۲) "نقشه زمین‌شناسی سقز"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور.

[۸] سعیدی، ب (۱۳۸۹) " بررسی لیتوژئوشیمیایی تفصیلی به منظور ارزیابی سطح فرسایش در کانی‌سازی طلای کرویان"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۱۰ص.

[9] Kolb J., Rogers A., Meyer F. M & Torsten W (2004) “Development of fluid conduits in the auriferous shear zones of the Hutti Gold Mine, India: evidence for spatially and temporally heterogeneous fluid flow”, Tectonophysics 378, 65–84.

[10] Liaghat S, Hosseini M & Zarasvandi A (2003) “Determination of the origin and mass change geochemistry during bauxitization process at the Hangam deposit, SW Iran”, Geochemical Journal, 37, 627 - 637.

[11] Kwon S., Park Y., Park C. & Kim H.S (2009) “Mass-balance analysis of bulk-rock chemical changes during mylonitization of a megacryst-bearing granitoid, Cheongsan shear zone, Korea”, Journal of Asian Earth Sciences 35, 489–501.

[12] Grant J. A (2005) “Isocon analysis: A brief review of the method and applications”, Physics and Chemistry of the Earth 30, 997–1004.

[13] Derakhshani R. and Abdolzadeh M (2009) Geochemistry, Mineralization and Alteration zones of Darrehzar porphyry coppe deposit, Kerman, Iran, Journal of Applied Sciences, 1628-1646.

[14] MacLean W.H (1990) “Mass change calculations in altered rock series”. Min. Dep, 44–49.

[15] Richard J (2008) “Mass transfers and volume changes related to pressure solution–fracturing interactions in carbonate rocks: Example of the Oligocene deformation of the Coniacian chalk from the Omey area (Paris Basin, France)”, Journal of Structural Geology 30, 1300–1313.

[16] Gresens, R.L (1967) Composition–volume relationships of metasomatism. Chemical Geology 2, 47–55.

[17] Hezarkhani A (2001) “Mass changes during hydrothermal alteration/mineralization in a porphyry copper deposit, eastern Sungun, northwestern Iran”, Journal of Asian Earth Sciences.