

## بررسی تغییرات عناصر اصلی، جزیی و خاکی کمیاب در زون‌های دگرسانی در کانی‌سازی مس پورفیری منطقه‌ی همند (خراسان جنوبی، ایران)

محمد حسن کریم‌پور<sup>\*</sup>، آزاده ملک‌زاده شفارودی

مرکز پژوهش اکتشافات ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۸۹/۷/۱۱، نسخه نهایی: ۸۹/۱۰/۱۸)

**چکیده:** منطقه‌ی پی‌جوئی مس-طلا‌ی پورفیری همند در جنوب غربی بیرجند واقع شده است. توده‌های نیمه عمیق پورفیری با ترکیب مونزونیتی تا دیوریتی در منطقه به شدت دگرسان شده‌اند. مهم‌ترین دگرسانی‌ها شامل زون‌های کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت، پروپلیتیک و کربناته است. همه‌ی عناصر اصلی، فرعی و خاکی کمیاب طی فرایند دگرسانی دستخوش تغییرات شده‌اند. دامنه‌ی تغییر در برخی کم (مانند  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Gd}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Y}$  و  $\text{Eu}$ ) و در برخی عناصر (مثل  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Hf}$  و اغلب عناصر REE) چشمگیرند. ترکیب توده‌ی دگرسانه صورتی است که شدت دگرسانی تغییر عناصر را کنترل می‌کند. دگرسانی کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت در دو توده‌ی مونزونیت و دیوریت با افزایش  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و کاهش  $\text{CaO}$ ،  $\text{Na}_2\text{O}$ ،  $\text{K}_2\text{O}$  و  $\text{TFeO}$  مشخص می‌شود. مقدار  $\text{CaO}$  رفتار متغیری براساس میزان کلسیت نشان می‌دهد. عناصر REE تهی‌شدگی دارند. عنصر  $\text{Rb}$  رفتار متغیر در شدت‌های مختلف دگرسانی نشان می‌دهد. عناصر  $\text{Sr}$ ،  $\text{Ba}$  و  $\text{Zr}$  به شدت کاهش یافته‌اند. عنصر  $\text{Hf}$  در توده‌ی مونزونیتی با افزایش شدت دگرسانی تهی شده در حالیکه در توده‌ی دیوریتی غنی‌شدگی دارد. دگرسانی پروپلیتیک با کاهش  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{K}_2\text{O}$  و  $\text{TFeO}$  در هر دو توده مشخص می‌شود. اما در توده‌ی مونزونیتی  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{Na}_2\text{O}$  کاهش یافته و  $\text{CaO}$  و  $\text{MgO}$  افزوده شده، در حالیکه در توده‌ی دیوریتی عکس این حالت رخ داده است. همچنین عناصر REE در توده‌ی مونزونیتی غنی‌شدگی نشان می‌دهند، در حالیکه در توده‌ی دیوریتی LREE تهی‌شدگی دارند. عنصر  $\text{Rb}$  رفتار متغیر در شدت‌های مختلف دگرسانی نشان می‌دهد. عناصر  $\text{Sr}$ ،  $\text{Ba}$  و  $\text{Zr}$  به شدت کاهش یافته‌اند. عنصر  $\text{Hf}$  در هر دو توده غنی‌شدگی دارد. دگرسانی کربناتی در توده‌ی مونزونیتی با کاهش  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{K}_2\text{O}$ ،  $\text{Na}_2\text{O}$ ،  $\text{MgO}$ ،  $\text{TFeO}$ ،  $\text{Sr}$ ،  $\text{Ba}$ ،  $\text{Zr}$  و  $\text{Hf}$  و افزایش  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{CaO}$  مشخص می‌شود. عناصر REE تهی‌شدگی اندکی دارند. دگرسانی با شدت‌های مختلف می‌تواند نامگذاری سنگ براساس رده‌بندی شیمیایی، تعیین سری ماگمایی و موقعیت آن‌را در دیاگرام شاند و تفسیر نوع کانی باقیمانده در منشاء برپایه الگوی عناصر REE را تحت تاثیر قرار دهد. نیز تعیین خاستگاه توده‌ی نفوذی براساس ایزوتوپ‌های  $\text{Rb-Sr}$  در نمونه دگرسان، ممکن است نتیجه‌ی عکس نشان دهد. لذا در انتخاب نمونه مناسب برای بررسی‌های پتروژنی-ایزوتوپی در مناطق دگرسانی باید دقت زیادی شود.

**واژه‌های کلیدی:** دگرسانی؛ تغییرات عناصر؛ عناصر کمیاب؛ مس پورفیری؛ همند.

### مقدمه

۱۸' ۵۷" ۵۸° شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۱۲' ۲۶" ۳۲° تا ۴۵' ۳۱" ۳۲° شمالی قرار دارد (شکل ۱). این کانسار از نظر تقسیمات ساختمانی در شرق بلوک لوت واقع شده است.

منطقه‌ی پی‌جوئی مس پورفیری همند در فاصله‌ی حدود ۷۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان بیرجند، مرکز استان خراسان جنوبی، در گستره‌ی بین طول‌های جغرافیایی ۴۶' ۴۹" ۵۸° تا

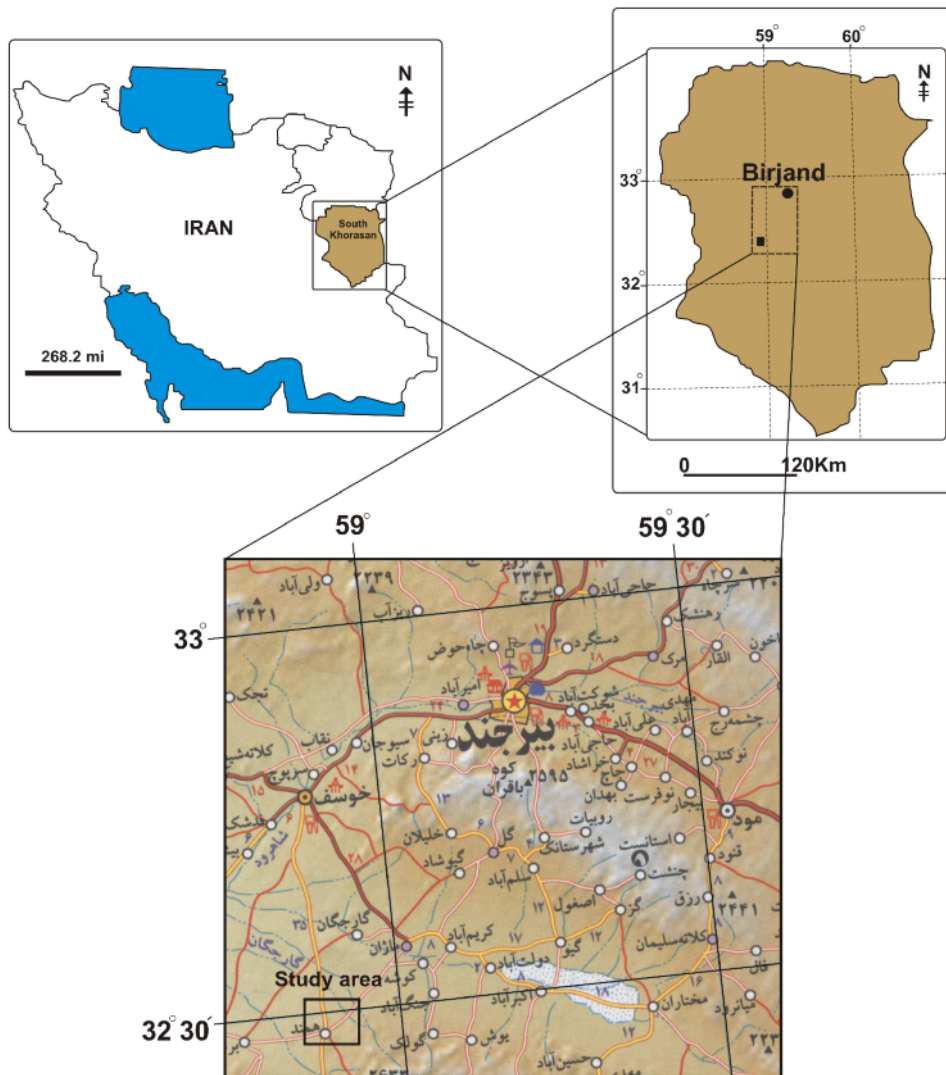
و کانی‌شناسی زون‌های دگرسان مشخص شده است، مورد توجه قرار گرفته و روند تغییرات عناصر با تغییرات شدت دگرسانی نیز بررسی شود.

#### روش بررسی

به منظور رسیدن به اهداف مورد نظر، بررسی‌های صحرائی و آزمایشگاهی انجام شده در این ناحیه شامل مراحل زیرند: الف) تهیه نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ (ب) تهیه نقشه دگرسانی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ (پ) برداشت بیش از ۱۹۰ نمونه به منظور بررسی‌های سنگ‌شناسی و دگرسانی، ت) بررسی ۱۸۰ مقطع نازک و نازک صیقلی. در این مرحله شدت دگرسانی‌ها در مقاطع، مورد توجه خاص گرفت. شدت از روی میزان تخریب کانی‌های اولیه و درصد کانی‌های ثانویه در مقطع برآورد شده است، ث) تجزیه‌ی ۱۵ نمونه به روش XRF برای اکسیدهای اصلی در آزمایشگاه گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد و اکسیدهای فرعی و خاکی کمیاب به روش ICP-MS در آزمایشگاه دانشگاه کلرادو آمریکا. نمونه‌های انتخاب شده از ۲ توده‌ی نفوذی نیمه عمیق بوده‌اند که نقش اساسی در تشکیل کانی‌سازی مس-طلا پورفیری همند داشته‌اند. این توده‌ها در بخش‌های مختلف منطقه تحت تاثیر دگرسانی‌های مختلف و با شدت‌های متفاوت قرار گرفته‌اند. تجزیه‌ی نمونه نسبتاً تازه این توده‌ها و نیز همان توده با دگرسانی‌های مختلف با شدت‌های متغیر به منظور مقایسه‌ی ژئوشیمیایی صورت گرفته است. نوع دستگاه XRF دانشگاه فردوسی مشهد فیلیپس مدل X Unique II بوده است. از نمونه‌ها پس از خردایش و نرمایش در شرکت طیف‌کنساران بینالود، قرص‌های پرس شده و شیشه‌های ذوبی تهیه و تجزیه شدند. استانداردهای استفاده شده در این تجزیه از سازمان زمین‌شناسی آمریکا و کانادا خریداری شدند. همچنین آنالیز عناصر فرعی و خاکی کمیاب با دستگاه ICP-MS به روش ذوب قلیایی انجام شده است. در این روش ۰/۱ گرم از نمونه در لیتیم متابورات/تترابورات ذوب شده و در اسید سیتریک هضم می‌شود. این روش برای آنست که همه‌ی کانی‌ها ذوب شده و مقدار عناصر، به ویژه عناصر خاکی کمیاب بدرستی اندازه‌گیری شوند. ج) ترسیم نمودارهای مناسب برای نشان دادن بهینه تغییرات عناصر مختلف در نرم افزارهای GCD.kit و Excel، (چ) تفسیر نتایج.

این منطقه اولین کانی‌سازی نوع مس پورفیری در شرق ایران و بلوک لوت است که اکتشاف شده و مورد مطالعات دقیق از همه جنبه‌ها توسط نویسندگان قرار گرفته است. کانی‌سازی در محدوده‌ی پی‌جوئی همند به یک رشته توده‌های نیمه عمیق حدواسط آهکی-قلیایی پورفیری در حد مونزونیت تا دیوریت است که به شکل استوک بوده و داخل یکدیگر نفوذ کرده‌اند. دگرسانی در منطقه تا بیش از ۹۰ کیلومتر مربع گسترش دارد و شامل زون‌های کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت، کوارتز-کربنات-پیریت، سیلیسی-پروپلیتیک، پروپلیتیک و آرژیلیک-سیلیسی و کربنات در سطح است. کانی‌سازی به شکل‌های داربستی، پراکنده و برش گرمایی مشاهده می‌شوند که مهمترین حالت آن بافت داربستی است. در برخی نقاط از محدوده تا بیش از ۵۰ رگچه در واحد مترمربع دیده می‌شود. رگچه‌ها عمدتاً کوارتز و کوارتز-سولفیدی هستند که کانی‌های سولفیدی تحت تاثیر اکسیداسیون شدید در سطح زمین قرار گرفته‌اند. پیریت، کالکوپیریت و بورنیت مهمترین کانی‌های سولفیدی منطقه هستند. وجود یک زون گوسان گسترده در سطح زمین و درصد اکسید آهن ثانویه که گاه تا ۱۵ درصد می‌رسد، حکایت از کانی‌سازی سولفیدی گسترده در منطقه دارد. مشاهده‌ی زون کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت با تراکم بالای رگچه در سطح زمین نشان می‌دهد که این کانی‌سازی دستخوش فرسایش شدیدی شده است. بررسی‌های ژئوشیمیایی نیز بالا بودن مس (تا ۰/۵ درصد) و طلا (تا بیش از ۰/۸ گرم در تن) را نشان می‌دهد. با توجه به همه‌ی پی‌جوئی‌های صحرائی و بررسی‌های آزمایشگاهی گستره‌ی پی‌جوئی همند یک ذخیره مس-طلا پورفیری است [۱].

موضوع میزان تحرک عناصر طی فرایند دگرسانی‌های گرمایی در کنسارهای ماگمایی-گرمایی امروزه مورد توجه قرار گرفته؛ به طوریکه مقالات متعددی در این باره تاکنون به چاپ رسیده‌اند. از این میان تحرک عناصر نادر خاکی در اثر دگرسانی‌های مختلف بیشتر مورد بحث قرار گرفته است [۲-۱۷]. هدف از این مقاله بررسی تاثیر دگرسانی‌های مختلف روی تغییرات عناصر اصلی، فرعی و خاکی کمیاب در دو توده‌ی نیمه عمیق مولد کانی‌سازی مس-طلا پورفیری همند بوده است. در این پژوهش سعی شد تا ضمن در نظر گرفتن نوع دگرسانی، شدت دگرسان شدن سنگ که از روی بررسی‌های سنگ‌نگاری



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به گستره‌ی پی‌جوئی مس-طلای پورفیری همد.

### زمین‌شناسی

گستره‌ی پی‌جوئی مس پورفیری همد از نظر زمین‌شناسی ناحیه‌ای در گوشه‌ی شمال شرقی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ سرچاه‌شور [۱۸] قرار گرفته است. بنابر این نقشه، بخش اعظم منطقه شامل سنگ‌های آتشفشانی در حد آندزیت، داسیت، ریولیت، توف و ایگنمبریت است که در برخی نقاط سنگ‌های نیمه‌عمیق اسیدی- حدواسط در آنها نفوذ کرده‌اند. اما بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی این پروژه نشان داد که بسیاری از واحدهایی که در نقشه، سنگ آتشفشانی معرفی شده‌اند، توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق هستند. اکثر سنگ‌های آتشفشانی- نفوذی منطقه دگرسان شده‌اند و کانی‌سازی در برخی نقاط مشاهده می‌شود.

براساس بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده، واحدهای زمین‌شناسی شناسایی شده در گستره‌ی پی‌جوئی همد را می‌توان به ۴ بخش تقسیم کرد (شکل ۲):

- ۱- در سنگ‌های آتشفشانی پیش از ائوسن میانی که توده‌های نیمه عمیق ائوسن میانی [۱۹] وابسته به کانی‌سازی نفوذ کرده‌اند. این واحدها شامل توفیت و توف داسیتی است که در مرکز و غرب منطقه رخنمون دارند،
- ۲- توده‌های نیمه عمیق بیشتر اسیدی- حدواسط ائوسن میانی وابسته به کانی‌سازی در حد مونزونیت تا دیوریت که با شدت‌های مختلف دگرسان شده و دارای کانی‌سازی داربستی و افشان با مقادیر متفاوت‌اند، این توده‌ها به صورت انباره درهم

### دگرسانی

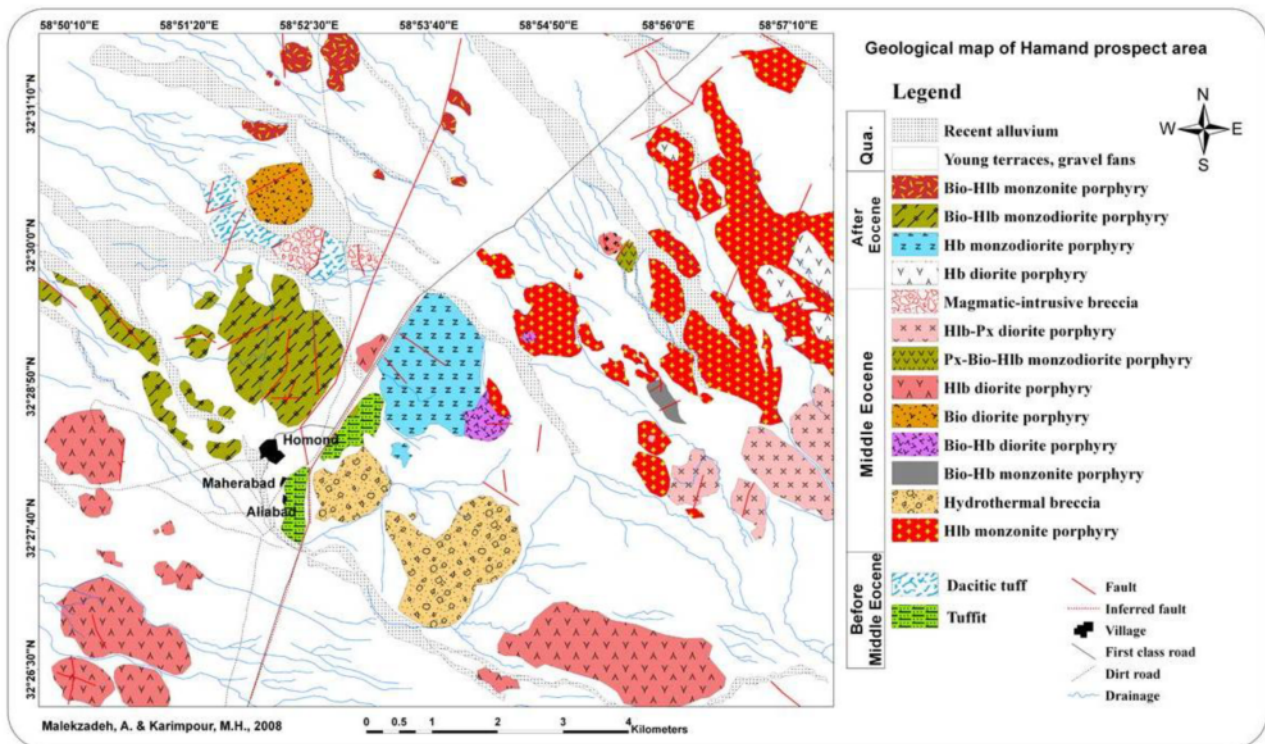
سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی وابسته به کانی‌سازی در گستره‌ی گسترده‌ای در حدود ۱۳۲ کیلومترمربع تحت تاثیر دگرسانی قرار گرفته‌اند. بیشترین شدت دگرسانی در شرق ناحیه دیده می‌شود. دگرسانی‌ها روند خطی ندارند و رابطه‌ی مستقیمی بین آنها و گسترش توده‌های نفوذی نیمه عمیق دیده می‌شود. گسترش و شدت دگرسانی در منطقه‌ی پی‌جوئی ماهرآباد نشان‌دهنده‌ی کانی‌سازی نوع پورفیری است.

براساس بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی ۶ نوع دگرسانی درون‌زاد در گستره‌ی پی‌جوئی همدند تفکیک شدند که عبارتند از: (۱) زون کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت، (۲) کوارتز- کربنات- پیریت، (۳) زون سیلیسی- پروپلیتیک، (۴) زون پروپلیتیک، (۵) زون آرژیلیک- سیلیسی و (۶) زون کربناتی (شکل ۳). لازم به یادآوری است که به منظور جدایش دقیقتر و تفسیر بهتر دگرسانی‌ها و ارتباط آن با کانی‌سازی و ژئوشیمی، زون‌های دگرسان به صورت ضعیف (شدت کمتر از ۳۰ درصد)، متوسط (شدت بین ۳۰ تا ۵۰ درصد) و شدید (شدت بیش از ۵۰ درصد) در نقشه نشان داده شده‌اند.

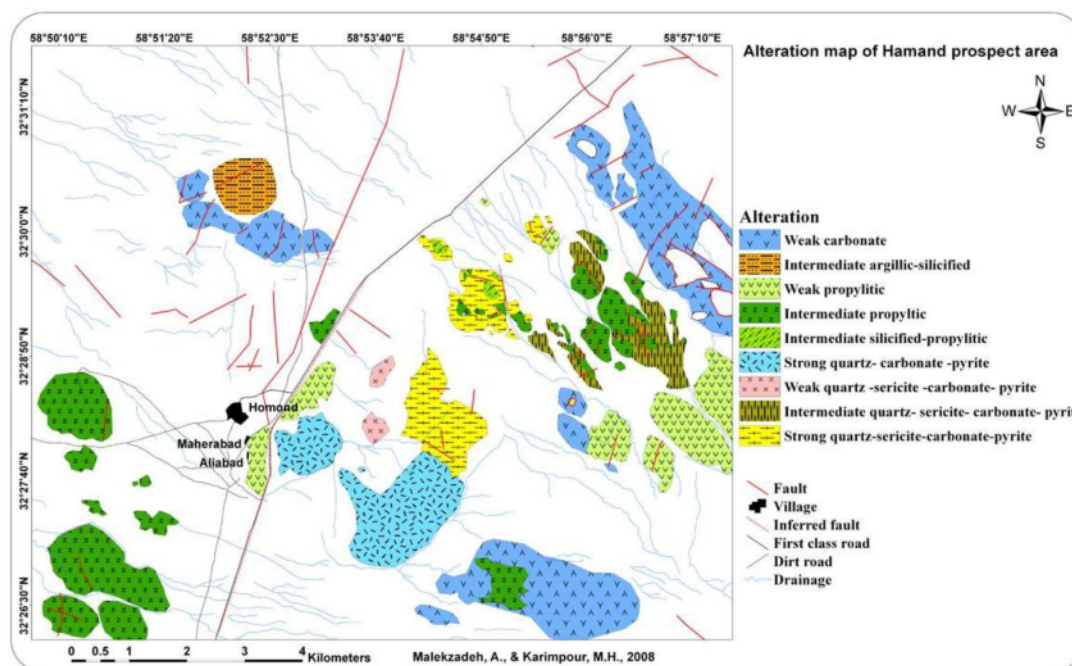
تلسکوپی درآمده‌اند. حدود ۹ واحد وابسته به کانی‌سازی در کل منطقه شناسایی شده‌اند. این واحدها عبارتند از هورنبلند مونزونیت پورفیری، برش گرمایی، بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری، بیوتیت هورنبلند دیوریت پورفیری، بیوتیت دیوریت پورفیری، هورنبلند دیوریت پورفیری، پیروکسن بیوتیت هورنبلند مونزودیوریت پورفیری، هورنبلند پیروکسن دیوریت پورفیری و برش ماگمایی- نفوذی. از این میان واحد هورنبلند مونزونیت پورفیری از نظر نوع و شدت دگرسانی، تراکم بالای رگچه‌های کوارتز- سولفیدی و ناهنجاری‌های بالای مس و طلا از اهمیت بیشتری برخوردارند.

۳- توده‌های نیمه عمیق پس از ائوسن که در توده‌های وابسته به کانی‌سازی نفوذ کرده‌اند. این توده‌ها نیز از دیوریت تا مونزونیت متغیر بوده و کاملاً تازه‌اند. اثری از کانی‌سازی و دگرسانی در آنها دیده نمی‌شود. این توده‌ها شامل هورنبلند دیوریت پورفیری، هورنبلند مونزودیوریت پورفیری، بیوتیت هورنبلند مونزودیوریت پورفیری و بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری است.

۴- رسوب‌های کواترنری.



شکل ۲ نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده شده‌ی گستره‌ی پی‌جوئی همدند [۱].



شکل ۳ نقشه‌ی دگرسانی منطقه‌ی پی‌جوئی همد [۱].

قسمت‌های مختلف دگرسانی‌های متفاوت دیده شود که این مسئله به دوری یا نزدیکی بخش‌های مختلف واحد سنگی از مرکز سیستم کانی‌سازی و به پیروی از آن اختلاف دمایی و دیگر عوامل فیزیکوشیمیایی برمی‌گردد. همچنین شدت یک نوع دگرسانی در قسمت‌های مختلف توده متفاوت است و این مسئله نیز میزان تغییرات شیمیایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از این میان تغییرات عناصر اصلی طی فرایند دگرسانی چشمگیر است.

در منطقه‌ی مورد بررسی دو توده‌ی نفوذی نیمه عمیق هورنبلند مونزونیت پورفیری و هورنبلند دیوریت پورفیری که از گسترش خوبی در منطقه برخوردار بوده و در قسمت‌های مختلف منطقه با شدت‌های متفاوت تحت تاثیر دگرسانی‌های گوناگون قرار گرفته بودند، برای بررسی تغییرات ژئوشیمیایی انتخاب شدند. این دو توده جزء توده‌های وابسته به کانی‌سازی مس-طلائی پورفیری همد هستند و نمونه نسبتاً تازه و بدون دگرسانی، به منظور مقایسه‌ی تغییرات ژئوشیمیایی، تنها از این دو توده در دسترس بودند.

جدول‌های (۱) و (۲) نتایج تجزیه‌ی عناصر اصلی نمونه‌ی تازه و نمونه‌های دگرسان شده‌ی توده‌های هورنبلند مونزونیت پورفیری و هورنبلند دیوریت پورفیری را به تفکیک نوع دگرسانی و شدت آن ارائه می‌دهد.

دگرسانی شاخص و فراگیر در منطقه‌ی همد زون کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت است. این زون گسترشی بیش از ۲۰ کیلومتر مربع را در شرق منطقه به خود اختصاص داده است که البته شدت آن در بخش‌های مختلف متغیر است. رخنمون این دگرسانی همراه با بخش اصلی تراکم رگچه‌ها و کانی‌سازی مس-طلائی همد با وسعت زیاد در سطح زمین حکایت از فرسایش بخش‌های فوقانی توده‌های نفوذی و کانی‌سازی دارد. این زون در صحرا با رنگ زرد روشن مایل به کمی قهوه‌ای، به علت حضور اکسیدهای آهن ثانویه حاصل از اکسیده شدن سولفیدها در سطح زمین، مشخص می‌شود. این دگرسانی توده‌های مونزونیتی و بخشی از توده‌های دیوریتی را تحت تاثیر قرار داده است.

#### تغییرات عناصر اصلی در فرایند دگرسانی

در طی فرایند دگرسانی که تحت تاثیر محلول‌های ماگمایی و گرمایی بیشتر موجب کانه‌سازی در سنگ‌ها می‌شوند، تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی چشمگیری ایجاد می‌شود. عواملی که تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی را کنترل می‌کنند عبارتند از: ترکیب شیمیایی محلول، دما، pH و Eh محلول و ترکیب شیمیایی سنگ. تغییر این عوامل باعث می‌شود که دگرسانی‌های مختلف با مجموعه کانی‌های متفاوت شکل بگیرند. حتی ممکن است در یک توده‌ی نفوذی و یا سنگ آتشفشانی در

جدول ۱ نتایج تجزیه عناصر اصلی توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری تازه و نمونه‌های دگرسان شده‌ی آن به دگرسانی‌های کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت، پروپلیتیک و کربناته با شدت‌های مختلف.

| شدت دگرسانی                    | تازه    | کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت |         |         | پروپلیتیک |         |         | کربناته |         |
|--------------------------------|---------|------------------------------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|
|                                |         | <۳۰                          | >۵۰     | >۷۰     | <۲۰       | ≈۳۰     | >۵۰     | <۲۰     | >۶۰     |
|                                | MA-126  | MA-123                       | MA-172  | MA-141  | MA-160    | MA-162  | MA-176  | MA-169  | MA-136  |
| طول                            | ۶۸۰۱۱۲  | ۶۸۰۳۰۸                       | ۶۸۲۱۱۹  | ۶۷۹۹۲۱  | ۶۸۰۷۹۷    | ۶۸۱۳۰۲  | ۶۸۲۱۶۵  | ۶۸۱۲۹۶  | ۶۷۹۹۶۸  |
| عرض                            | ۳۵۹۵۷۴۲ | ۳۵۹۵۹۲۹                      | ۳۵۹۵۴۰۴ | ۳۵۹۶۰۴۲ | ۳۵۹۵۳۸۱   | ۳۵۹۴۵۴۸ | ۳۵۹۵۵۲۸ | ۳۵۹۸۸۸۵ | ۳۵۹۶۴۱۶ |
| Wt%                            |         |                              |         |         |           |         |         |         |         |
| SiO <sub>2</sub>               | ۵۷,۸۹   | ۵۹,۱۱                        | ۶۳,۹۱   | ۶۱,۷۵   | ۵۸,۴۶     | ۵۶,۸۴   | ۵۵,۰۰   | ۵۴,۴۱   | ۵۷,۷۷   |
| TiO <sub>2</sub>               | ۰,۵۸    | ۰,۷۲                         | ۰,۵۸    | ۰,۵۵    | ۰,۵۱      | ۰,۵۴    | ۰,۴۸    | ۰,۶۵    | ۰,۵۵    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۱۵,۱۱   | ۱۵,۰۱                        | ۱۶,۱۹   | ۱۷,۰۴   | ۱۴,۸۹     | ۱۵,۵۵   | ۱۴,۴۵   | ۱۵,۰۶   | ۱۸,۰۵   |
| TFeO                           | ۷,۱۱    | ۸,۰۲                         | ۷,۲۱    | ۷,۰۵    | ۶,۹۳      | ۶,۹۱    | ۶,۲۴    | ۸,۶۲    | ۴,۲۳    |
| MnO                            | ۰,۱۸    | ۰,۳۴                         | ۰,۲۹    | ۰,۰۸    | ۰,۱۹      | ۰,۱۶    | ۰,۱۷    | ۰,۱۵    | ۰,۲۴    |
| MgO                            | ۱,۹۳    | ۴,۴۶                         | ۲,۹۹    | ۰,۵۰    | ۲,۵۲      | ۴,۲۱    | ۴,۴۶    | ۲,۰۳    | ۰,۳۳    |
| CaO                            | ۷,۳۲    | ۱,۸۰                         | ۱,۱۲    | ۶,۴۷    | ۶,۹۲      | ۷,۲۵    | ۱۰,۶۶   | ۹,۲۰    | ۱۰,۳۲   |
| Na <sub>2</sub> O              | ۳,۳۰    | ۳,۳۳                         | ۲,۴۸    | ۳,۷۰    | ۳,۴۶      | ۲,۷۴    | ۲,۹۹    | ۳,۵۷    | ۰,۲۹    |
| K <sub>2</sub> O               | ۲,۵۹    | ۴,۶۴                         | ۲,۰۴    | ۱,۳۹    | ۲,۴۸      | ۲,۷۵    | ۲,۴۶    | ۲,۲۸    | ۲,۲۱    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | ۰,۳۸    | ۰,۳۶                         | ۰,۲۴    | ۰,۲۹    | ۰,۳۴      | ۰,۳۹    | ۰,۲۷    | ۰,۲۶    | ۰,۳۶    |

جدول ۲ نتایج تجزیه‌ی عناصر اصلی توده‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری تازه و نمونه‌های دگرسان شده‌ی آن به دگرسانی‌های کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت و پروپلیتیک با شدت‌های مختلف.

| شدت دگرسانی                    | تازه    | کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت |         |         | پروپلیتیک |         |     |
|--------------------------------|---------|------------------------------|---------|---------|-----------|---------|-----|
|                                |         | <۱۵                          | ≈۳۰     | >۵۰     | <۲۰       | ۵۰-۳۰   | ≈۵۰ |
|                                | MA-95   | MA-134                       | MA-186  | MA-195  | MA-196    | MA-147  |     |
| طول                            | ۶۷۸۹۹۸  | ۶۷۹۹۹۳                       | ۶۷۸۹۳۶  | ۶۷۲۸۵۷  | ۶۷۷۰۱۷    | ۶۷۹۵۱۶  |     |
| عرض                            | ۳۵۹۷۱۸۰ | ۳۵۹۶۱۳۳                      | ۳۵۹۴۱۶۹ | ۳۵۹۴۰۳۹ | ۳۵۹۵۶۸۵   | ۳۵۹۵۹۸۹ |     |
| Wt%                            |         |                              |         |         |           |         |     |
| SiO <sub>2</sub>               | ۵۷,۷۷   | ۶۲,۳۳                        | ۵۶,۹۶   | ۵۸,۲۶   | ۵۳,۴۵     | ۵۷,۴۷   |     |
| TiO <sub>2</sub>               | ۰,۵۸    | ۰,۵۱                         | ۰,۵۴    | ۰,۵۱    | ۰,۷۰      | ۰,۵۵    |     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۱۴,۴۹   | ۱۴,۶۷                        | ۲۰,۷۷   | ۱۵,۱۹   | ۱۴,۵۰     | ۱۵,۱۶   |     |
| TFeO                           | ۶,۵۲    | ۵,۸۶                         | ۵,۹۴    | ۶,۳۶    | ۹,۵۵      | ۷,۲۰    |     |
| MnO                            | ۰,۲۷    | ۰,۱۳                         | ۰,۱۵    | ۰,۱۴    | ۰,۱۹      | ۰,۲۳    |     |
| MgO                            | ۲,۸۱    | ۲,۰۹                         | ۰,۴۷    | ۲,۳۵    | ۶,۹۱      | ۳,۳۱    |     |
| CaO                            | ۷,۶۵    | ۵,۶۹                         | ۸,۰۷    | ۷,۳۱    | ۷,۸۴      | ۵,۴۳    |     |
| Na <sub>2</sub> O              | ۳,۰۴    | ۳,۲۸                         | ۰,۴۳    | ۴,۳۳    | ۲,۶۹      | ۳,۷۳    |     |
| K <sub>2</sub> O               | ۳,۴۶    | ۳,۶۲                         | ۳,۰۲    | ۲,۱۴    | ۲,۰۰      | ۲,۵۷    |     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | ۰,۴۴    | ۰,۳۴                         | ۰,۴۹    | ۰,۳۲    | ۰,۳۷      | ۰,۳۵    |     |

### توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری

شکل‌های (۴) تا (۶) میزان افزایش یا کاهش عناصر اصلی را نسبت به نمونه تازه به تفکیک نوع دگرسانی و شدت آن نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (۷) تا (۹) تغییر دگرسانی‌های مختلف را در نامگذاری ژئوشیمیایی سنگ‌ها، تقسیم آنها از نظر شاخص شاند و سری ماگمایی نشان می‌دهد. تفسیر نتایج عبارتست از:

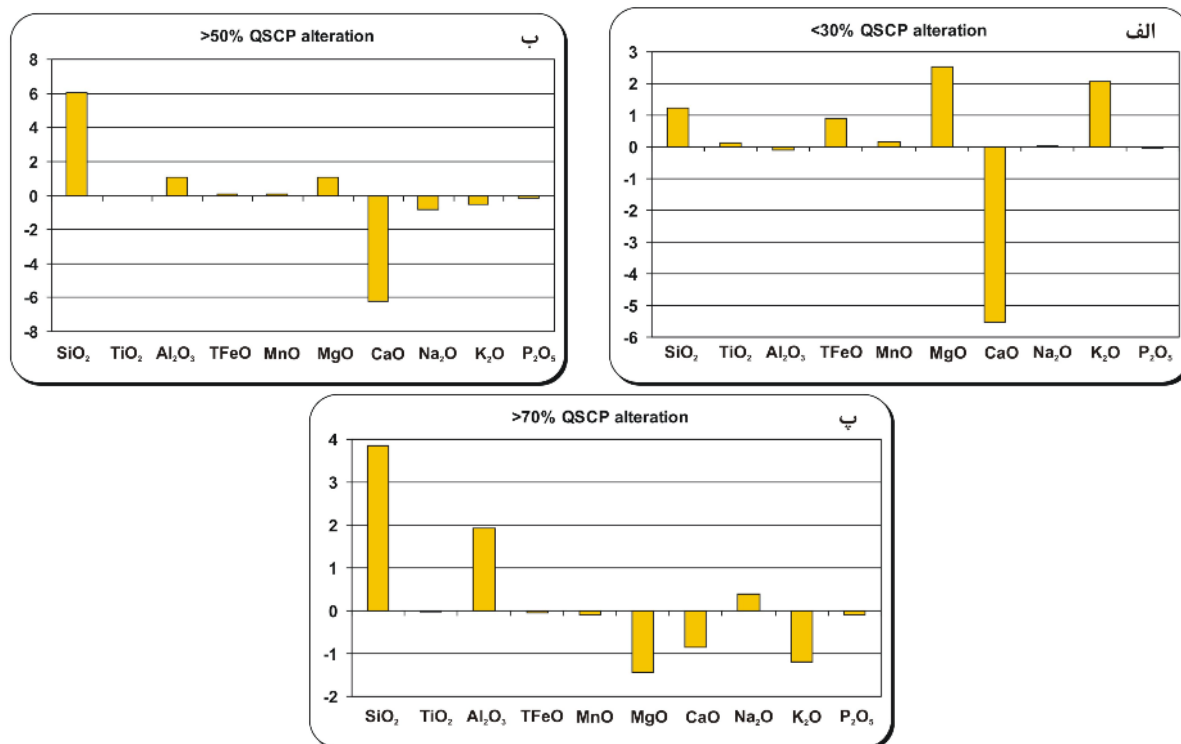
دگرسانی کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت: میزان SiO<sub>2</sub> در هر سه نمونه‌ی دگرسان افزایش یافته است که به علت حضور

کوارتز ثانویه و اضافه شدن سیلیس به وسیله‌ی محلول کانه‌دار به سنگ است. در نمونه‌ی با شدت متوسط، میزان کوارتز ثانویه سهم بیشتری نسبت به دیگر کانی‌های این زون داشته و به همین علت میزان سیلیس بالاتر از نمونه‌ی با شدت بالاست. مقدار Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> نیز با افزایش شدت دگرسانی افزایش یافته که نشان‌دهنده‌ی اضافه شدن این عنصر به وسیله‌ی محلول به سنگ و تشکیل کانی‌هایی مانند سرسیت و کانی‌های رسی است. انتظار می‌رود که در این زون میزان K به علت حضور سرسیت افزایش یابد، ولی برعکس کاهش یک درصدی در این عنصر با

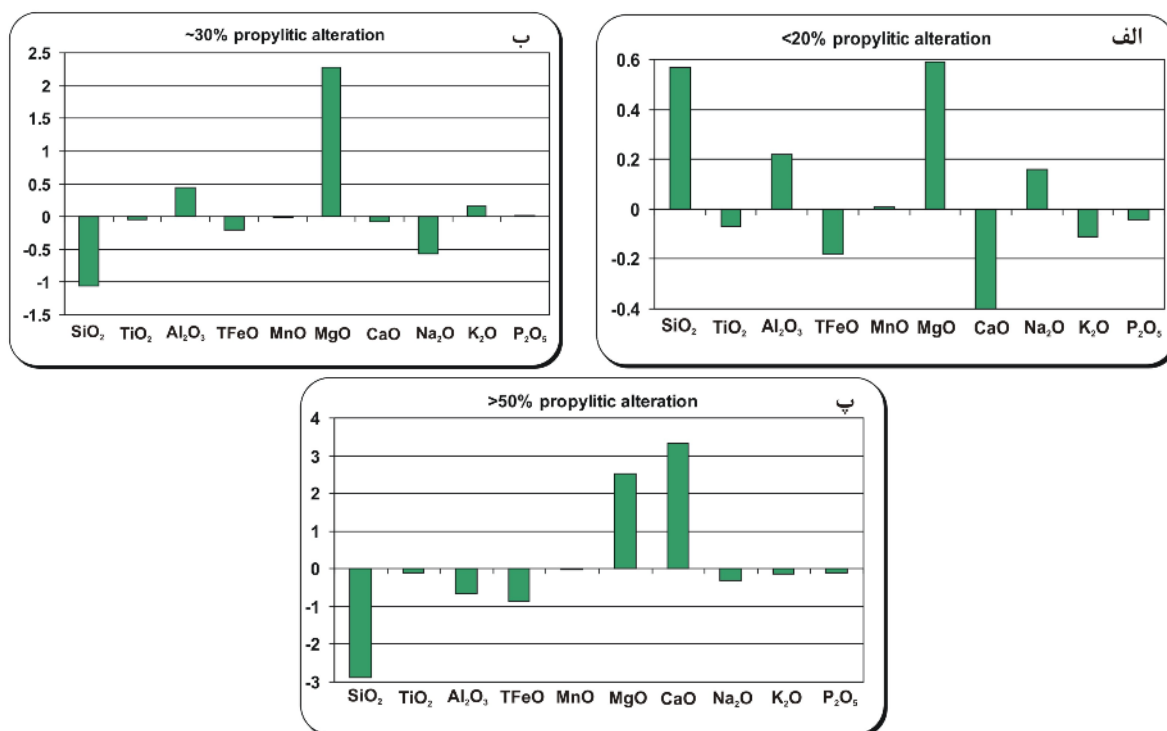
دلیل آزاد شدن پتاسیم اضافی سیستم در محیط آهکی-قلیایی معمولی نقش می‌بندد (شکل ۹).

**دگرسانی پروپلیتیک:** در این زون بیشتر کاهش در اکسیدهای  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{K}_2\text{O}$ ،  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{TFeO}$  با افزایش شدت دگرسانی رخ می‌دهد که به علت دگرسان شدن پلاژیوکلاز، فلدسپات پتاسیم و هورنبلند است. اما بر میزان  $\text{CaO}$  و  $\text{MgO}$  با افزایش شدت دگرسانی افزوده می‌شود که نشان‌دهنده اضافه شدن هرچه بیشتر این دو عنصر به وسیله گرماب‌ها به سنگ است که در تشکیل کانی‌هایی مثل کلریت، اپیدوت و کلسیت شرکت می‌کنند. اکسیدهای  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{MnO}$  و  $\text{P}_2\text{O}_5$  تغییر ناچیزی در شدت‌های مختلف نشان می‌دهند. دگرسانی پروپلیتیک به طور خاص شامل مبادله  $\text{Ca}^{2+}$  با  $\text{K}^+$  و  $\text{Na}^+$  همراه با سیلیس‌زدایی در سنگ است (شکل‌های ۵ الف تا پ). کاهش سیلیس، سدیم و پتاسیم با افزایش شدت دگرسانی پروپلیتیک باعث می‌شود تا نامگذاری شیمیایی سنگ از دیوریت به سمت دیوریت گابرویی تغییر کند (شکل ۷). همچنین موقعیت نمونه در نمودار شاند [۲۱] در محیط متاآلمینوس و در نمودار پکسریلو و تیلور [۲۲] در سری آهکی-قلیایی یا پتاسیم بالا جابه‌جا می‌شود (شکل‌های ۸ و ۹). دگرسانی کربناته: مقدار  $\text{SiO}_2$  کاهش نشان می‌دهد که این کاهش با افزایش شدت دگرسانی کمتر شده است. این بدان معنی است که بخشی از سیلیس آزاد شده از سنگ، صرف ساخت برخی کانی‌های سیلیکاتی مثل سرسیت شده است که به صورت فرعی در این زون دیده شده است. اضافه شدن  $\text{Al}_2\text{O}_3$  با گرماب به سنگ نیز می‌تواند به همین علت باشد. مقدار  $\text{K}_2\text{O}$  و  $\text{Na}_2\text{O}$  با افزایش شدت دگرسانی به شدت کاسته شده که به علت تخریب فلدسپات‌ها و آزاد شدن این عناصر است. تبدیل هورنبلند به کلسیت و افزایش مقدار این تبدیل با افزایش شدت دگرسانی باعث شده است که مقدار  $\text{MgO}$  و  $\text{TFeO}$  کاهش و  $\text{CaO}$  افزوده شود. اکسیدهای  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{MnO}$  و  $\text{P}_2\text{O}_5$  تغییر ناچیزی در شدت‌های مختلف نشان می‌دهند (شکل‌های ۶ الف و ب). در نامگذاری ژئوشیمیایی این نمونه‌ها، نمونه‌ی با شدت کمتر از ۲۰ درصد دگرسانی کربناتی در مرز مونزونیت و مونزودیوریت و نمونه شدیداً دگرسان شده در پایین بخش محیط دیوریت (به دلیل کاهش یون  $\text{Na}$  و  $\text{K}$ ) نقش می‌بندد (شکل ۷). تغییر کلسیم، آلومینیوم، سیلیس و پتاسیم در این نمونه‌ها، موقعیت آنها را در بخش شبه رخشان و آهکی-قلیایی پتاسیم بالا شدیداً تحت تاثیر قرار می‌دهد (شکل‌های ۸ و ۹).

افزایش شدت دگرسانی دیده می‌شود. این مسئله نشان می‌دهد که در شدت کم دگرسانی،  $\text{K}$  به سیستم افزوده شده ولی با افزایش شدت،  $\text{K}$  با شاره‌ی گرمابی به سیستم اضافه نشده، بلکه  $\text{K}$ ی لازم برای تشکیل سرسیت در نتیجه‌ی دگرسان شدن کانی‌های پتاسیم‌دار دیگر مانند فلدسپات‌های پتاسیم و آزاد شدن این عنصر، تامین شده است. علاوه بر آن مقداری از  $\text{K}$  نیز از سیستم خارج شده است. میزان  $\text{Na}_2\text{O}$  از شدت کم به شدت متوسط دگرسانی کاهش یک درصدی نشان می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی تخریب پلاژیوکلازها و کانی‌های سدیم‌دار اولیه دیگر سنگ و آزاد شدن  $\text{Na}$  است، اما در شدت زیاد در حد ۰/۵ درصد این عنصر به سنگ اضافه شده است. کاهش محسوس  $\text{TFeO}$  و  $\text{MgO}$  با افزایش شدت دگرسانی به علت دگرسان شدن هرچه بیشتر هورنبلند اولیه و آزاد شدن این عناصر است. مقدار  $\text{CaO}$  نیز همانند آهن و منیزیم کاهش نشان می‌دهد که به دلیل آزاد شدن این عنصر در اثر تخریب کانی‌های کلسیم‌دار مثل پلاژیوکلازهاست، اما از آنجاکه بخشی از این عنصر در شدت بالای دگرسانی در تشکیل مقدار زیادی کلسیت شرکت کرده، میزان این کاهش به شدت کاسته شده است. این به آن معنی است که مقداری از  $\text{Ca}$ ی آزاد شده صرف ساختن کلسیت شده و بقیه آن آزاد شده است. مقدار متغیر کانی کلسیت در نمونه‌های این زون، میزان این عنصر را کنترل می‌کند. اکسیدهای  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{MnO}$  و  $\text{P}_2\text{O}_5$  تغییر ناچیزی در شدت‌های مختلف نشان می‌دهند (شکل‌های ۴ الف تا پ). تغییر عناصری چون  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{K}_2\text{O}$  و  $\text{Na}_2\text{O}$  باعث می‌شود تا نمونه‌های دگرسان در نمودار نامگذاری ژئوشیمیایی میدل-موست [۲۰] نامی متفاوت با نمونه‌ی تازه داشته باشند. از نظر ژئوشیمیایی نمونه‌ی تازه تقریباً در گستره‌ی دیوریت در نزدیک مرز مونزونیت نقش می‌بندد، در حالیکه نمونه‌ی با کمتر از ۳۰ درصد دگرسانی به علت افزایش پتاسیم در محیط مونزونیت و نمونه‌های بیش از ۵۰ تا ۷۰ درصد دگرسان شده به دلیل افزایش سیلیس و کاهش سدیم و پتاسیم در محیط‌های گرانودیوریت و دیوریت قرار گرفته‌اند (شکل ۷). از نظر شاخص شاند [۲۱] نیز به دلیل افزایش  $\text{Al}$  و کاهش محسوس  $\text{Ca}$  به خصوص در نمونه‌هایی با شدت کم و متوسط، نمونه‌ها در محیط پراآلمینوس قرار گرفته‌اند (شکل ۸). همچنین نمونه‌ی تازه هورنبلند مونزونیت پورفیری از نوع آهکی-قلیایی پتاسیم بالاست، ولی نمونه با شدت کم دگرسانی که مقدار پتاسیم افزایش یافته در محیط شوشونیت و نمونه‌های با شدت بالاتر به

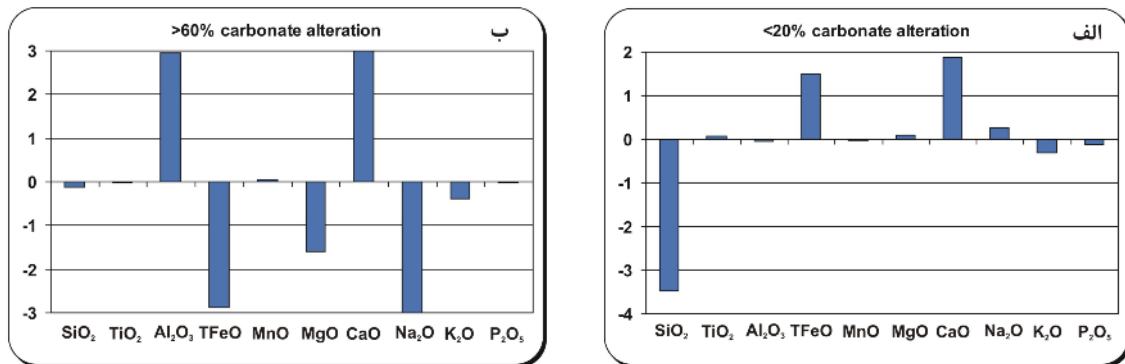


شکل ۴ الف تا پ تغییرات اکسیدهای اصلی در شدت‌های مختلف دگرسانی کوآرتز- سرسیت- کربنات- پیریت در توده هورنبلند مونزونیت پورفیری. محور Y معرف میزان تغییرات عناصر نسبت به نمونه سالم است.

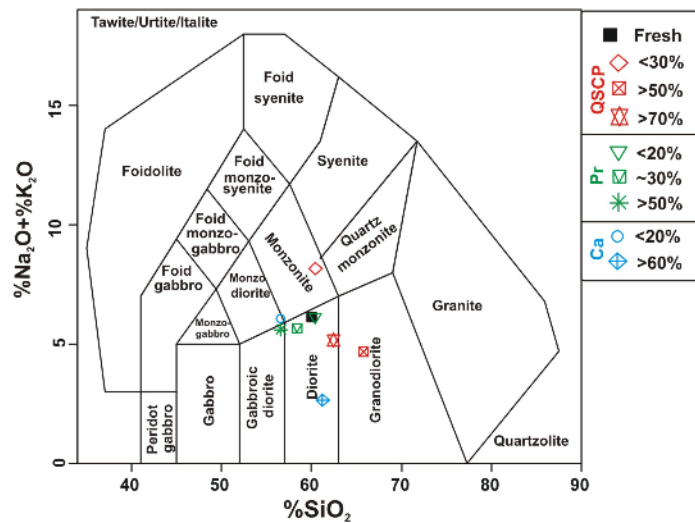


شکل ۵ الف تا پ - تغییرات اکسیدهای اصلی در شدت‌های مختلف دگرسانی پروپلیتیک در توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری. محور Y معرف میزان تغییرات عناصر نسبت به نمونه سالم است.

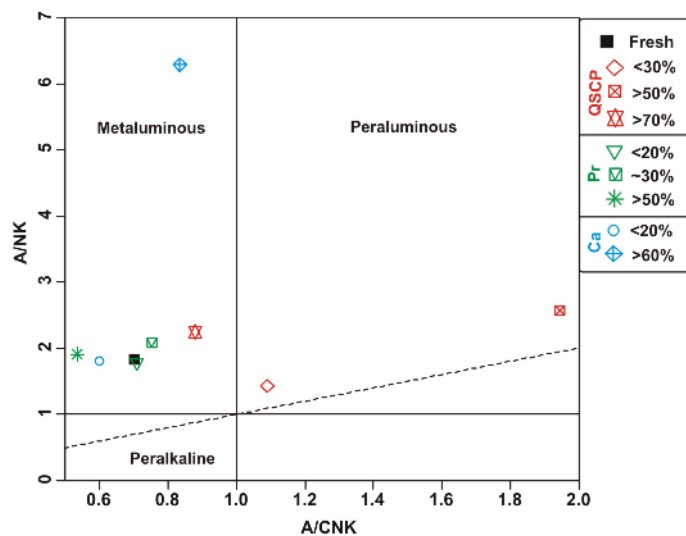




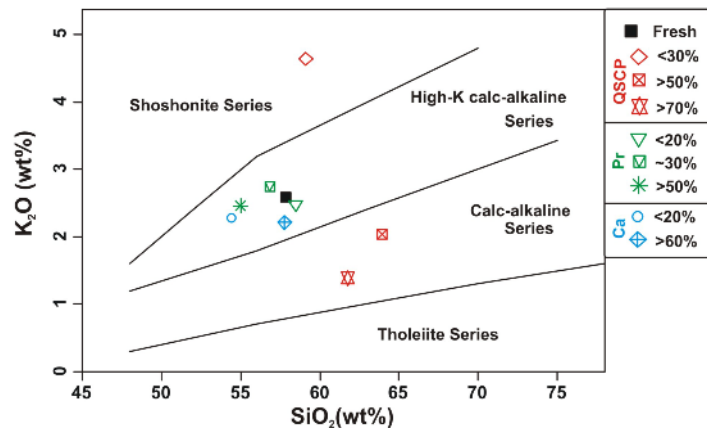
شکل ۶ الف و ب - تغییرات اکسیدهای اصلی در شدت‌های مختلف دگرسانی کربناتی در توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری. محور Y معرف میزان تغییرات عناصر نسبت به نمونه سالم است.



شکل ۷ نامگذاری ژئوشیمیایی توده هورنبلند مونزونیت پورفیری در شرایط دگرسانی‌های کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت، پروپلیتیک و کربناته با شدت‌های مختلف. نمودار از میدل‌موست [۲۰].



شکل ۸ موقعیت توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری در شرایط دگرسانی‌های کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت، پروپلیتیک و کربناته با شدت‌های مختلف در نمودار شاندر [۲۱].



شکل ۹ تعیین سری ماگمایی توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری در شرایط دگرسانی‌های کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت، پروپلیتیک و کربناته با شدت‌های مختلف در نمودار پکسریلو و تیلور [۲۲].

#### توده‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) میزان افزایش یا کاهش عناصر اصلی را نسبت به نمونه‌ی تازه به تفکیک نوع دگرسانی و شدت آن نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) تغییر دگرسانی‌های مختلف را روی نامگذاری ژئوشیمیایی سنگ‌ها، تقسیم آنها از نظر شاخص شاند و سری ماگمایی نشان می‌دهد. تفسیر نتایج به صورت زیر است.

#### دگرسانی کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت: میزان $\text{SiO}_2$

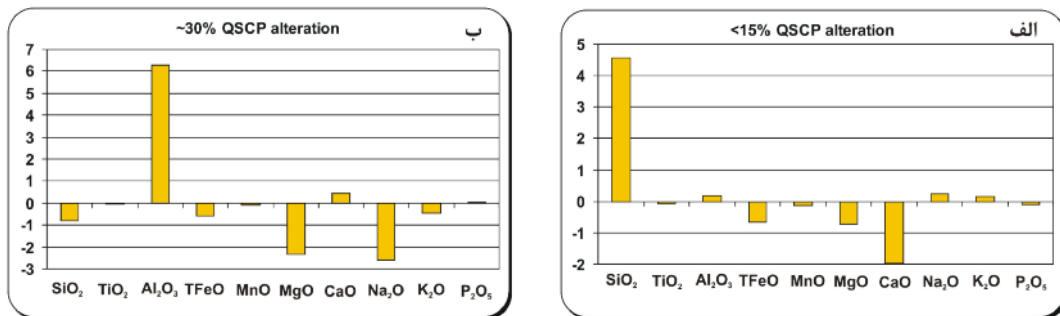
در نمونه با شدت کم با گرمایی‌های افزوده و کوارتزهای ثانویه تشکیل شده است، ولی در نمونه با شدت بالاتر مقداری از سیلیس (کمتر از یک درصد) از سیستم کاسته شده که به علت حضور کمتر کوارتز ثانویه در آن است که آن مقدار نیز از تخریب دیگر کانی‌های سیلیکاتی به وجود آمده‌اند. مقدار  $\text{Al}_2\text{O}_3$  نیز با افزایش شدت دگرسانی افزایش یافته است که نشان‌دهنده‌ی اضافه شدن این عنصر با محلول به سنگ و تشکیل کانی‌هایی مانند سرسیت و کانی‌های رسی است. میزان K کاهش دارد. این مسئله نشان می‌دهد که در شدت کم دگرسانی K به سیستم افزوده شده ولی با افزایش شدت، K لازم برای تشکیل سرسیت در نتیجه‌ی دگرسان شدن کانی‌های پتاسیم-دار دیگر مانند فلدسپات‌های پتاسیم و آزاد شدن این عنصر، تامین شده است. علاوه بر آن مقداری از K نیز از سیستم خارج شده است. میزان  $\text{Na}_2\text{O}$  کاهش نشان می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی تخریب پلاژیوکلازها و دیگر کانی‌های سدیم‌دار اولیه‌ی سنگ و آزاد شدن Na است. کاهش محسوس  $\text{TFeO}$  و  $\text{MgO}$  با افزایش شدت دگرسانی به علت دگرسان شدن هرچه بیشتر

هورنبلند اولیه و آزاد شدن این عناصر است. مقدار CaO نیز همانند آهن و منیزیم در شدت کم، کاهش نشان می‌دهد که به دلیل آزاد شدن این عنصر در اثر تخریب کانی‌های کلسیم‌دار مثل پلاژیوکلازهاست. کلسیم لازم برای تشکیل کلسیت نیز از همین کانی‌ها تامین شده است. در شدت بالا اضافه شدن کلسیم به وسیله‌ی آبگون به سنگ باعث افزایش مقدار کلسیت شده است. اکسیدهای  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{MnO}$  و  $\text{P}_2\text{O}_5$  تغییر ناچیزی در شدت‌های مختلف نشان می‌دهند (شکل‌های ۱۰ الف و ب). تغییر عناصری چون  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{K}_2\text{O}$  و  $\text{Na}_2\text{O}$  باعث می‌شود تا نمونه‌های دگرسان در نمودار نامگذاری ژئوشیمیایی میدل-موس [۲۰] نامی متفاوت با نمونه‌ی تازه داشته باشند. از نظر ژئوشیمیایی نمونه‌ی تازه تقریباً در گستره مونزونیت نزدیک به مرز دیوریت نقش می‌بندد، در حالیکه نمونه‌ی با کمتر از ۱۵ درصد دگرسانی به علت افزایش سیلیس در مرز محیط کوارتز مونزونیت و گرانودیوریت و نمونه در حدود ۳۰ درصد دگرسان شده به دلیل کاهش سدیم و پتاسیم در محیط دیوریت قرار گرفته است (شکل ۱۲). از نظر شاخص شاند [۲۱] نیز به دلیل افزایش Al و کاهش محسوس Na و K نمونه‌ها به سمت محیط پرآلومینوس می‌روند (شکل ۱۳). همچنین نمونه‌ی تازه هورنبلند مونزونیت پورفیری از نوع پتاسیم-آهکی-قلیایی بالا تا شوشونیت است، ولی نمونه‌های دگرسان در محیط پتاسیم-آهکی-قلیایی بالا نقش می‌بندد (شکل ۱۴).

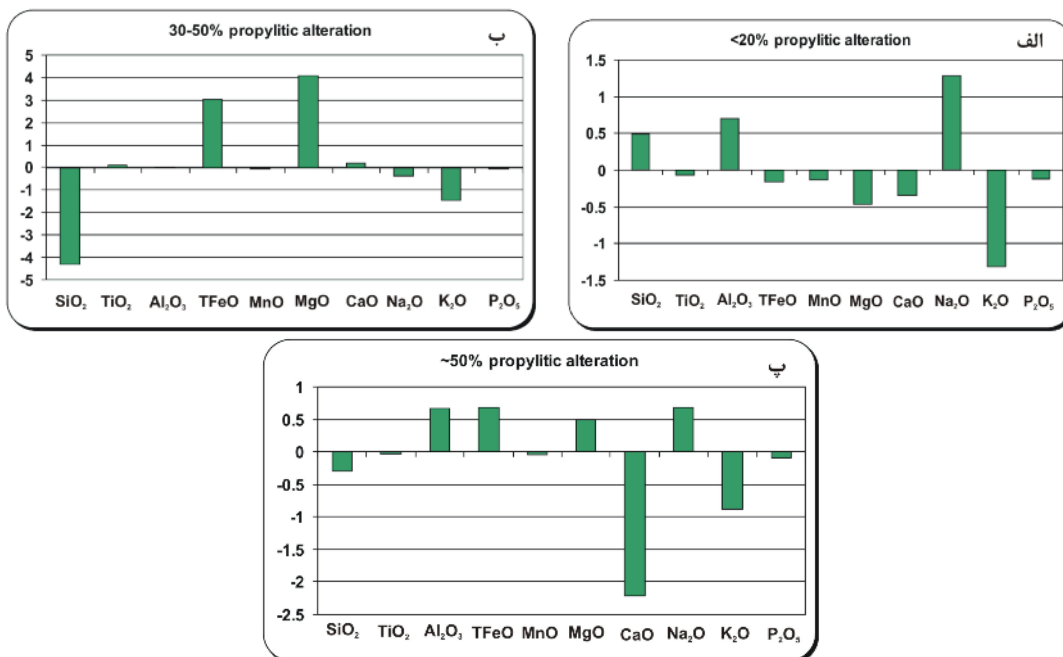
**دگرسانی پروپلیتیک:** در این زون کاهشی در اکسیدهای  $\text{SiO}_2$  و  $\text{K}_2\text{O}$  به طور نامنظم نسبت به شدت دگرسانی دیده می‌شود که به علت دگرسان شدن فلدسپات پتاسیم است. میزان  $\text{Al}_2\text{O}_3$  به وسیله‌ی محلول به سیستم افزوده شده است

منیزیم‌دار تامین شده است. اکسیدهای  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{MnO}$  و  $\text{P}_2\text{O}_5$  دگرسانی بیشتر به صورت اندکی از سیستم خارج شده‌اند که در اثر تخریب آپاتیت و کانی‌های  $\text{Ti}$  و  $\text{Mn}$  دارست (شکل‌های ۱۱ الف تا پ). در نامگذاری شیمیایی در شدت پایین و بالا تغییر چندانی در نام سنگ ایجاد نشده، ولی در شدت متوسط به سمت دیوریت گابرویی تغییر کرده است که به علت کاهش شدید سیلیس، سدیم و پتاسیم است (شکل ۱۲). همچنین موقعیت نمونه در نمودار شاند [۲۱] در محیط متاآلومینوس جا به جا شده (به دلیل افزایش آلومینیوم) و در نمودار پکسریلو و تیلور [۲۲] از مرز شوشونیت، به محیط پتاسیم آهکی-قلیایی بالا (به دلیل کاهش پتاسیم) تغییر کرده است (شکل‌های ۱۳ و ۱۴).

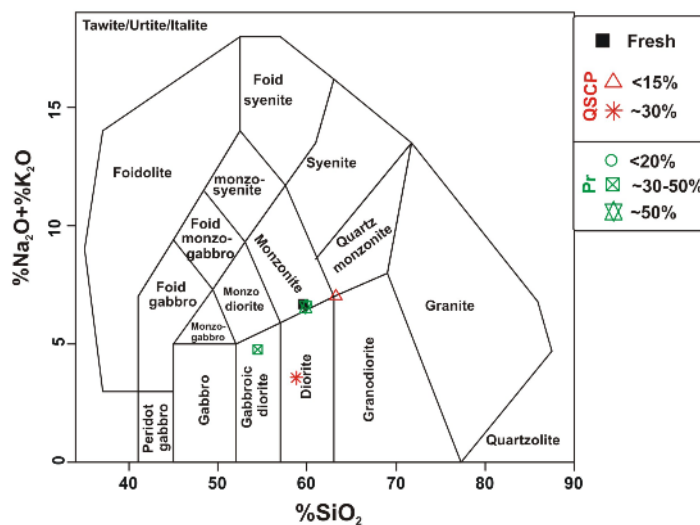
ولی در مورد نمونه‌ی با شدت ۳۰ تا ۵۰ درصد دگرسانی تغییر بسیار نامحسوس و اندک است. سدیم نیز بر خلاف دگرسانی-های پروپلیتیک در شدت کم و زیاد به سنگ افزوده شده، ولی در نمونه‌ی با شدت متوسط کاهش نشان می‌دهد. مقدار  $\text{MgO}$  و  $\text{TFeO}$  در نمونه با شدت کاهش دارد که نشان‌دهنده‌ی تخریب هورنبلند و آزاد شدن این عناصر است، در حالیکه در شدت‌های بالا این دو عنصر به سیستم اضافه شده و کانی‌های مانند کلریت را به مقدار زیاد تشکیل داده‌اند. مقدار  $\text{CaO}$  نیز برخلاف دگرسانی پروپلیتیک فقط در نمونه با شدت متوسط کمی افزوده شده و در دو حالت دیگر به شدت از سیستم خارج شده است. این نشان می‌دهد که کلسیم لازم برای ساخت کلریت، اپیدوت و کلسیت بیشتر از تخریب کانی‌های آهن و



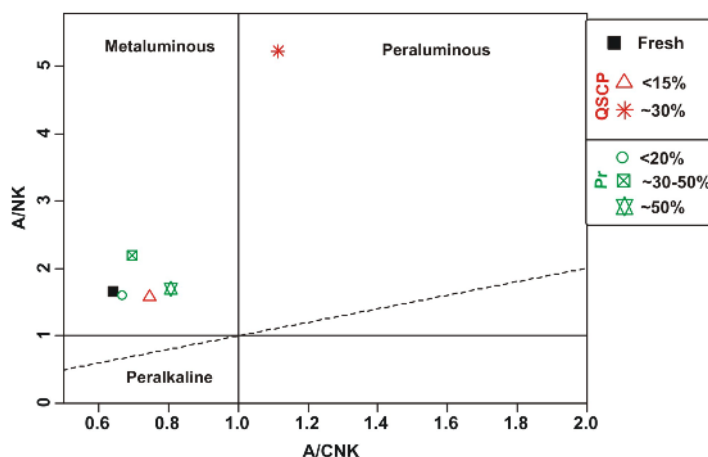
شکل ۱۰ الف و ب - تغییرات اکسیدهای اصلی در شدت‌های مختلف دگرسانی کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت در توده‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری. محور Y معرف میزان تغییرات عناصر نسبت به نمونه‌ی سالم است.



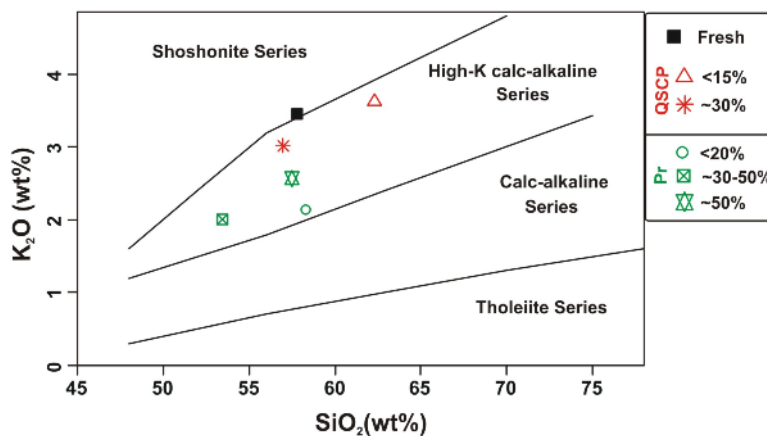
شکل ۱۱ الف تا پ - تغییرات اکسیدهای اصلی در شدت‌های مختلف پروپلیتیک دگرسان در توده‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری. محور Y معرف میزان تغییرات عناصر نسبت به نمونه سالم است.



شکل ۱۲ نامگذاری ژئوشیمیایی توده‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری در شرایط دگرسانی‌های کوارتز- سرسیت-کربنات- پیریت و پروپلیتیک با شدت‌های مختلف. نمودار از میدل‌موست [۲۰].



شکل ۱۳ موقعیت توده‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری در شرایط دگرسانی‌های کوارتز- سرسیت-کربنات- پیریت و پروپلیتیک با شدت‌های مختلف در نمودار شانند [۲۱].



شکل ۱۴ تعیین سری ماگمایی توده‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری در شرایط دگرسانی‌های کوارتز- سرسیت-کربنات- پیریت و پروپلیتیک با شدت‌های مختلف در نمودار پکسریلو و تیلور [۲۲].

## تغییرات عناصر فرعی و خاکی کمیاب در فرایند دگرسانی

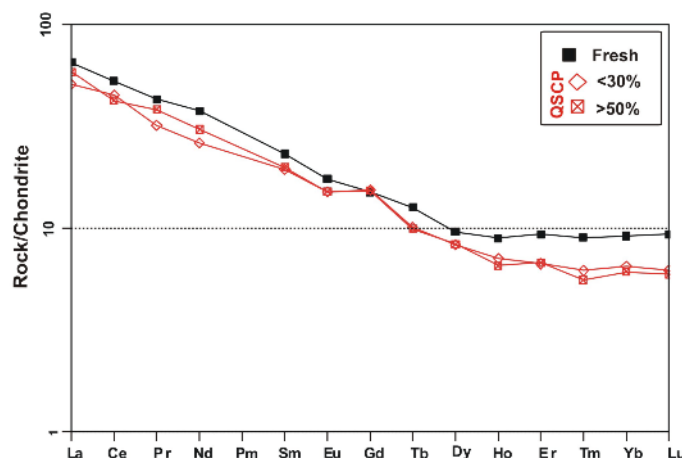
همانند عناصر اصلی، عناصر فرعی و خاکی کمیاب نیز طی فرایند دگرسانی، ممکن است به وسیله‌ی آبگون به سیستم اضافه و یا بر اثر دگرسان شدن برخی کانی‌های اولیه سنگ آزاد شده و خارج شوند. قبلاً گمان می‌کردند که عناصر نادر خاکی حین دگرسانی بی‌تحرك هستند، ولی بررسی‌های اخیر نشان داد که این عناصر نیز شدیداً متحرک‌اند [۲، ۲۳-۲۵]. فلش و هرمن [۲۶] گزارش کردند که اغلب عناصر REE در آبگون‌های قلیایی در غالب همبافت‌های کربنات، سولفات و فلورین انتقال می‌یابند. همچنین تحرك عناصر REE به وسیله‌ی میزان در دسترس بودن یون‌های همبافتی مانند  $\text{CO}_3^{2-}$ ،  $\text{PO}_4^{3-}$ ،  $\text{F}^-$ ،  $\text{SO}_4^{2-}$  و  $\text{Cl}^-$  و pH پایین و نسبت سنگ به آب بالا کنترل می‌شود [۲۷-۲۹]. پیراجنو [۳۰] پیشنهاد کرد که عناصر HREE همبافت‌های پایدارتری تشکیل داده و به مدت طولانی‌تری نسبت به عناصر LREE در آبگون پایدار می‌مانند. بنابراین تمایل دارند که در محصولات نهایی سیستم‌های گرمایی باشند. تعداد ۱۰ نمونه از دو توده‌ی نفوذی مورد بررسی از دگرسانی‌های مختلف و شدت‌های متفاوت برای عناصر فرعی و خاکی کمیاب به روش ICP-MS تجزیه شدند. جدول‌های (۳) و (۴) نتایج تجزیه این عناصر را به تفکیک نوع دگرسانی و شدت آن ارائه می‌دهد.

## توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری

دگرسانی کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت: کاهیدگی در عناصر LREE و HREE در نمونه‌های دگرسان شده نسبت به نمونه‌ی سالم دیده می‌شود که در مورد عناصر HREE مشهودتر است (شکل ۱۵). عنصر Gd تغییر بسیار ناچیز به صورت

افزایشی نشان می‌دهد. تغییرات شدت دگرسانی به جز در عناصر La، Ce، Pr، Nd، Ho، Tm و Yb تاثیر فاحشی بر مقدار عناصر REE نگذاشته است. عناصر La، Pr و Nd با افزایش شدت دگرسانی بر مقدار آنها افزوده شده در حالیکه عناصر دیگر دستخوش تهی‌شدگی شده‌اند. عنصر Eu و نسبت  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  نیز در اثر دگرسانی کاهیده شده که در اثر تخریب پلاژیوکلازهاست (شکل ۱۵). همچنین نسبت LREE به HREE مثل  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  و  $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$  با بالا رفتن شدت دگرسانی افزایش نشان می‌دهد (جدول ۳). بهنجار شدن عناصر فرعی و برخی از REE نسبت به پوسته‌ی قاره‌ای نشان می‌دهد که Rb در شدت کم دگرسانی به وسیله‌ی آبگون به سیستم اضافه شده، در حالیکه در شدت بالا تغییری نسبت به نمونه تازه نشان نمی‌دهد. این بدان علت است که در شدت بالا Rb سرسیت از تخریب هرچه بیشتر فلدسپات‌های پتاسیم تامین شده است. این موضوع با تغییرات پتاسیم نیز همخوانی دارد و حتی در شدت بالا مقدار اضافی K از سیستم آزاد شده است (شکل ۱۶).

عناصر Ba و Sr با افزایش شدت دگرسانی تهی‌شدگی شدیدی نشان می‌دهد که به علت تخریب پلاژیوکلازهاست. تغییرات عناصر Nb و Y طی دگرسانی ناچیز است. عناصر Zr و Hf در اثر دگرسانی و تخریب کانی‌هائی مثل زیرکون تهی شده، ولی شدت دگرسانی تفاوتی در میزان این کاهیدگی نگذاشته است (شکل ۱۶). تغییرات عناصر مس، سرب و روی نیز وابسته به شدت کانی‌سازی و حضور کانی‌های سولفیدی در نمونه بوده است.



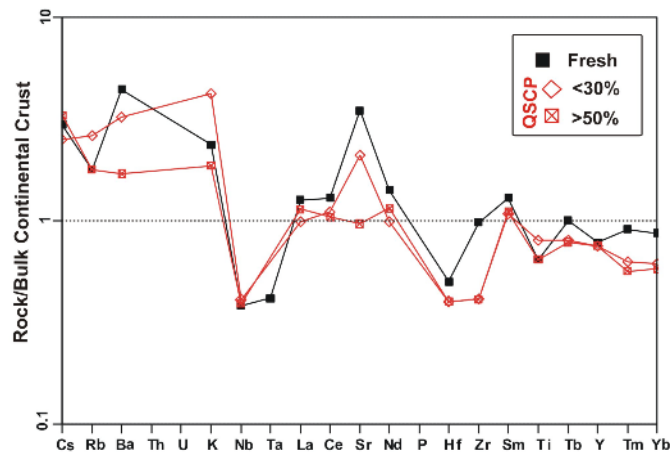
شکل ۱۵ تغییرات عناصر REE بهنجار شده به کندریت [۳۱] در نمونه‌های دگرسان کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت در توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری.

جدول ۳ نتایج تجزیه‌ی عناصر فرعی و خاکی کمیاب توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری تازه و نمونه‌های دگرسان شده‌ی آن به دگرسانی‌های کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت، پروپلیتیک و کربناته با شدت‌های مختلف.

| شدت آلتراسیون        | تازه   | کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت |        | پروپلیتیک |        | کربناته |        |
|----------------------|--------|------------------------------|--------|-----------|--------|---------|--------|
|                      |        | <۳۰                          | >۵۰    | ≈ ۳۰      | >۵۰    | <۲۰     | >۶۰    |
|                      | MA-126 | MA-123                       | MA-172 | MA-162    | MA-176 | MA-169  | MA-136 |
| ppm                  |        |                              |        |           |        |         |        |
| V                    | ۱۷۶    | ۲۱۹                          | ۲۰۶    | ۲۳۸       | ۱۹۲    | ۲۹۸     | ۱۹۷    |
| Cr                   | ۲۵     | ۱۴                           | ۲۸     | ۷         | ۹      | ۱۱      | ۱۰     |
| Co                   | ۱۷     | ۱۳                           | ۱۶     | ۱۶        | ۱۳     | ۱۶      | ۱۴     |
| Ni                   | ۳۰     | ۲۸                           | ۲۷     | ۲۴        | ۲۳     | ۲۳      | ۲۷     |
| Cu                   | ۱۶     | ۲۰                           | ۷۵     | ۴۰        | ۳۸     | ۶۱      | ۲۸۸    |
| Zn                   | ۲۶     | ۴۳۱                          | ۹۶     | ۹۲        | ۸۲     | ۸۳      | ۶۵۰    |
| Cs                   | ۳      | ۲                            | ۳      | ۰٫۶       | ۲      | ۴       | ۲      |
| Ba                   | ۱۱۰٫۹  | ۸۰٫۹                         | ۴۲۵    | ۸۶۸       | ۷۳۷    | ۴۹۵     | ۵۹۹    |
| Rb                   | ۵۷     | ۸۴                           | ۵۷     | ۵۰        | ۶۳     | ۵۱      | ۵۶     |
| Sr                   | ۹۰٫۵   | ۵۴۶                          | ۲۵۱    | ۷۳۸       | ۵۹۴    | ۶۲۸     | ۲۳۹    |
| Y                    | ۱۶     | ۱۵                           | ۱۵     | ۲۰        | ۱۸     | ۱۷      | ۱۵     |
| Zr                   | ۹۸     | ۴۱                           | ۴۱     | ۸۶        | ۶۳     | ۶۳      | ۱۷     |
| Nb                   | ۴      | ۴                            | ۴      | ۶         | ۴      | ۳       | ۴      |
| Hf                   | ۱٫۵    | ۱٫۲                          | ۱٫۲    | ۳٫۱       | ۲٫۱    | ۱٫۸     | ۰٫۵    |
| Pb                   | ۷٫۵    | ۴۷                           | ۵٫۱    | ۹٫۶       | ۱۴     | ۶٫۳     | ۸۸٫۲   |
| Th                   | ۳٫۹    | ۵٫۱                          | ۶٫۶    | ۶٫۳       | ۶      | ۳٫۹     | ۴٫۵    |
| U                    | ۱٫۱    | ۱٫۱                          | ۱٫۵    | ۱٫۹       | ۱٫۷    | ۱       | ۱٫۳    |
| REE                  |        |                              |        |           |        |         |        |
| La                   | ۲۳٫۲   | ۱۵٫۷۴                        | ۱۸٫۲۲  | ۲۲٫۳۴     | ۲۲٫۴۰  | ۱۵٫۸۵   | ۱۹٫۵۰  |
| Ce                   | ۴۵     | ۳۶٫۳۹                        | ۳۴٫۲۸  | ۴۷٫۲۸     | ۴۳٫۲۱  | ۳۴٫۹۶   | ۴۰٫۰۹  |
| Pr                   | ۵٫۳۱   | ۳٫۸۹                         | ۴٫۶۷   | ۵٫۵۴      | ۵٫۳۵   | ۴٫۳۸    | ۴٫۷۸   |
| Nd                   | ۲۰٫۳   | ۱۵٫۷۹                        | ۱۸٫۳۷  | ۲۳٫۶۶     | ۲۲٫۱۲  | ۱۷٫۳۲   | ۱۹٫۶۴  |
| Sm                   | ۴٫۰۷   | ۳٫۷۹                         | ۳٫۸۸   | ۵٫۱۵      | ۴٫۷۸   | ۴٫۰۹    | ۴٫۲۶   |
| Eu                   | ۱٫۰۸   | ۱٫۱۱                         | ۱٫۱۱   | ۱٫۶۵      | ۱٫۳۸   | ۱٫۱۷    | ۱٫۲۲   |
| Gd                   | ۳٫۵۱   | ۳٫۹۸                         | ۳٫۹۶   | ۵٫۲۰      | ۴٫۸۱   | ۴٫۴۵    | ۴٫۲۵   |
| Tb                   | ۰٫۵۸   | ۰٫۴۸                         | ۰٫۴۷   | ۰٫۶۶      | ۰٫۵۷   | ۰٫۵۶    | ۰٫۵۶   |
| Dy                   | ۲٫۵۶   | ۲٫۶۶                         | ۲٫۶۸   | ۳٫۵۲      | ۳٫۲۱   | ۳٫۳۵    | ۲٫۸۹   |
| Ho                   | ۰٫۵۶   | ۰٫۵۱                         | ۰٫۴۷   | ۰٫۷۴      | ۰٫۶۷   | ۰٫۶۴    | ۰٫۵۱   |
| Er                   | ۱٫۶۶   | ۱٫۴۰                         | ۱٫۴۲   | ۲٫۱۵      | ۲٫۱۰   | ۱٫۸۵    | ۱٫۵۶   |
| Tm                   | ۰٫۲۳   | ۰٫۲۰                         | ۰٫۱۸   | ۰٫۲۹      | ۰٫۲۷   | ۰٫۲۷    | ۰٫۲۰   |
| Yb                   | ۱٫۷۱   | ۱٫۳۵                         | ۱٫۲۷   | ۲         | ۱٫۷۴   | ۱٫۸۹    | ۱٫۲۵   |
| Lu                   | ۰٫۲۹   | ۰٫۲۰                         | ۰٫۱۹   | ۰٫۲۹      | ۰٫۲۶   | ۰٫۲۹    | ۰٫۱۵   |
| ΣREE                 | ۱۰۹٫۲۳ | ۸۷٫۴۹                        | ۹۱٫۱۷  | ۱۲۰٫۴۷    | ۱۱۲٫۸۷ | ۹۱٫۰۷   | ۱۰۰٫۸۶ |
| Eu/Eu*               | ۰٫۹۳   | ۰٫۸۷                         | ۰٫۸۷   | ۰٫۹۷      | ۰٫۸۸   | ۰٫۸۴    | ۰٫۸۸   |
| (La/Yb) <sub>N</sub> | ۷٫۱۳   | ۷٫۸۶                         | ۹٫۶۷   | ۷٫۵۳      | ۸٫۶۸   | ۵٫۶۵    | ۱۰٫۵۲  |
| (Ce/Yb) <sub>N</sub> | ۵٫۷۸   | ۶٫۹۷                         | ۶٫۹۸   | ۶٫۱۱      | ۶٫۴۲   | ۴٫۷۸    | ۸٫۳۰   |

جدول ۴ نتایج تجزیه‌ی عناصر فرعی و خاکی کمیاب توده‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری تازه و نمونه‌های دگرسان شده‌ی آن به دگرسانی‌های کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت و پروپلیتیک با شدت‌های مختلف.

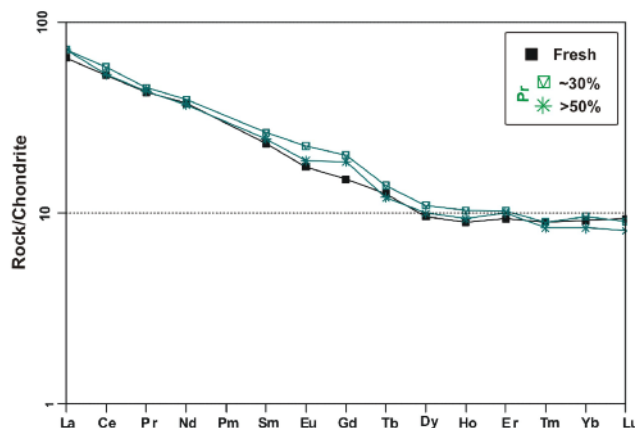
| شدت آلتراسیون        | تازه  | کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت |        | پروپلیتیک |        |
|----------------------|-------|------------------------------|--------|-----------|--------|
|                      |       | <۱۵                          | ≈ ۳۰   | ۵۰-۳۰     | ≈ ۵۰   |
|                      | MA-95 | MA-134                       | MA-186 | MA-196    | MA-147 |
| <b>ppm</b>           |       |                              |        |           |        |
| V                    | ۲۱۹   | ۱۹۹                          | ۱۹۱    | ۳۶۴       | ۲۱۲    |
| Cr                   | ۲۹    | ۱۶                           | ۱۷     | ۱۳        | ۱۲     |
| Co                   | ۱۸    | ۱۶                           | ۱۴     | ۲۷        | ۱۶     |
| Ni                   | ۳۲    | ۲۳                           | ۲۶     | ۳۰        | ۲۸     |
| Cu                   | ۲۶    | ۲۶۰                          | ۳۷     | ۵۴        | ۴۴     |
| Zn                   | ۲۵۲   | ۱۶۴                          | ۷۹     | ۱۲۱       | ۱۶۷    |
| Cs                   | ۲٫۶   | ۳                            | ۲      | ۵         | ۳      |
| Ba                   | ۱۱۰٫۴ | ۵۷۳                          | ۸۵۴    | ۴۴۸       | ۷۸۸    |
| Rb                   | ۵۶    | ۱۰٫۵                         | ۵۲     | ۴۹        | ۶۸     |
| Sr                   | ۸۷۵   | ۷۲۲                          | ۱۴۳    | ۷۰٫۴      | ۷۳۷    |
| Y                    | ۱۷    | ۱۶                           | ۱۷     | ۲۲        | ۱۹     |
| Zr                   | ۹۵    | ۲۷                           | ۷۲     | ۴۱        | ۳۸     |
| Nb                   | ۴     | ۵                            | ۴      | ۳         | ۵      |
| Hf                   | ۰٫۸   | ۱                            | ۲٫۱    | ۱٫۴       | ۱٫۱    |
| Pb                   | ۷۶٫۳  | ۲۸٫۶                         | ۱۲٫۸   | ۷٫۶       | ۳۷٫۸   |
| Th                   | ۸٫۲   | ۱۱٫۳                         | ۴٫۷    | ۲٫۶       | ۵٫۱    |
| U                    | ۱٫۸   | ۳                            | ۱٫۲    | ۰٫۵       | ۱٫۴    |
| <b>REE</b>           |       |                              |        |           |        |
| La                   | ۲۶٫۱  | ۲۴٫۱۸                        | ۱۸٫۸۲  | ۱۴٫۲۷     | ۲۰٫۶۵  |
| Ce                   | ۵۶٫۶  | ۴۸٫۸۸                        | ۳۹     | ۳۱٫۶۲     | ۴۱٫۴۷  |
| Pr                   | ۶۳٫۵  | ۵۵٫۵                         | ۴۸     | ۴٫۱۲      | ۴٫۹۳   |
| Nd                   | ۲۷٫۱  | ۲۰٫۸۷                        | ۲۰٫۶۲  | ۱۹٫۲۵     | ۲۱٫۸۸  |
| Sm                   | ۵٫۵۷  | ۴٫۶۷                         | ۴٫۲۱   | ۴٫۶۳      | ۴٫۵۷   |
| Eu                   | ۱٫۳۱  | ۱٫۳۲                         | ۱٫۳۷   | ۱٫۳۹      | ۱٫۴۴   |
| Gd                   | ۴٫۵۹  | ۴٫۶۵                         | ۴٫۳۵   | ۵٫۰۶      | ۴٫۶۸   |
| Tb                   | ۰٫۷۲  | ۰٫۵۷                         | ۰٫۵۸   | ۰٫۶۳      | ۰٫۶۱   |
| Dy                   | ۳٫۳۷  | ۳٫۲۳                         | ۳٫۱۵   | ۴٫۰۸      | ۳٫۳۹   |
| Ho                   | ۰٫۷۰  | ۰٫۶۰                         | ۰٫۶۳   | ۰٫۷۵      | ۰٫۶۸   |
| Er                   | ۱٫۸۵  | ۱٫۷۰                         | ۱٫۷۵   | ۲٫۳۰      | ۱٫۹۵   |
| Tm                   | ۰٫۲۹  | ۰٫۲۵                         | ۰٫۲۵   | ۰٫۳۳      | ۰٫۲۷   |
| Yb                   | ۱٫۸۸  | ۱٫۶۶                         | ۱٫۷۲   | ۲٫۱۶      | ۱٫۷۹   |
| Lu                   | ۰٫۲۷  | ۰٫۲۵                         | ۰٫۲۸   | ۰٫۳۰      | ۰٫۲۷   |
| ΣREE                 | ۱۳۶٫۷ | ۱۱۸٫۲۸                       | ۱۰۱٫۵۳ | ۹۰٫۸۹     | ۱۰۸٫۵۸ |
| Eu/Eu*               | ۰٫۷۹  | ۰٫۸۸                         | ۰٫۹۸   | ۰٫۸۸      | ۰٫۹۵   |
| (La/Yb) <sub>N</sub> | ۹٫۳۶  | ۹٫۸۲                         | ۷٫۳۸   | ۴٫۴۵      | ۷٫۷۸   |
| (Ce/Yb) <sub>N</sub> | ۷٫۷۸  | ۷٫۶۲                         | ۵٫۸۷   | ۳٫۷۹      | ۵٫۹۹   |



شکل ۱۶ تغییرات عناصر فرعی و برخی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده به پوسته‌ی قاره‌ای [۳۲] در نمونه‌های دگرسانی کوارتز-سرسیت-کربنات-پیریت در توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری.

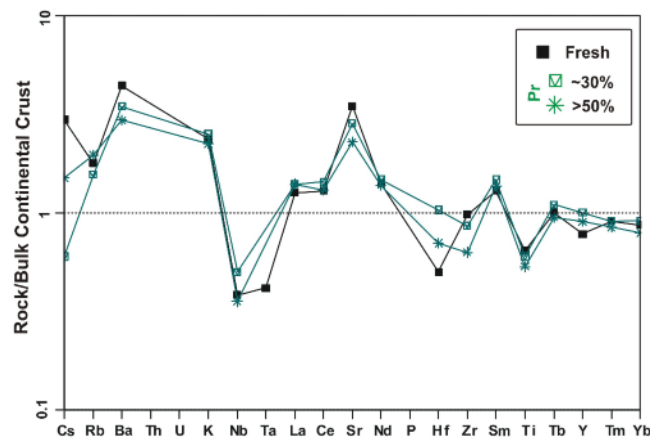
موضوع عکس تغییرات پتاسیم است (شکل ۱۸). عناصر Ba و Sr با افزایش شدت دگرسانی تهی‌شدگی شدیدی نشان می‌دهد که به علت تخریب پلاژیوکلازهاست. عنصر Cs نیز در نمونه‌های دگرسان تهی‌شدگی دارد که با افزایش شدت میزان کاهیدگی کمتر شده است. عنصر Nb در شدت کم به وسیله‌ی گرماب به سنگ افزوده شده ولی در شدت بالا کمی کاهیدگی نشان می‌دهد. همچنین عنصر Y غنی‌شدگی دارد که این غنی‌شدگی در شدت کم دگرسانی بیشتر بوده است. عناصر Zr و Hf رابطه‌ی عکس با یکدیگر نشان می‌دهند، به طوری که Zr با افزایش شدت دگرسانی به شدت کاسته شده که می‌تواند در اثر تخریب زیرکون باشد، در حالیکه Hf غنی‌شدگی دارد که در شدت کم دگرسانی بیشتر است. ممکن است Hf در غالب دیگر کانی‌ها قرار گرفته باشد (شکل ۱۸).

دگرسانی پروپلیتیک: غنی‌شدگی اندکی در عناصر LREE و HREE در نمونه‌های دگرسان شده نسبت به نمونه‌ی سالم دیده می‌شود (شکل ۱۷). این غنی‌شدگی در نمونه، شدت کم دگرسانی پروپلیتیک به خصوص در عناصر Sm، Eu و Gd مشهودتر است. در نمونه‌ی با شدت بیش از ۵۰ درصد دگرسانی مقدار عناصر REE تقریباً برابر با نمونه‌ی سالم شده و در برخی موارد نیز حتی تهی‌شدگی مشاهده می‌شود مانند عناصر Tm، Lu و Yb (شکل ۱۷). همچنین نسبت LREE به HREE مثل  $(La/Yb)_N$  و  $(Ce/Yb)_N$  با بالا رفتن شدت دگرسانی افزایش نشان می‌دهد (جدول ۳). بهنجار شدن عناصر فرعی و برخی از REE نسبت به پوسته‌ی قاره‌ای نشان می‌دهد که Rb در شدت کم دگرسانی از سیستم خارج شده، در حالیکه در شدت بالا مقداری به وسیله‌ی محلول اضافه شده است. این



شکل ۱۷ تغییرات عناصر REE بهنجار شده به کندریت [۳۱] در نمونه‌های دگرسانی پروپلیتیک در توده هورنبلند مونزونیت پورفیری.

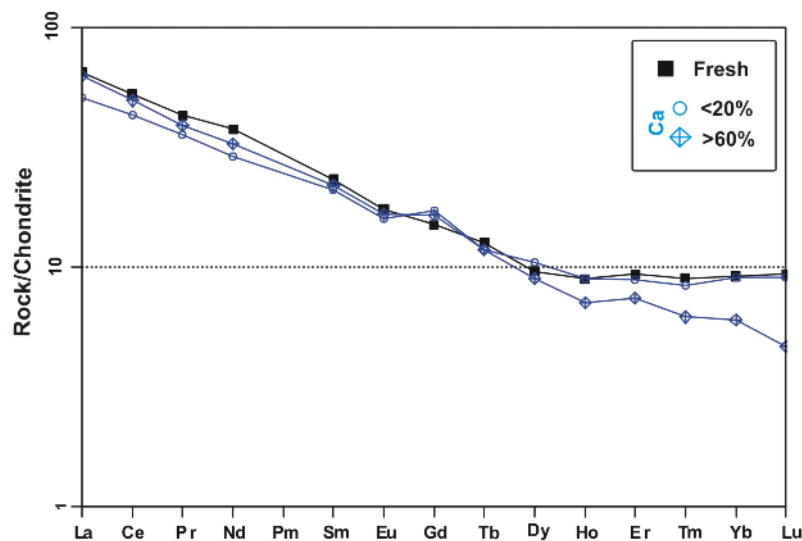




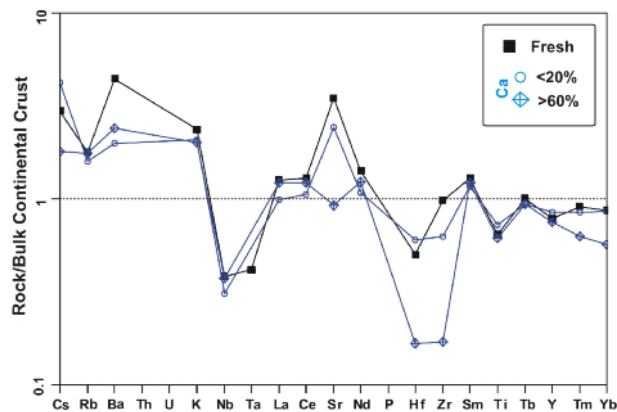
شکل ۱۸ تغییرات عناصر فرعی و برخی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده به پوسته قاره‌ای [۳۲] در نمونه‌های دگرسانی پروپلیتیک در توده هورنبلند مونزونیت پورفیری.

دستخوش کاهیدگی اندکی شده‌اند که به تخریب فلدسپات‌های پتاسیم برمی‌گردد (شکل ۲۰). عناصر Ba و Sr نیز همانند دگرسانی‌های دیگر با افزایش شدت دگرسانی تهی‌شدگی شدیدی نشان می‌دهند که به علت تخریب پلاژیوکلازهاست. لازم به یادآوری است که تهی‌شدگی Ba در شدت بالای دگرسانی کمتر است. عنصر Nb نیز طی دگرسانی تهی‌شده که در شدت کم دگرسانی میزان آن بیشتر است. همچنین عنصر Y در شدت کم دگرسانی غنی‌شدگی اندکی دارد ولی در شدت بیش از ۶۰ درصد تهی‌شدگی نشان می‌دهد. عناصر Zr و Hf با افزایش شدت دگرسانی به شدت کاسته شده‌اند (شکل ۲۰).

دگرسانی کربناتی: تهی‌شدگی اندکی در عناصر LREE و HREE در نمونه‌های دگرسان شده نسبت به نمونه‌ی سالم بجز عنصر Gd دیده می‌شود (شکل ۱۹). تهی‌شدگی عناصر LREE در نمونه با شدت کم دگرسانی کربناتی بیشتر است، در حالیکه با افزایش شدت دگرسانی کاهیدگی عناصر HREE بسیار مشهودتر است. به طوریکه تغییر عناصر HREE در شدت کم دگرسانی با نمونه‌ی سالم بسیار ناچیز است (شکل ۱۹). همچنین نسبت LREE به HREE مثل  $(La/Yb)_N$  و  $(Ce/Yb)_N$  با بالا رفتن شدت دگرسانی افزایش نشان می‌دهد (جدول ۳). بهنجار شدن عناصر فرعی و برخی از REE نسبت به پوسته‌ی قاره‌ای نشان می‌دهد که Rb و K ضمن دگرسانی



شکل ۱۹ تغییرات عناصر REE بهنجار شده به کندریت [۳۱] در نمونه‌های دگرسانی کربناتی در توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری.

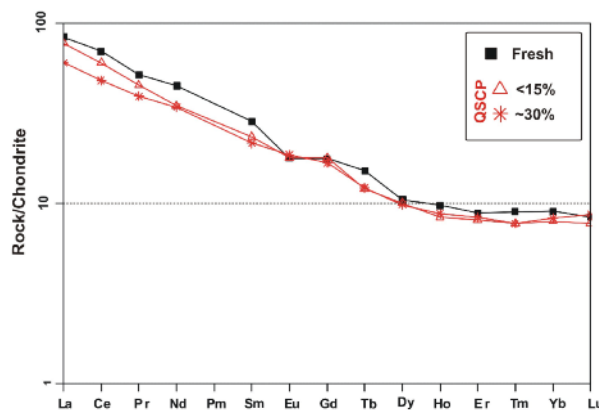


شکل ۲۰ تغییرات عناصر فرعی و برخی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده به پوسته‌ی قاره‌ای [۳۲] در نمونه‌های دگرسانی کربناتی در توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری.

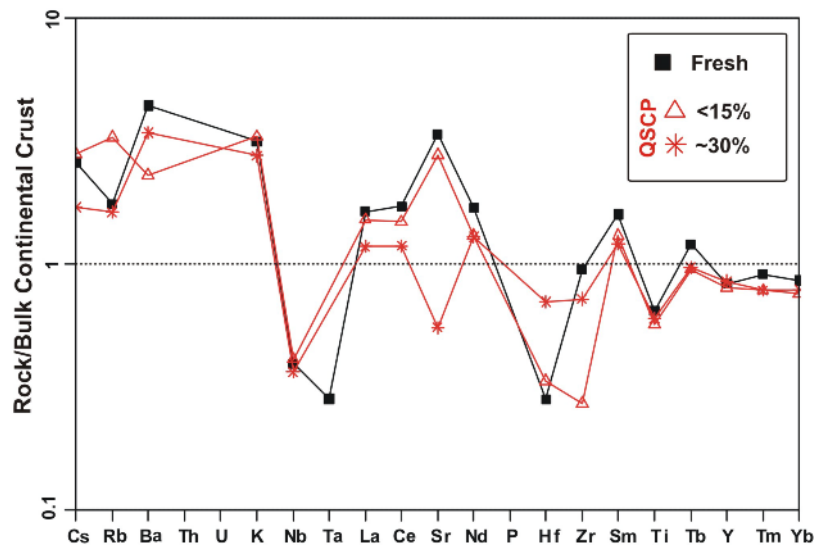
نسبت به نمونه‌ی تازه نشان نمی‌دهد. این بدان علت است که در شدت بالا Rb سرسیت از تخریب هرچه بیشتر فلدسپات‌های پتاسیم تامین شده است. این موضوع با تغییرات پتاسیم نیز همخوانی دارد و حتی در شدت بالا مقدار اضافی K از سیستم آزاد شده است (شکل ۲۲). عناصر Ba و Sr با افزایش شدت دگرسانی تهی‌شدگی شدیدی نشان می‌دهد که به علت تخریب پلاژیوکلازهاست. لازم به یادآوری است که کاهشگی Ba در شدت بالای دگرسانی کمتر است. تغییرات عناصر Nb و Y در طی دگرسانی ناچیز بوده است. عنصر Zr در اثر دگرسانی دستخوش تهی‌شدگی شده که این تهی‌شدگی در شدت بالای دگرسان شدن کمتر است. تخریب زیرکون می‌تواند عامل این کاهشگی باشد. این در حالیست که عنصر Hf با افزایش شدت دگرسانی به وسیله‌ی آبگون به سیستم اضافه شده است (شکل ۲۲). تغییرات عناصر مس، سرب و روی نیز وابسته به شدت کانی‌سازی و حضور کانی‌های سولفیدی در نمونه بوده است.

#### توده‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری

دگرسانی کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت: کاهشگی در اکثر عناصر LREE و HREE در نمونه‌های دگرسان شده نسبت به نمونه‌ی سالم دیده می‌شود که در مورد عناصر LREE مشهودتر است (شکل ۲۱). این کاهشگی در مورد عناصر La, Ce, Pr و Sm با افزایش شدت دگرسانی افزوده شده است، در حالیکه در عناصر دیگر بالا رفتن شدت دگرسانی تاثیر چندانی در تغییر آنها نداشته است. عناصر Gd و Eu تغییر بسیار ناچیزی نسبت به نمونه‌ی سالم طی فرآیند دگرسانی نشان می‌دهند (شکل ۲۱). حتی نسبت  $Eu/Eu^*$  با افزایش شدت دگرسانی کمی افزوده شده است. همچنین نسبت LREE به HREE مثل  $(La/Yb)_N$  و  $(Ce/Yb)_N$  با بالا رفتن شدت دگرسانی بیشتر دستخوش شده است (جدول ۴). بهنجار شدن عناصر فرعی و برخی از REE نسبت به پوسته‌ی قاره‌ای نشان می‌دهد که Rb در شدت کم دگرسانی به وسیله‌ی آبگون به سیستم اضافه شده، در حالیکه در شدت بالا تغییر چندانی



شکل ۲۱ تغییرات عناصر REE بهنجار شده به کندریت [۳۱] در نمونه‌های دگرسانی کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت در توده‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری.



شکل ۲۲ تغییرات عناصر فرعی و برخی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده به پوسته‌ی قاره‌ای [۳۲] در نمونه‌های دگرسانی کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت در توده هورنبلند دیوریت پورفیری.

تغییر چندانی نشان نمی‌دهد. عنصر Cs نیز در نمونه‌های دگرسان غنی‌شدگی دارد که با افزایش میزان افزودگی کمتر شده است. عنصر Nb نیز تهی‌شدگی نشان می‌دهد که در شدت کم دگرسانی مشهودتر است. همچنین عنصر Y غنی-شدگی دارد که این غنی‌شدگی در شدت کم دگرسانی بیشتر بوده است. عناصر Zr و Hf رابطه عکس با یکدیگر نشان می‌دهند، به طوری که Zr با افزایش شدت دگرسانی به شدت کاسته شده که این می‌تواند در اثر تخریب زیرکون باشد، در حالیکه Hf غنی‌شدگی دارد که در شدت کم دگرسانی بیشتر است. ممکن است Hf در غالب دیگر کانی‌ها قرار گرفته باشد. لازم به یادآوری است که افزایش شدت دگرسانی تغییر چندانی در کاهیدگی Zr نگذاشته است (شکل ۲۴).

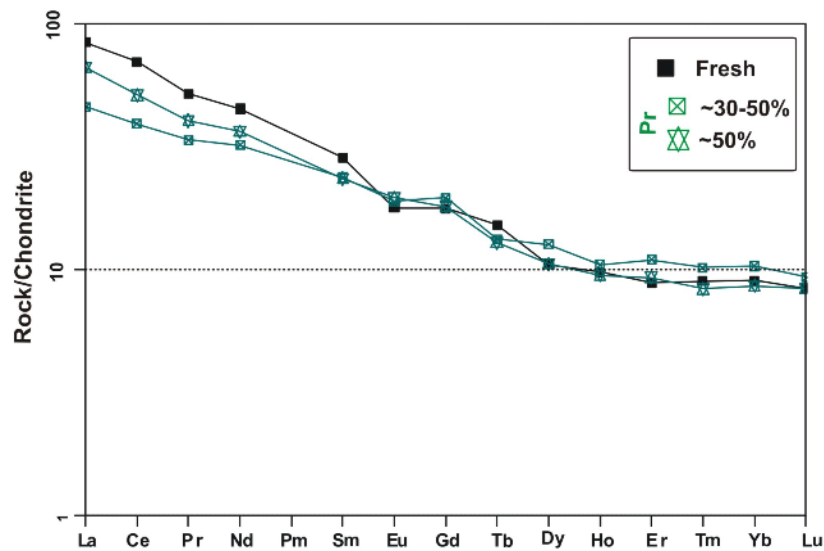
#### برداشت

کانی‌سازی مس- طلای پورفیری گستره‌ی پی‌جوئی همد به یک رشته از توده‌های نیمه عمیق حدواسط آهکی - قلیایی پورفیری در حد مونزونیت تا دیوریت است که تحت تاثیر دگرسانی گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. زون‌های دگرسان شامل کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت، کوارتز- کربنات- پیریت، کربنات- پیریت، سیلیسی- پروپلیتیک، پروپلیتیک و آرژلیک- سیلیسی و کربناتی در سطح است که از این میان زون‌های کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت، پروپلیتیک و کربناتی از گسترش بیشتری برخوردارند.

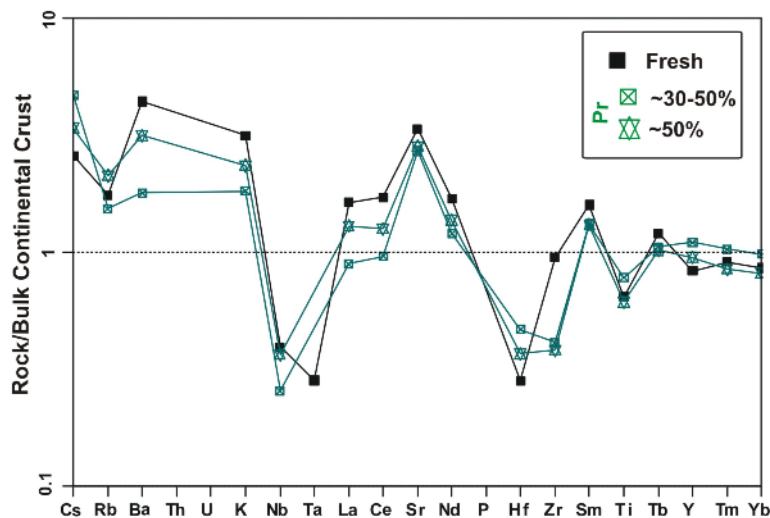
دگرسانی پروپلیتیک: تهی‌شدگی در عناصر LREE و نیز عنصر Tb در نمونه‌های دگرسان شده نسبت به نمونه‌ی سالم دیده می‌شود که میزان آن در نمونه با شدت کم دگرسانی بیشتر بوده و از سمت La به عناصر MREE، تفاوت کاهیدگی در شدت کم و بالای دگرسانی به تدریج کمتر شده، به نحوی که در عناصر Sm و Tb با افزایش شدت دگرسانی تغییری در میزان تهی‌شدگی دیده نمی‌شود (شکل ۲۳). عناصر Eu و Gd و نیز عناصر HREE غنی‌شدگی اندکی نسبت به نمونه‌ی سالم نشان می‌دهند که این غنی‌شدگی در شدت کم دگرسانی پروپلیتیک بیشتر است. در برخی عناصر مانند Dy، Ho و Lu، تغییر چندانی در شدت بالای دگرسان شدن نسبت به نمونه‌ی تازه دیده نمی‌شود (شکل ۲۳). همچنین نسبت LREE به HREE مثل  $(La/Yb)_N$  و  $(Ce/Yb)_N$  با بالا رفتن شدت دگرسانی افزایش نشان می‌دهد (جدول ۴). بهنجار شدن عناصر فرعی و برخی از REE نسبت به پوسته‌ی قاره‌ای نشان می‌دهد که Rb در شدت کم دگرسانی از سیستم خارج شده، در حالیکه در شدت بالا مقداری به وسیله‌ی محلول اضافه شده است. پتاسیم نیز دستخوش تهی‌شدگی شده که میزان آن نیز در شدت بالا کمتر است. این به علت تخریب کانی‌های پتاسیم‌دار از جمله فلدسپات پتاسیم است (شکل ۲۴). عناصر Sr و Ba کاهیده شده‌اند که به علت تخریب پلاژیوکلازهاست. کاهیدگی آنها از نظم برخوردار نبوده، به طوری که باریم در شدت کم آتره شدن بیشتر کاهیده شده و استرانسیوم با افزایش شدت دگرسانی

موارد کنترل می‌کند. همچنین نوع واحد سنگی بررسی شده در میزان تغییرات عناصر تاثیر دارد. به نحویکه مقایسه‌ی تغییرات ژئوشیمیایی توده‌ی مونزونیتی با توده‌ی دیوریتی در دگرسانی-های مشابه اختلافاتی را خصوصاً در عناصر فرعی و خاکی کمیاب نشان می‌دهد مانند غنی‌شدگی اندک عناصر REE در اثر دگرسانی پروپلیتیک بر توده‌ی هورنبلند مونزونیت پورفیری، در حالیکه در همین دگرسانی در نمونه‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری عناصر LREE کاهش یافته‌اند و یا کاهش‌دهی عنصر Hf در دگرسانی کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت در توده مونزونیتی و حالت عکس آن در توده دیوریتی.

مقایسه‌ی ژئوشیمی دو توده‌ی نفوذی نسبتاً سالم با ترکیب مونزونیت و دیوریت با نمونه‌های دگرسان شده (دگرسانی‌های کوارتز- سرسیت- کربنات- پیریت، پروپلیتیک و کربنات) آنها نشان می‌دهد که همه‌ی عناصر اصلی، فرعی و خاکی کمیاب طی فرایند دگرسانی دستخوش تغییرات می‌شوند که دامنه‌ی تغییر در برخی کم (مانند  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) و در برخی عناصر (مثل  $\text{Eu}$  و  $\text{Y}$ ,  $\text{Gd}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Hf}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TFeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) و اغلب عناصر REE قابل توجه است. شدت دگرسان شدن سنگ علاوه بر نوع دگرسانی، مقدار تغییرات عناصر را در اکثر



شکل ۲۳ تغییرات عناصر REE بهنجار شده به کندریت [۳۱] در نمونه‌های دگرسانی پروپلیتیک در توده هورنبلند دیوریت پورفیری.



شکل ۲۴ تغییرات عناصر فرعی و برخی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده به پوسته قاره‌ای [۳۲] در نمونه‌های دگرسانی پروپلیتیک در توده‌ی هورنبلند دیوریت پورفیری.

area, Japan”, *Journal of Geochemical Exploration* 98 (2008) 65-79.

[4] Penczak R.S., “*Geochemistry of alteration around some high-grade zones and geochemical characteristics of altered rocks at the Red Lake mine*”, (1999) 86p.

[5] Rouwet D., Bellomo S., Brusca L., Inguaggiato S., Jutzeler M., Mora R., Mazot A., Bernard, R., Cassidy M., Taran Y., “*Major and trace elements geochemistry of El Chichon volcano- hydrothermal system (Chiapas, Mexico) in 2006- 2007: implications for future geochemical monitoring*”, *Geofisica Internacional* 48 (2009) 55-72.

[6] Lottermoser B.G., “*Rare earth element and heavy metal behaviour associated with the epithermal gold deposit on Lihir Island, Papua New Guinea*”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 40 (1990) 269-289.

[7] Hopf S., “*Behaviour of rare earth elements in geothermal systems of New Zealand*”, *Journal of Geochemical Exploration* 47 (1993) 333-357.

[8] Arribas A.J., Cunningham C.G., Rytuba J.J., Rye R.O., Kelly W.C., Podwisocki M.H., McKee E.H., Tosdal R.M., “*Geology, geochronology, fluid inclusions, and isotope geochemistry of the Rodalquilar gold alunite deposit, Spain*”, *Economic Geology* 90 (1995) 795-822.

[9] Fulignati P., Sbrana A., “*Presence of native gold and tellurium in the active high-sulfidation hydrothermal system of the La Fossa volcano, Vulcano, Italy*”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 86 (1998) 187-198.

[10] Terakado Y., Fujitani T., “*Behaviour of the rare earth elements and other trace elements during interactions between acidic hydrothermal solutions and silicic volcanic rocks*”, southwestern Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62 (1998) 1903-1917.

[11] Chang-bock I., Sang-Mo K., Ho-Wan Ch., Tetsuichi T., “*The geochemical behaviour of altered igneous rocks in the Tertiary Gampo Basin, Kyongsang Province, South Korea*”, *Geochemical Journal* 36 (2002) 391-407.

[12] Taylor R.P., Fryer B.J., “*Multi-stage hydrothermal alteration in porphyry copper systems in northern Turkey: the temporal interplay of potassic, propylitic and phyllic fluids*”, *Canadian Journal of Earth Science* 17 (1980) 901-926.

[13] Taylor R.P., Fryer B.J., “*Rare earth element geochemistry as an aid to interpreting hydrothermal ore deposits*”, In: Evans, A.M. (Ed.), *Metallization Associated with Acid Magmatism*. John Wiley, New York (1982) pp. 57-365.

این بررسی نشان می‌دهد که در انتخاب نمونه‌ی مناسب برای تجزیه‌ی شیمیایی به منظور بررسی‌های سنگ‌شناسی، تعیین موقعیت زمین‌ساختی، تعیین نوع کانی باقیمانده در خاستگاه و نیز بررسی‌های ایزوتوپی ناپایدار Rb-Sr و Sm-Nd به منظور تعیین خاستگاه توده‌ها در کانسارهای ماگمایی- گرمایی که آبگون‌کننده‌ها ماهیت اولیه‌ی سنگ‌ها را تغییر داده است، می‌بایست دقت بسیار زیادی شود. زیرا بررسی نمونه‌های دگرسان حتی با دگرسانی کمتر از ۲۰ درصد می‌تواند تفسیرهای متفاوتی را ایجاد کنند. از نظر نامگذاری سنگ براساس رده-بندی شیمیایی، محیط نقش بستن نمونه دگرسان با نمونه‌ی سالم متفاوت است. تعیین سری ماگمایی توده‌ها و رده‌بندی آنها از نظر شاخص شاند به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. الگوی بهنجار شدن عناصر REE و عناصر فرعی برپایه‌ی شدت دگرسانی تفاوت نشان داده و می‌تواند تفسیر عمق تشکیل توده‌ی و سازوکار ایجاد آن را متاثر کند. همچنین از آنجاکه عناصری مانند Rb و Sr به شدت در اثر دگرسان شدن فلدسپات‌ها تغییر می‌کنند، بررسی‌های ایزوتوپی روی نمونه‌ی دگرسان می‌تواند نتیجه‌ی کاملاً متفاوت و یا حتی عکس واقعیت را از نظر خاستگاه توده‌های نفوذی نشان دهد.

#### قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح “پژوهشی مطالعه‌ی تغییرات عناصر اصلی، جزئی و کمیاب در زون‌های دگرسان در کانی‌سازی مس پورفیری منطقه همدان” است که اعتبار آن از محل طرح پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد شماره ۹۵۹/پ مورخ ۱۳۸۸/۱۲/۸ تامین شده است.

#### مراجع

- [۱] ملک‌زاده شفاوردی آ.، “زمین‌شناسی، کانی‌سازی، آلتراسیون، ژئوشیمی، تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی، میکروترموتری، مطالعات ایزوتوپی و تعیین منشأ کانی‌سازی مناطق اکتشافی ماهرآباد و خویبک، استان خراسان جنوبی”، رساله دکتری (Ph.D) زمین-شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۸) ۶۰۰ صفحه.
- [2] Parsapoor A., Khalili M., Mackizadeh M.A., “*The behavior of trace and rare earth elements (REE) during hydrothermal alteration in the Rangan area (central Iran)*”, *Journal of Asian Earth Sciences*, 34 (2009) 123-134.
- [3] Shikazono M., Ogawa Y., Utada M., Ishiyama D., Mizuta T., Ishikawa N., Kubota Y., “*Geochemical behavior of rare earth elements in hydrothermally altered rocks of the Kuroko mining*

- alteration: evidence from southeast England", Earth Planetary Science Letter 49 (1980) 149-165.
- [24] Michard A., Albarede F., "The REE content of some hydrothermal fluids", Chemical Geology 55 (1986) 51-60.
- [25] Palacios C.M., Hein U.F., Dulski P., "Behaviour of rare earth elements during hydrothermal alteration at the Buena Esperanza copper-silver deposit, northern Chile", Earth Planetary Science Letter 80 (1986) 208-216.
- [26] Felsche J., Herrmann A.G., "Yttrium and lanthanides", In: Wedepohl, K. (Ed.), Handbook of Geochemistry, vol. 11/5. Springer-Verlag, New York (1978) pp. 57-71.
- [27] Michard A., "Rare earth element systematics in hydrothermal fluid". Geochimica et Cosmochimica Acta 53 (1989) 745-750.
- [28] Wood S.A., "The aqueous geochemistry of the rare earth elements and yttrium: theoretical prediction in hydrothermal solutions to 350 °C at saturation of water vapour pressure", Chemical Geology 88 (1990) 99-125.
- [29] Haas J.R., Shock E.L., Sassani D.C., "Rare earth elements in hydrothermal systems: estimates of standard partial modal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures", Geochimica et Cosmochimica Acta 59 (1995) 4329-4350.
- [30] Pirajno F., "Hydrothermal Mineral Deposits", John Wiley and Sons, Sydney (1992) 709 p.
- [31] Sun S-s., McDonough W.F., "Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implication for mantle compositions and processes", In: A.D. Saunders and M.J. Norry (eds). Magmatic in the ocean basins. Geological Society. London. Special Publication 42 (1989), 313- 345.
- [32] Taylor S.R. McLennan S.M. "The Continental Crust; Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks", Blackwell, Oxford. (1985) 312 p.
- [14] Taylor R.P., Fryer B.J., "Rare earth element lithogeochemistry of granitoid mineral deposits", Bulletin of Canadian Institute Mine Metallurgy 76 (1983) 74-84.
- [15] Maclean W.H., "Mass change calculations in altered rock series", Mineralium Deposita 25 (1990) 44-49.
- [16] Maclean W.H., Kranidiotis P., "Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration, Pheleps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec", Economic Geology 82 (1987) 951-962.
- [17] Olade M.A., Fletcher W.K., "Trace element geochemistry of the Highland vally and Guichon creek batholith in relation to porphyry copper mineralization", Economic Geology 71 (1976) 733-748.
- [۱۸] وثیق ح.، سهیلی م.، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سرچاه‌شور (برگه ۷۷۵۴)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۵۴).
- [۱۹] ملک‌زاده ا.، کریم‌پور م. ح.، "سن‌سنجی زیرکون به روش اورانیوم-سرب در منطقه اکتشافی مس- طلا پورفیری ماهرآباد: شاهدهی بر دوره متالوژنیک اتوسن میانی ذخایر پورفیری در شرق ایران"، مجله زمین‌شناسی اقتصادی ایران (در حال چاپ).
- [20] Middlemost E.A.K., "Magmas and magmatic rocks", Longman Pub. Company, (1985) 221- 226.
- [21] Shand S.J., "Eruptive rocks. Their genesis, composition, classification and their relation to ore-deposits", 1969 (facs. of 3rd ed. 1947). Hafner, New York. 488 pp (1947).
- [22] Peccerillo A., Taylor S. R., "Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey", Contributions to Mineralogy and Petrology 58 (1976), 63-81.
- [23] Alderton D.H.M., Pearce J.A., Potts P.J., "Rare earth element mobility during granite