

کاربرد عناصر ردیاب غیر متحرک Co و Th در بررسی سنگ‌های آتشفشانی دگرگون شده و هوازده: شواهدی از سنگ‌های کرتاسه منطقه سقز - پیرانشهر

محمد سالار ترخانی^(۱*)، منصور وثوقی عابدینی^۲، فریبرز مسعودی^۳ و ندا بهاروند^۴

۱. دانش آموخته دکتری، گروه زمین‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

۲. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۳. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۴. کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سقز

تاریخ دریافت: ۸۸/۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۸۹/۲/۸

چکیده

دیرزمانی است که برخی محققین به این نتیجه رسیده‌اند که نمودارهای TAS^۱ در رده‌بندی سنگ‌های آتشفشانی دگرسان، دگرگون و هوازده قابل اتکاء نیستند و در نتیجه از عناصر جایگزین کم تحرک‌تر استفاده نموده‌اند. در همین راستا، در سال‌های اخیر محققان بر اساس نتایج حاصل از مجموعه‌ای از نمونه‌های متعلق به جزایر قوسی ترشیاری - عهد حاضر اقدام به معرفی نموداری جدید بر اساس عناصر غیر متحرک Th و Co به جای پتاسیم و سیلیس نموده‌اند که برای رده‌بندی سنگ‌های دگرگون شده و هوازده مخصوصاً در محیط کمان آتشفشانی بسیار مناسب است. کاربرد عناصر مختلف و به ویژه Co و Th در رده‌بندی سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه در منطقه سقز - پیرانشهر که بخشی از زون سندج - سیرجان می‌باشد، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. این سنگ‌ها دارای ترکیب آندزیت بازالتی و آندزیت بوده و توسط توده‌های نفوذی ساب‌ولکانیک و واحدهای آذرآواری هم ارز همراهی می‌شوند. دگرگونی ضعیفی در حد رخساره شیبست سبز و هوازگی در کنار فرآیندهای زمین‌ساختی، این واحدها را تحت تأثیر قرار داده است. در نتیجه در مطالعات پتروگرافی، کانی‌های ثانویه فراوانی چون اپیدوت، کلریت، ترمولیت، اکتینولیت، پرنیت، پمپلئیت، اسفن، اکسیدهای آهن، کلسیت و کوارتز ثانویه در کنار کانی‌های اولیه‌ای چون پلاژیوکلاز، هورنبلند، پیروکسن و اکسیدهای آهن - تیتان مشاهده می‌شوند. در مطالعات الکترون میکروپروب، مشخص گردید که ترکیب پلاژیوکلازها در نمونه‌ها همگن شده و اینک در حد آلیت می‌باشد، همچنین در زمینه برخی نمونه‌ها، فلدسپار پتاسیم، به مقدار بسیار جزئی تشکیل شده است.

سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه در منطقه سقز - پیرانشهر، با توجه به نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده با بازالت میان اقیانوسی (MORB) با دارا بودن آنومالی منفی Nb به محیط کمان آتشفشانی تعلق دارند. در روش‌های متداول رده‌بندی که از درصد اکسیدها یا سایر عناصر کمیاب استفاده می‌شود، به دلیل پراکندگی، نمونه‌ها سرشت و ترکیب سنگ‌شناسی خاصی را نشان نمی‌دهند، در صورتی که در نمودار Th-Co، ترکیب شیمیایی بازالت، آندزیت بازالتی و آندزیت با سرشت کالک آلکالین برای آن‌ها مشخص می‌گردد. لذا به نظر می‌رسد عناصر غیر متحرک Th و Co می‌توانند به عنوان ابزاری مناسب در تفکیک سرشت ماگمایی و نوع سنگ‌های تغییر یافته (هوازده و دگرگون شده) استفاده شوند.

واژه‌های کلیدی: پیرانشهر، تحرک عناصر، زون سندج - سیرجان، سقز، سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه

مقدمه

روش معمول رده بندی سنگ های آتشفشانی، استفاده از نمودارهای مجموع آلکالن در برابر سیلیس می باشد که به نمودارهای TAS معروف است (نمودار LeBas et al., 1989 and 1992). محور مجموع آلکالن در این نمودارها، غالباً گونه های ماگمایی آلکالن را از ساب آلکالن جدا می نماید، در حالی که محور سیلیس، گونه های سنگی اولیه را از انواع تکامل یافته متمایز می سازد. همچنین با استفاده از نمودار K_2O در برابر SiO_2 (Rickwood, 1989; Peccerillo and Taylor, 1976) نیز می توان به جداسازی گونه های ماگمایی (تولیتی، کالک آلکالن، کالک آلکالن غنی از پتاسیم و شوشونیتی) با استفاده از عامل غنی شدگی از عناصر لیتوفیل بزرگ یون^۱ و نوع سنگ (بازالت، آندزیت بازالتی، آندزیت، داسیت و ریولیت) با استفاده از محتوای سیلیس و در نتیجه درجه تفریق پرداخت.

بسیاری از محققین به این نتیجه رسیده اند که نمودارهای TAS در رده بندی سنگ های آتشفشانی دگرسان، دگرگون و هوازده قابل اتکاء نیستند و در نتیجه از عناصر جایگزین کم تحرک تر استفاده نموده اند (برای نمونه Winchester and Floyd, 1977 and Pearce, 1996). (Hostie et al., 2007)، اقدام به معرفی نمودارهایی جدید بر اساس عناصر غیر متحرک Th و Co به جای پتاسیم و سیلیس نمودند؛ با این هدف که از این نمودارها جهت رده بندی سنگ های آتشفشانی قوسی کرتاسه در جامائیکا که متحمل دگرسانی هیدروترمال و هوازدگی شدید در محیط حاره شده بودند، استفاده نمایند که در نهایت با موفقیتی حدود ۸۰٪ روبرو شدند.

در تحقیق حاضر، با استفاده از بررسی های صحرایی، میکروسکوپی، تجزیه الکترون مایکروپروب و مطالعات ژئوشیمیایی سنگ کل، به بررسی سنگ های آتشفشانی کرتاسه در منطقه سقز - پیرانشهر (شکل ۱) پرداخته می شود. این سنگ ها از نوع آندزیت بازالتی تا آندزیت هستند که توسط سنگ های ساب ولکانیک ها و آذرآواری هم ارز همراهی می شوند و دگرگونی ضعیف، گسل خوردگی و ایجاد شکستگی به همراه هوازدگی شدید، آنها را تحت تأثیر قرار داده است. این تغییرات به گونه ای است که در مطالعات صحرایی انواع تأثیرات فرایندهای زمین ساختی، دگرگونی و هوازدگی (هوازدگی پوست پیازی، اکسیده شدن، برشی و میلونیتی شدن گسترده) دیده می شود (شکل ۲). در بررسی مقاطع نازک (شکل ۳) انواع کانی های ثانویه (اپیدوت، کلریت، ترمولیت، اکتینولیت، پرهنیت، پمپلئیت، کلسیت و اسفن) و در مطالعات الکترون مایکروپروب^۱ پدیده آلبیتی شدن پلاژیوکلازها و تشکیل کانی های دگرگونی ضعیف (کلریت، اپیدوت، کوارتز، پرهنیت و پمپلئیت) مشاهده می شود (شکل ۴).

در این مقاله، ابتدا با استفاده از نمودار عنکبوتی بهنجار شده

نسبت به بازالت های پشته میان اقیانوسی (شکل ۵)، نمودارهای نسبت به بازالت های پشته میان اقیانوسی (شکل ۵)، نمودارهای معمول (Pearce, 1982; Hastie et al., 2007) و سایر نمودارهای معمول سنگ شناسی (شکل های ۶، ۷ و ۸) ویژگی های ژئوشیمیایی این سنگ ها بررسی شد. سپس آن ها را رده بندی و در انتها داده های حاصله از نمودارهای مختلف را با هم مقایسه و تأثیرات دگرگونی و هوازدگی بر چگونگی تعیین نوع سنگ و سری ماگمایی را بررسی می نمایم.

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، در بین طول های جغرافیایی ۱۵° ۴۵' و ۳۰' ۴۶° و عرض های ۱۰' ۳۶° و ۴۵' ۳۶° در استان های کردستان و آذربایجان غربی بین شهرستان های سقز و پیرانشهر قرار گرفته است (شکل ۱). این منطقه در تقسیم بندی های زمین شناسی ایران در زون سندانج - سیرجان و البرز - آذربایجان قرار می گیرد (Stocklin, 1977; Davoudzadeh et al., 1981).

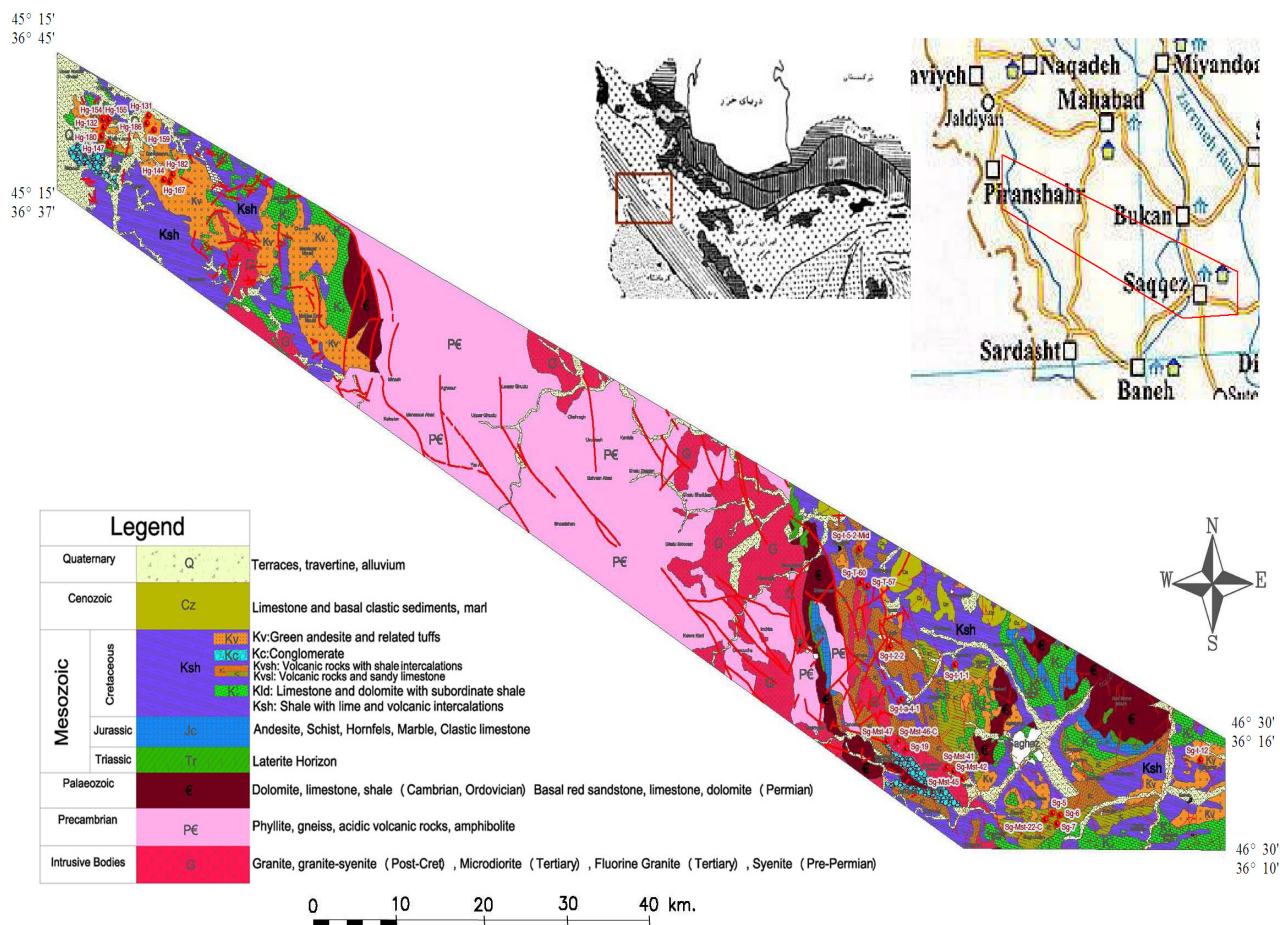
بیشترین بخش منطقه مورد مطالعه توسط آهک ها، شیل ها و سنگ های آتشفشانی کرتاسه، به همراه توده های نفوذی نیمه عمیق و آذرآواری های هم ارز پوشیده شده است. همچنین رخنمون هایی از آهک و ماسه سنگ های پالئوزوئیک فوقانی (سازند روته)، دولومیت های تریاس، شیل و ماسه سنگ های ژوراسیک (سازند شمشک)، آهک و مارن های میوسن (سازند قم) به همراه تراس ها و آبرفت های کوآترنر نیز در منطقه مشاهده می شوند (شکل ۱).

پیش از این بررسی، طی مطالعات زمین شناسی عمومی، نقشه های زمین شناسی و ژئوشیمیایی (در مقیاس های ۱:۱۰۰,۰۰۰ و ۱:۲۵۰,۰۰۰) توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده است. به علاوه اکتشافات مختلف طلا، مس، آهن، سیلیس و سنگ های ساختمانی نیز در این ناحیه انجام شده است از جمله مهمترین این اکتشافات می توان به کانسار طلای کرویان، اندیس مس پیریونس، کانسار آهن کوه سلطان، اندیس سیلیس چراغ ویس و معادن گرانیث بنفشه اشاره نمود.

واحدهای آتشفشانی کرتاسه

الف) مطالعات صحرایی: در بررسی های صحرایی بر روی واحدهای آتشفشانی کرتاسه، نمونه برداری جامعی از نیمرخ های متعدد زمین شناسی در منطقه صورت گرفت. در کلیه پیمایش ها مشاهده شد که دگرگونی (در حد شیبست سبز شکل a2) و هوازدگی (شکل های a2.b و d)، این واحدها را به شدت تحت تأثیر قرار داده و در بیشتر نواحی رنگ سنگ ها بر اثر فرایندهای اکسیداسیون، دگرگونی و هوازدگی قرمز، سبز و سیاه (شکل های a-c2) می باشد. همچنین در مناطقی که گسل ها این سنگ ها را قطع کرده، تکتونیزه و خرد و برشی شدن نیز مشاهده می شود (شکل های a و e2).

ب) مطالعات پتروگرافی: در مطالعات میکروسکوپی بافت های مختلفی از جمله پورفیریک با خمیره میکروولیتی (شکل a3)،



شکل ۱ - نقشه زمین شناسی خلاصه شده منطقه مورد مطالعه، براساس نقشه های ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی و موقعیت آن در زمین شناسی ایران، مستطیل قرمز محدوده مورد مطالعه را نشان می دهد. واحدهای کرتاسه بیشترین رخمون های مناطق اطراف شهرستان های سقز و پیرانشهر را تشکیل می دهند و توسط واحدی از دگرگونی های منسوب به پرکامبرین از یکدیگر جدا شده اند. موقعیت برخی نمونه ها که مورد آنالیز ژئوشیمی قرار گرفته اند، بر روی نقشه مشخص گشته است.

بیشتر مواقع این سنگ ها را متاآندزیت و متاآندزیت بازالتی بنامیم. بافت و ساخت این سنگ ها در مناطق مجاور گسل ها، متورق و میلونیتی بوده و اشکال مختلف دگرشکلی در آن ها مشاهده می گردد (شکل های e₂ و h₃).

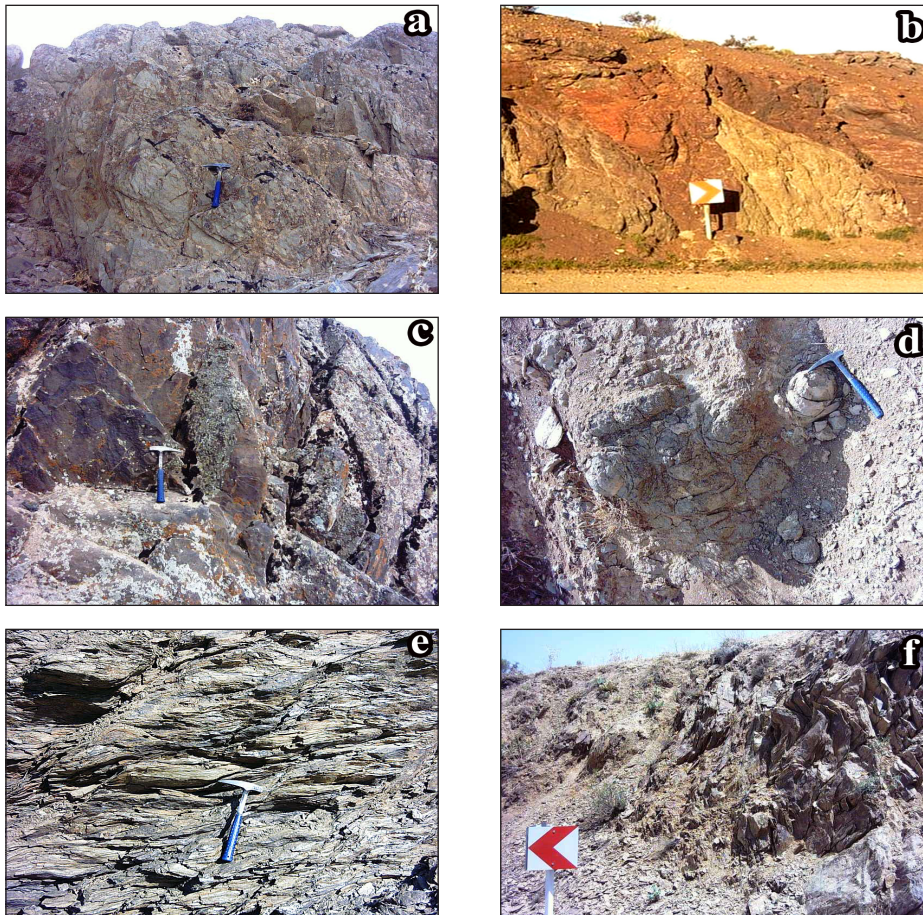
با توجه به حضور فراوان کانی هایی چون کلریت، اپیدوت، ترمولیت- اکتینولیت، کلسیت و کوارتز ثانویه در زمینه و نیز به جای کانی های اولیه مانند پلاژیوکلاز، پیروکسن و آمفیبول، می توان دگرگونی این سنگ ها را به رخساره شیبست سبز نسبت داد، مشاهده مقادیر بسیار جزئی پرهنیت و پمپلیت درون حفرات و شکستگی برخی نمونه ها، در نتیجه عملکرد محلول های هیدروترمالی است که به احتمال زیاد ناشی از نفوذ توده های مختلف آذرین به درون این واحدهای سنگی می باشد.

مطالعات الکترون مایکروپروب: پس از انجام مطالعات میکروسکوپی، ۹ نمونه جهت انجام آنالیزهای الکترون

پورفیریک با خمیره میکروگرانولار (شکل c₃) و پورفیریک با خمیره شیشه ای (شکل d₃) در سنگ های آتشفشانی و بافت دلریتی (شکل e₃) در سنگ های نیمه عمیق مشاهده گردید. در این سنگ ها کانی های اولیه از جمله پلاژیوکلاز، آمفیبول، پیروکسن و اکسیدهای آهن - تیتان مشاهده شدند. پلاژیوکلازها به سریسیت، اپیدوت، کلریت و کلسیت (شکل های e₃ و b)، پیروکسن ها به کلریت، ترمولیت- اکتینولیت، اپیدوت، کلسیت و اکسیدهای آهن (شکل های a، c و f₃)، آمفیبول ها به اکسیدهای آهن، کلسیت و کلریت و اکسیدهای آهن - تیتان به اسفن و گاه لوکوکسن (شکل های g₃ و e) تبدیل شدگی نشان می دهند. حفرات و شکستگی های فراوان در این سنگ ها به طور عمده توسط کلسیت، کلسدون، کلریت و اپیدوت و گاه اکسیدهای آهن و تیتان و گاه به طور جزئی کانی های پرهنیت و پمپلیت پر شده اند. مشاهده بافت ها و کانی های مذکور سبب گردید تا در

در برخی بلورها فاقد تغییرات ترکیب شیمیایی از مرکز به سمت حاشیه بلور می باشد این در حالی است که تبدیل بخش های مرکزی درشت بلورها به اپیدوت، نشانه حضور کلسیم بالاتر در این بخش ها پیش از آلیتی شدن می باشد (شکل های d و c). در نتیجه پدیده آلیتی شدن اکنون اکثر بلورهای پلاژیوکلاز ترکیبی نزدیک به قطب آلیت را نشان می دهند (برای نمونه An3.66- Or3.42 - Ab92.92، در نمونه Sg-07، شکل های d و c). همچنین تبدیل بلورهای پیروکسن به مجموعه ترمولیت - اکتینولیت، کلریت، اپیدوت، کوارتز ثانویه و اکسیدهای آهن (شکل a) و اکسیدهای آهن - تیتان (برای نمونه تیتان مگنتیت در گوشه سمت راست شکل a) نیز در کنار زمینه سرشار از کانی های کلریت، اپیدوت، اکتینولیت، کوارتز ثانویه، کلسیت و به مقدار کمتر پرهنیت و پمپلئیت و گاه فلدسپار پتاسیم حاکی از تأثیر دگرگونی ضعیف در حد رخساره شیست سبز و همچنین

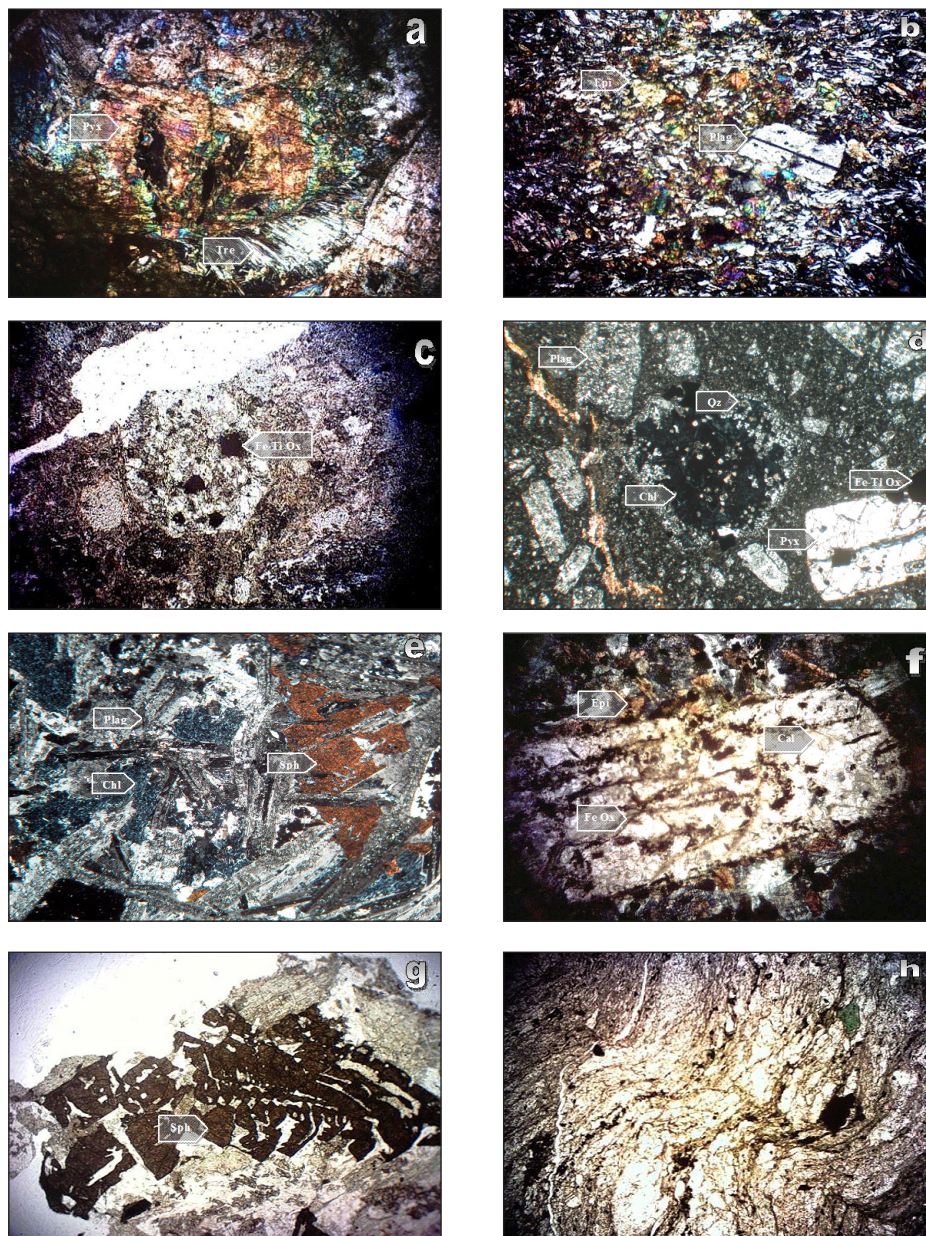
مایکروپروب (EPMA) انتخاب و در آزمایشگاه گروه علوم زمین دانشگاه اسلو در نروژ مورد بررسی قرار گرفتند. در این آزمایشگاه با استفاده از دستگاه سوپرپروب Cameca SX-100 ساخت مؤسسه پرینستون گاما تک (PGT) که دارای ۵ طیف سنج طول موج انتشاری (WDS) و یک سیستم انرژی انتشاری (EDS) می باشد، تحت ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ کیلو ولت و جریان پرتو ۱۵ نانوآمپر حدود ۲۰۰ آنالیز نقطه ای کمی روی کانی های انتخابی مانند پلاژیوکلاز، پیروکسن، آمفیبول ها و برخی از کانی های مات و ثانویه انجام شد. استانداردهای مورد استفاده شامل ولاستونیت (Si, Ca), Al_2O_3 , پیروفانیت (Ti, Mn)، فلز آهن، MgO، ارتوکلاز (K)، آلیت (Na) و Cr_2O_3 بودند. با انجام مطالعات مایکروپروب بر روی پلاژیوکلاز موجود در نمونه های ارسال شده، مشخص گردید که ترکیب فنوکریست های پلاژیوکلاز در تمامی نمونه ها آلیتی شده و حتی ساخت های منطقه ای^۱ ظاهری مشاهده شد،



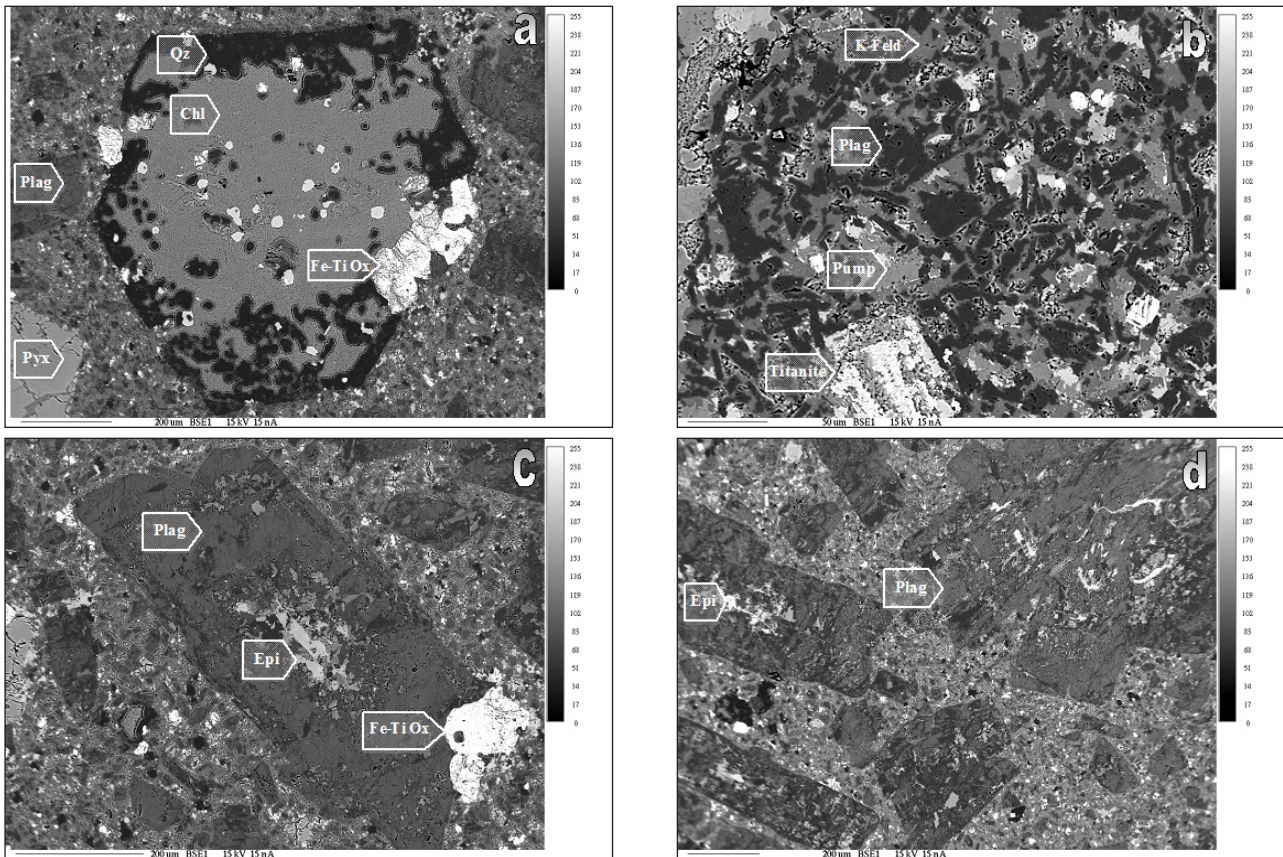
شکل ۲ - پدیده های مشاهده شده در بررسی های صحرایی، بر روی سنگ های آتشفشانی کرتاسه در منطقه سقز - پیرانشهر: (a) دگرگونی در رخساره شیست سبز سبب ایجاد رنگ سبز روشن شده است (۱۵ کیلومتری شمال غرب سقز)، (b) اکسیده شدن همراه با ایجاد شکستگی های فراوان که سبب ایجاد رنگ های قرمز روشن و تیره در سنگ ها شده است (۱۷ کیلومتری جنوب شرق سقز)، (c) شکستگی در مقیاس و جهات مختلف سبب تشدید فرایند هوازدگی شده است (۱۵ کیلومتری غرب سقز)، (d) هوازدگی پوست پیازی در سنگ های مورد مطالعه (۱۰ کیلومتری جنوب غربی سقز) و (e) و (f) ساختارهای برشی و تأثیر آن ها بر واحدهای سنگی مورد مطالعه (۱۰ کیلومتری جنوب شرق پیرانشهر).

و گروه‌های مختلف سنگ‌های آتشفشانی، توده‌های نفوذی نیمه عمیق و آذرآواری‌های هم ارز و همراه آن‌ها می‌باشند. آزمایشات XRF در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و مؤسسه AL-CHEMEX کانادا و آزمایشات ICP-MS در مؤسسه

هوازگی بر این نمونه‌ها است (شکل b4).
 (د) مطالعات ژئوشیمیایی: پس از انجام مطالعات پتروگرافی تعداد ۳۳ نمونه جهت انجام مطالعات ژئوشیمیایی به روش‌های XRF و ICP-MS انتخاب شدند که متعلق به واحدهای مختلف کرتاسه



شکل ۳- دگرسانی کانی‌های سنگ‌ساز در مقاطع مورد مطالعه: (a) اورالیتی شدن بلور پیروکسن در نمونه دیوریتی Sg-Mst-41، (b) اپیدوتی شدن زمینه در نمونه آندزیت بازالتی Sg-Mst-46-C، (c) و (d) تجزیه فنوکریست پیروکسن به کلریت، کوارتز، کربنات و اکسید آهن در نمونه آندزیت بازالتی Sg-06، (e) سریسیتی و کربناته شدن پلاژیوکلازها، کلریتی شدن پیروکسن‌ها و تبدیل اکسیدهای آهن - تیتان به اسفن در نمونه ساب ولکانیک (نمونه Sg-t-57 با ترکیب دیوریت)، (f) تجزیه فنوکریست پیروکسن به کربنات، اپیدوت و اکسید آهن در نمونه‌ای آلتره (آندزیت بازالتی Sg-Mst-50)، (g) تبدیل بلورهای درشت و اسکلتی اکسید آهن-تیتان به اسفن در نمونه دیوریتی Sg-Mst-42 و (h) پدیده دگرشکلی در نمونه‌ای از آندزیت‌های بازالتی در مجاورت یک زون برشی در ۱۵ کیلومتری شمال غرب سقز. Epi: اپیدوت، Plag: پلاژیوکلاز، Pyx: پیروکسن، Tre-Act: ترمولیت-اکتینولیت، Chl: کلریت، Qz: کوارتز، Fe-Ti Ox: اکسید آهن تیتان Sph: اسفن).



شکل ۴ - دگرسانی کانی های سنگ ساز در مطالعات الکترون میکروپروب (شماره های روی شکل های آنالیزهای انجام شده بر روی تک کانی ها می باشد)؛ ترکیب تمامی پلاژیوکلازها آلبیتی است که این مسئله سبب شده تا در تصاویر بلورهای مختلف پلاژیوکلاز هم رنگ باشند :

(a): تشکیل کلریت، تیتانیت و حاشیه ای از کوارتز به جای بلور خودشکل پیروکسن در نمونه Sg-06، بلور درشت تیتان مگنتیت (Fe-Ti Ox) نیز به شدت دگرسان شده است، (b): نمایی نزدیک از زمینه نمونه Sg-07 که از آلبیت و فلدسپار پتاسیم به همراه پمپلینیت و تیتانیت تشکیل شده است، (c): بلور پلاژیوکلاز در نمونه Sg-06 دارای ترکیب آلبیت که هسته آن به اپیدوت تبدیل شده است. تشکیل اپیدوت، دلیلی بر وقوع پدیده همگن شدگی است و نشان می دهد قبلاً هسته پلاژیوکلاز ترکیب کلسیک داشته است، (d): در نمونه Sg-06 بلورهای دگرسان شده پلاژیوکلاز با ترکیب مشابه آلبیتی، همچنین میکروولیت های پلاژیوکلاز نیز درون زمینه مشاهده می شوند. هسته پلاژیوکلازها به اپیدوت تبدیل شده است. (Epi): اپیدوت، Plag: پلاژیوکلاز، Pyx: پیروکسن، Tre-Act: ترمولیت-اکتینولیت، Chl: کلریت، Qz: کوارتز، Fe-Ti Ox: اکسید آهن تیتان، Pump: پمپلینیت، K-Feld: فلدسپار پتاسیم).

بار/شعاع یا پتانسیل یونی آن وابسته است (Pearce, 1996). عناصر سازنده یون ها با پتانسیل یونی پایین ($<03/0 \text{ pm}^{-1}$) تمایل دارند در محلول ها به صورت کاتیون های هیدراته جایجا شوند، در حالی که یون ها با پتانسیل یونی بالا ($>10/0 \text{ pm}^{-1}$) تمایل دارند تا به طور ترجیحی و به صورت اکسی آنیون های هیدراته جایجا شوند. یون های دارای پتانسیل یونی متوسط ($03/0 - 10/0 \text{ pm}^{-1}$) تمایل دارند تا در محصول جامد هوازدگی باقی بمانند و در نتیجه به طور نسبی غیرمتحرک هستند. این مطلب حتی تا درجات دگرگونی پایین، در حد شیبست سبز نیز صادق است. در نتیجه عناصر Zr, Hf, Nb, Ta, Y, Ti, Cr (REE) عناصر کمیاب خاکی¹ (REE) به جز Eu و احتمالاً Ga, Th, La و Sc در بین پایدارترین

AMDEL استرالیا و ACME LABS کانادا انجام شده اند. خلاصه نتایج این آزمایشات در جدول ۱ قابل مشاهده است. همانگونه که در نمودارهای شکل a-b قابل مشاهده است الگوهای رسم شده نمودارهای عنکبوتی، برای آندزیت های بازالتی و آندزیت ها که با مورب نرمال شده اند، مشابه الگوهای ترسیم شده برای کمان های آتشفشانی (Winter, 2001) بوده و آنومالی منفی Nb در آنها مشاهده می گردد که از مشخصه های بارز ماگماهای بازالتی در محیط های کمان آتشفشانی می باشد.

تحلیل های ژئوشیمیایی

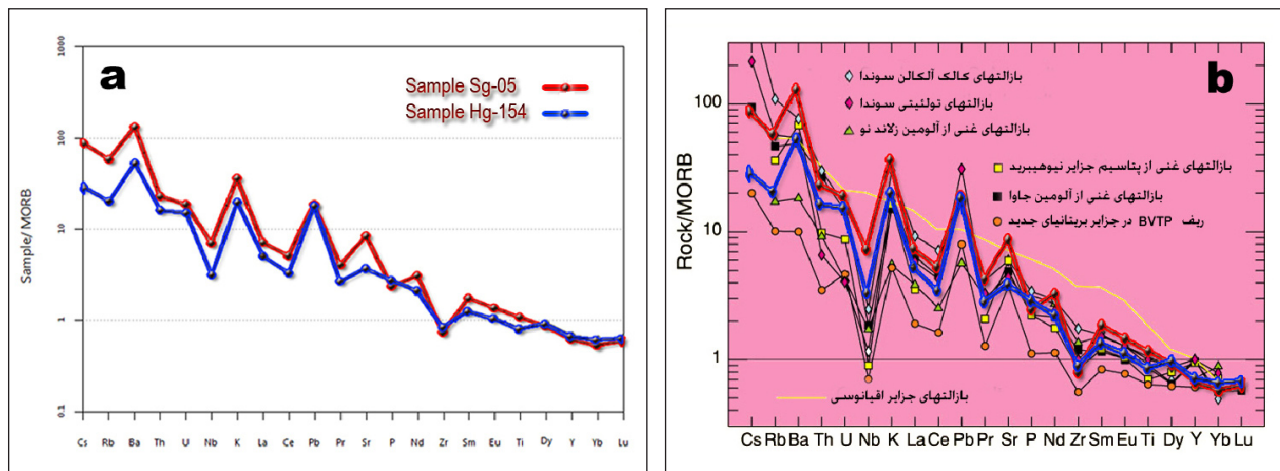
رفتار هر عنصر طی هوازدگی و دگرسانی هیدروترمال به نسبت

جدول ۱ - نتایج آزمایشات تعیین ترکیب شیمیایی کل سنگ به روش‌های XRF و MS-ICP. برای نمونه‌های آتشفشانی و ساب و لکانیک کرتاسه در منطقه مورد مطالعه؛ (نمونه‌های Sg از سقز و Hg از پیرانشهر برداشت شده‌اند). عدم وجود برخی داده‌های عناصر به دلیل تفاوت در نوع آنالیز انجام شده و عناصر مورد آنالیز در هر آزمایشگاه است.

Sample	Sg-5	Sg-6	Sg-7	Sg-19	Sg-T-12	Sg-T-57	Sg-T-60	Sg-T-1-1	Sg-T-2-2	Sg-T-5-2-mid	Sg-T-7-1-2	Sg-T-7-1-3	Sg-T-a-4-1	Sg-Mst-22-C	Sg-Mst-41	Sg-Mst-42
Petrology	Basaltic Andesite	Basaltic Andesite	Basaltic Andesite	Altered Gabbro	Altered Porphyritic Andesite	Diorite	Diorite	Basaltic Andesite	Porphyry Diorite	Diorite	Diorite	Gabbro Diorite	Basaltic Andesite	Andesite	Diorite	Diorite
SiO2 (%)	48.14	49.06	47.22	49.03	51.34	48.55	48.15	47.05	45.13	49.76	47.29	49.47	46.72	45.29	51.47	51.24
TiO2 (%)	1.52	1.62	1.46	2.05	1.45	1.58	1.24	1.11	0.85	0.84	1.37	0.98	1.14	1.47	1.81	0.92
Al2O3 (%)	16.32	15.64	16.15	16.77	16.02	16.32	14.73	15.04	16.90	14.83	14.51	15.35	15.60	15.09	12.64	14.31
Fe2O3 (%)	5.51	5.52	6.24	5.96	5.48	6.33	7.97	2.34	2.11	2.11	2.59	2.23	2.38	2.68	2.98	2.18
FeO (%)	3.02	3.12	2.96	3.55	2.95	3.08	2.74	2.61	2.35	2.34	2.87	2.48	2.64	2.97	3.31	2.42
MnO (%)	0.14	0.15	0.18	0.17	0.11	0.15	0.18	0.17	0.18	0.18	0.16	0.12	0.19	0.19	0.22	0.17
MgO (%)	4.24	5.06	4.39	5.55	4.11	6.23	6.22	9.90	11.32	6.16	10.97	11.93	8.71	7.57	5.79	7.58
CaO (%)	6.90	6.65	7.08	8.08	6.15	7.64	10.42	9.02	6.94	12.59	7.94	6.08	8.30	12.81	8.77	8.08
Na2O (%)	3.29	2.30	3.61	4.17	4.62	4.26	3.78	2.66	2.30	1.94	2.87	3.23	2.34	2.31	2.80	2.69
K2O (%)	2.63	2.75	2.23	0.08	2.24	1.11	0.12	0.33	0.95	0.87	0.96	1.99	0.93	0.84	0.31	0.31
P2O5 (%)	0.29	0.31	0.46	0.34	0.31	0.32	0.17	0.22	0.15	0.17	0.27	0.21	0.24	0.18	0.36	0.19
total (%)	91.99	92.17	91.99	95.75	94.79	95.56	95.72	90.45	89.17	91.79	91.78	94.07	89.19	91.40	90.46	90.08
Ba (ppm)	805	872	545	73	474	259	62	169	91	91	260	138	189	271	125	147
Rb (ppm)	32.2	22.9	23.1	1.1	40.9	11.0	1.4	8.1	32.6	24.0	22.3	60.6	28.3	37.3	10.0	10.0
Sr (ppm)	787	701	874	421	421	356	256	701	1030	517	281	210	585	902	386	496
Y (ppm)	19.2	17.9	21.2	26.1	19.9	19.4	21.5	26.6	29.2	28.4	33.1	30.4	31.7	35.9	16.0	12.0
Zr (ppm)	60.9	63.1	84.7	56.5	75.9	92.4	39.0	128.4	131.8	101.0	103.3	76.9	127.3	143.0	174.0	83.0
Nb (ppm)	17.19	18.26	23.29	11.32	26.24	20.05	4.84	13.80	22.70	13.10	20.40	4.90	15.40	24.10	10.00	9.00
Th (ppm)	2.8	2.5	4.5	0.6	4.4	2.0	0.5	1.2	2.7	2.2	2.0	4.4	2.4	3.1	3.0	2.0
Pb (ppm)	5.7	4.4	11.4	5.1	5.2	1.2	1.1	13.1	16.7	16.1	14.5	9.8	4.8	18.4	1.0	3.0
Ga (ppm)	17.9	18.1	19.2	20.2	16.5	15.0	16.2	17.3	17.0	20.7	15.7	8.7	21.7	27.2		
Zn (ppm)	74.3	85.5	90.9	75.6	71.5	56.2	67.4	83.9	79.9	79.6	62.5	75.3	102.8	91.1	88.0	77.0
Cu (ppm)	79.0	75.2	75.3	83.4	8.4	61.8	184.0	64.4	97.1	93.5	18.5	70.6	124.6	102.9	1.0	65.0
Ni (ppm)	12	12	11	43	9	45	46	65	159	45	66	72	90	55	16	80
V (ppm)	279	279	299	238	238	227	295	170	135	137	205	155	176	216	219	142
Cr (ppm)	10	10	7	115	9	137	196	152	182	112	172	223	176	80	22	131
Hf (ppm)	2.22	2.35	2.87	1.92	2.59	2.45	1.29	2.30	3.60	3.40	0.50	2.50	4.60	3.70		
Cs (ppm)	0.6	0.9	0.2	0.9	1.3	0.7	0.1	1.0	1.4	1.3	1.2	0.2	1.6	3.6		
Sc (ppm)	21.1	19.9	26.3	30.2	17.3	31.4	56.3	29.4	27.4	42.1	29.7	27.3	30.1	43.0		
Ta (ppm)	1.00	1.10	1.20	0.70	1.60	0.90	0.20	0.90	1.40	0.80	1.30	0.30	1.00	1.50	0.60	0.60
Co (ppm)	30.5	30.9	29.9	37.2	25.0	39.4	43.0	38.6	44.4	36.1	38.0	31.0	49.7	41.3	23.0	31.0
Li (ppm)	20.60	20.20	14.70	28.80	27.90	28.60	12.10									
Be (ppm)	1	1	1	1	1	1	1									
U (ppm)	0.9	0.9	1.4	0.3	1.1	0.5	0.1								1.0	2.0
W (ppm)	0.4	0.4	0.7	0.2	0.5	0.2	0.1								1.0	1.0
Sn (ppm)	1.3	1.4	1.4	2.0	1.5	1.1	0.7	3.9	4.5	3.0	7.6	1.7	2.3	3.4		
Mo (ppm)	0.31	0.38	0.43	0.59	0.24	0.32	0.23	1.70	2.20	1.50	3.20	1.10	1.70	2.10	1.00	1.00
Cd (ppm)	0.12	0.11	0.16	0.13	0.10	0.18	0.12									
Sb (ppm)	0.31	0.23	0.18	0.30	0.55	0.26	0.06									
Bi (ppm)	0.10	0.05	0.09	0.04	0.04	0.04	0.04									
La (ppm)	18.90	16.80	31.90	13.80	24.20	17.10	6.10	19.10	12.40	29.30	22.50	4.90	24.90	45.40		
Ce (ppm)	40.42	37.81	64.16	31.64	47.82	31.35	12.69	9.50	29.70	15.20	24.20	26.20	15.90	21.10		
Pr (ppm)	5.70	5.30	8.60	4.80	7.00	4.20	2.00									
Nd (ppm)	24.20	22.00	34.60	21.80	28.70	16.40	9.50	20.20	4.10	11.90	15.20	1.00	16.00	30.40		
Sm (ppm)	5.00	4.90	6.90	4.90	5.90	3.40	2.60	4.20	4.50	4.60	4.00	2.50	5.30	5.20		
Eu (ppm)	1.50	1.40	2.10	1.80	1.70	1.20	1.00	1.30	1.40	1.50	1.30	0.70	1.70	1.70		
Gd (ppm)	5.10	4.80	6.00	5.30	5.00	3.80	3.50									
Tb (ppm)	0.70	0.70	0.90	0.90	0.70	0.60	0.60	0.50	0.60	0.30	0.40	0.10	0.90	0.50		
Dy (ppm)	4.30	4.00	4.90	5.80	4.70	3.90	4.20									
Ho (ppm)	0.80	0.80	0.90	1.20	0.80	0.80	0.90									
Er (ppm)	2.10	2.10	2.10	2.80	2.00	2.10	2.40									
Tm (ppm)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40									
Yb (ppm)	1.80	1.70	1.90	2.00	1.70	1.90	2.20	2.70	3.60	2.60	2.80	2.80	2.90	2.60		
Lu (ppm)	0.30	0.20	0.30	0.30	0.20	0.30	0.30									

ادامه جدول ۱ - نتایج آزمایشات تعیین ترکیب شیمیایی کل سنگ به روش های XRF و ICP-MS، برای نمونه های آتشفشانی و ساب و لکانیک کوتاه در منطقه مورد مطالعه؛ (نمونه های Sg از سقز و Hg از پیرانشهر برداشت شده اند). عدم وجود برخی داده های عناصر به دلیل تفاوت در روش آنالیز و عناصر مورد آنالیز در هر آزمایشگاه است.

Sample	Sg-Mst-45 Porphyry Dioritic Diorite	Sg-Mst-46-C Altered Basaltic Andesite	Sg-Mst-46-C2 Altered Basaltic Andesite	Sg-Mst-47 New Diorite	Hg-144 Diorite	Hg-154 Diorite	Hg-181 Porphyritic Andesite	Hg-182 Basaltic Andesite	Hg-184 Altered Ultrac Clastic	Hg-186 Olivine Gabbro	Hg-147 Basaltic Andesite	Hg-155 Altered Porphyry Diorite	Hg-199 Andesite	Hg-167 Porphyry Diorite	Hg-186 Litic full	Hg-180 Basaltic Andesite	Hg-182 Crystal Ultrac Wine full
SiO ₂ (%)	45.17	57.21	52.70	46.81	48.06	54.62	46.00	51.00	50.70	58.10	51.10	53.50	48.30	51.40	49.60	50.20	46.60
TiO ₂ (%)	1.11	1.11	1.05	0.87	1.18	1.05	1.11	1.01	0.53	0.49	1.05	0.97	1.10	1.15	0.91	0.94	0.97
Al ₂ O ₃ (%)	12.47	15.32	15.24	13.29	15.17	14.13	18.90	16.50	14.70	13.25	17.10	15.70	15.25	16.35	15.90	16.15	17.40
Fe ₂ O ₃ (%)	2.37	2.34	2.30	2.14	2.50	2.12	8.39	6.02	3.83	4.02	8.26	6.03	7.21	6.43	7.79	7.24	7.73
FeO (%)	2.83	2.61	2.55	2.37	2.88	2.55	2.81	2.51	2.03	1.99	2.55	2.47	2.69	2.85	2.41	2.44	2.47
MnO (%)	0.17	0.19	0.13	0.29	0.18	0.14	0.18	0.14	0.11	0.11	0.16	0.15	0.18	0.11	0.18	0.17	0.17
MgO (%)	12.62	5.21	8.41	12.70	5.74	4.54	4.76	4.71	9.76	9.47	5.39	4.20	8.30	5.10	7.78	5.16	7.80
CaO (%)	9.03	6.38	7.08	7.00	10.33	5.86	7.39	8.30	15.95	14.30	8.09	9.40	7.16	4.07	6.77	7.08	5.70
Na ₂ O (%)	1.93	3.87	2.79	3.39	4.53	5.40	3.29	3.25	1.86	1.75	3.34	2.36	2.67	6.27	3.32	4.51	3.27
K ₂ O (%)	0.59	0.38	1.44	0.10	0.25	1.42	1.22	1.50	0.10	0.10	2.00	1.74	1.46	0.37	1.33	0.63	1.17
P ₂ O ₅ (%)	0.11	0.27	0.35	0.08	0.28	0.33	0.29	0.31	0.04	0.01	0.31	0.30	0.29	0.21	0.22	0.44	0.19
Total (%)	88.29	95.48	94.02	88.89	94.51	95.13	95.14	95.27	99.61	99.49	97.27	96.82	95.00	94.10	95.60	95.60	93.67
Ba (ppm)	202	175	187	65	55	325	298	260	90	90	448	358	627	50	269	269	289
Hf (ppm)	14.4	4.4	37.5	6.0	4.8	11.1	29.8	16.5	1.3	1.1	49.1	37.6	27.1	8.6	30.1	17.0	30.7
Sr (ppm)	674	577	765	15	188	339	487	435	376	389	492	623	382	293	403	521	429
Y (ppm)	29.5	34.0	31.0	14.0	23.4	19.4	30.4	19.9	10.9	10.7	22.0	27.9	27.2	27.6	25.1	21.6	23.8
Zr (ppm)	115.8	158.1	101.2	22.0	60.8	61.3	175.8	81.0	25.8	22.0	28.0	146.0	103.0	94.0	97.0	91.0	96.0
Nb (ppm)	7.70	11.80	13.70	1.00	5.77	7.50	6.40	6.40	1.60	1.60	6.40	8.00	6.40	3.20	4.80	6.70	3.20
Th (ppm)	1.6	0.9	3.0	5.0	1.4	1.9											
Pb (ppm)	3.5	12.8	11.5	2.0	4.5	5.4	10.0	5.0	5.0	5.0	8.0	9.0	5.0	5.0	6.0	6.0	5.0
Ga (ppm)	14.2	17.0	11.1	17.5	14.0	21.3	21.3	15.4	12.6	12.5	16.5	19.1	15.9	14.3	19.6	18.3	18.9
Zn (ppm)	87.1	87.6	65.4	302.0	75.8	82.7	306.0	20.0	41.0	54.0	29.0	29.0	105.0	105.0	28.0	101.0	25.0
Cu (ppm)	122.2	36.8	145.6	54.0	98.1	71.7	146.0	306.0	90.0	78.0	249.0	89.0	108.0	95.0	118.0	220.0	91.0
Ni (ppm)	65	11	36	315	69	38	93	40	120	121	46	51	92	38	103	53	71
V (ppm)	182	163	157	127	281	201	313	293	230	231	328	265	308	289	314	250	283
Cr (ppm)	148	35	91	406	165	93											
Mn (ppm)	4.90	1.30	5.20	3.26	3.36	3.30	3.40	0.90	0.90	2.30	3.70	2.80	2.60	2.60	2.70	3.10	3.10
Co (ppm)	1.3	0.2	0.4	0.3	0.2	1.7	0.7	0.2	0.4	1.0	0.3	0.8	0.3	0.7	0.5	0.6	0.6
Sc (ppm)	0.7.6	15.6	28.1	311.3	18.3												
Va (ppm)	0.50	0.70	0.80	0.10	0.20	0.40	0.40	0.40	0.10	0.10	0.40	0.30	0.40	0.20	0.30	0.40	0.20
Ca (ppm)	50.7	23.5	23.7	38.0	38.7	36.1											
U (ppm)				10.50	10.30												
Ba (ppm)				1	1												
U (ppm)				3.0	0.7	0.7	0.8	0.9	0.1	0.1	1.0	1.0	0.7	0.4	0.8	0.9	0.6
W (ppm)				1.0	0.1	0.3	1.0	2.0	2.0	2.0	1.0	3.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0
Sn (ppm)	0.7	2.1	1.0	0.9	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Mo (ppm)	0.70	2.40	1.50	1.00	0.20	0.30											
Cl (ppm)				0.25	0.14												
Sb (ppm)				0.03	0.07												
Bi (ppm)				0.08	0.01												
La (ppm)	16.10	11.50	24.50	7.16	11.40	11.70											
Co (ppm)	17.70	11.50	33.10	15.10	22.54	25.12											
Pr (ppm)				2.22	1.50	1.60	4.62	4.16	0.90	0.62	4.41	4.66	4.01	3.21	3.71	4.90	2.91
Nd (ppm)	18.50	3.90	11.60	10.60	16.00	15.70											
Sm (ppm)	5.10	5.10	2.50	2.97	3.50	3.40	5.13	3.90	1.52	1.39	4.32	4.67	4.44	4.02	3.88	4.23	3.53
Eu (ppm)	1.60	1.70	0.70	1.09	1.20	1.10	1.75	1.18	0.75	0.74	1.34	1.40	1.36	1.25	1.29	1.15	1.18
Gd (ppm)				3.47	4.10	3.80	5.47	4.03	1.91	1.80	4.27	4.87	4.67	4.35	4.23	4.13	3.79
Hf (ppm)	0.90	0.20	0.20	0.72	0.70	0.60											
Dy (ppm)				4.56	4.80	4.30	5.27	3.61	2.05	2.01	3.24	4.87	4.82	4.07	4.29	3.83	4.07
Ho (ppm)				0.68	0.90	0.80											
Er (ppm)				2.78	2.60	2.20	3.22	2.13	1.19	1.16	2.36	3.00	2.88	3.06	2.64	2.25	2.58
Tm (ppm)				0.42	0.40	0.30	0.47	0.31	0.16	0.15	0.31	0.45	0.41	0.35	0.30	0.33	0.32
Yb (ppm)	2.70	2.30	2.50	2.37	2.40	1.90	3.07	2.02	1.00	0.96	2.23	2.93	2.75	2.82	2.64	2.14	2.41
Lu (ppm)				0.35	0.30	0.30											



شکل ۵ - ترسیم نمودارهای عنکبوتی: (a) نمودار عنکبوتی میانگین و دامنه نوسان مقادیر عناصر، برای ۲ نمونه مورد مطالعه نسبت به MORB (نمونه‌های Sg-05، Hg-154 به ترتیب از پیرانشهر و سقز)، (b) انطباق الگوی رسم شده در تصویر a بر الگوهای ارائه شده توسط Winter (2001) که برای بازالت‌های کمان‌های اقیانوسی مختلف در برابر MORB ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دامنه فراوانی عناصر در نمونه‌های مورد مطالعه، مشابه مقادیر ارائه شده در الگوهای مذکور است و آنومالی منفی Nb مشاهده می‌شود. این آنومالی در نمونه Hg-154 که از منطقه پیرانشهر برداشت شده است، بارزتر است.

سنگ‌های موجود در کمان‌های آتشفشانی استفاده می‌کند (شکل ۶). این نمودار نیز دارای مشکلی است که شامل محدوده‌های بزرگ همپوشانی بین بازالت‌ها، آندزیت‌های بازالتی، آندزیت‌ها و ریولیت‌ها در ناحیه کمان آتشفشانی می‌باشد. این همپوشانی به دلیل حضور مقادیر بالای آب در ماگماهای جزایر قوسی است که سبب دپلمریزه شدن مذاب در شرایط اکسیداسیون می‌گردد. این فرایند سبب تبلور زود هنگام اکسیدهای آهن - تیتان از ماگما نسبت به سایر محیط‌های زمین‌ساختی می‌شود (Hastie et al., 2007). شایان ذکر است که عنصر Zr نسبت به Ti ناسازگارتر بوده و در نتیجه نسبت Zr/Ti، تحت تاثیر ذوب بخشی قرار می‌گیرد؛ پدیده‌ای که به نوبه خود سبب ناهمگنی گوشته می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در منطقه بازالت، آندزیت بازالتی و آندزیت‌های ساب‌آلکانل قرار گرفته و به سمت بازالت‌های آلکانل کشیده می‌شوند.

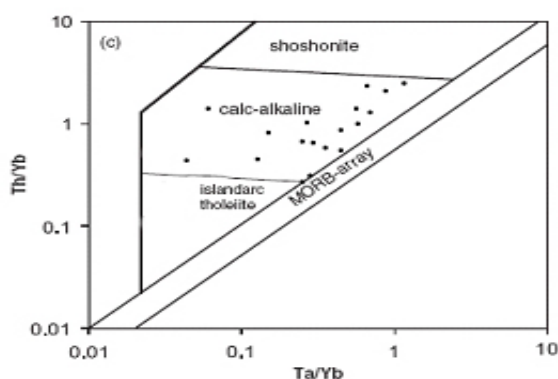
ب) نمودار (Pearce, 1982) $Th/Yb - Ta/Yb$: در محیط‌های فرورانش، برخی عناصر مانند Ta و Yb در پوسته فرورانده باقی می‌مانند (عناصر حفظ شده)، در حالی که سایر عناصر، توسط محلول‌ها یا مذاب‌های بخشی به گوه گوشته‌ای منتقل می‌گردند (عناصر حفظ نشده) (Pearce and Peate, 1995). با توجه به این موارد (Pearce, 1982)، نمودار زیر را رسم نموده که در آن محور x عنصری حفظ شده می‌باشد. داده‌های کمان‌های آتشفشانی در این نمودار، در بالای محدوده MORB واقع می‌شوند و با افزایش مقادیر در محورهای x و y ترکیب آن‌ها از تولیتی به

عناصر قرار می‌گیرند. اما تغییر در ترکیب شیمیایی سیال غنی از H_2O ، افزایش مقدار CO_2 ، حضور مذاب‌های بخشی غنی از SiO_2 ، افزایش دما و فعالیت محلول‌ها ممکن است سبب تحرک چنین عناصری شود (Pearce, 1996). Nb یکی از پایدارترین عناصر بوده و دارای ضریب تفکیک مشابه Th می‌باشد و در نمودار معرفی شده توسط Hostie et al., (2007) عنصر کلیدی به شمار می‌رود.

با توجه به این که بسیاری از سنگ‌های مورد مطالعه دچار تغییرات ژئوشیمیایی شده‌اند، لذا بر اساس مبانی ذکر شده سعی شده است تا از نمودارهای تغییرات مناسب برای بررسی ژئوشیمی آن‌ها استفاده شود.

الف) نمودار $Zr/Ti - Nb/Y$: برخلاف سایر نمودارهای طبقه‌بندی ارائه شده (Shervais, 1982; Pearce and Cann, 1973) که بر تقسیم‌بندی محیط زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی تمرکز دارند، نمودار معرفی شده (Pearce, 1996)، جانیشینی برای نمودار تقسیم‌بندی TAS است که در آن نسبت Nb/Y، به عنوان جانشین آلکانل‌ها (مجموع اکسیدهای سدیم و پتاسیم) و نسبت Zr/Ti به جای اکسید سیلیس قرار می‌گیرد (شکل ۶). نسبت Nb/Y از ترکیبات ساب‌آلکانل به سمت آلکانل افزایش یافته، همچنین Zr/Ti از ترکیبات بازیک به سمت اسیدی بالا می‌رود.

در نمودار $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ که پیشتر توسط Winchester and Floyd (1977) نمی‌توان سنگ‌ها را به زیرگروه‌های مشخص تولیتی، کالک آلکانل، کالک آلکانل غنی از پتاسیم و شوشونیتی تقسیم نمود. نمودار اصلاح شده (Pearce, 1996)، از آنالیز

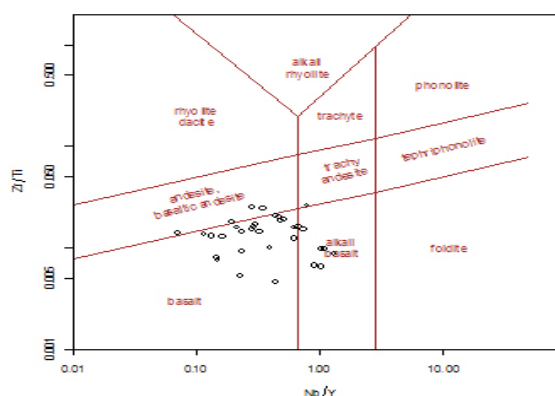


شکل ۷- ترسیم داده های ژئوشیمیایی نمونه های مورد مطالعه در نمودار $Nb/Y-Zr/Ti$ (Pearce, 1996). نمونه ها در محدوده کالک آلکالن نواحی کمان آتشفشانی واقع می شوند.

(al., 2006). به علاوه، تحرک عنصر توریم در شرایط دگرگونی در رخساره آمفیبولیت بین ۴۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی گراد آغاز می گردد (Hastie et al., 2007)، یعنی می توان این عنصر را در سنگ هایی دگرگون با رخساره شیست سبز و پائین تر همانند مورد مشاهده شده در منطقه مورد مطالعه، غیرمتحرک دانست. در نتیجه عنصر توریم برای جانشینی اکسید پتاسیم بسیار مناسب است.

بهترین جایگزین غیرمتحرک برای سیلیس، تاکنون نسبت Zr/Ti بوده (که برای نمونه توسط مؤلفینی چون Winchester and Floyd, 1977 بکار رفته است). استفاده از این نسبت به جای مقدار سیلیس کارساز می باشد، زیرا طی تبلور الیوین، پیروکسن و پلاژیوکلاز به مقدار کمی تغییر می کنند و روند ثابتی را در برابر افزایش سیلیس نشان می دهند البته این نسبت تنها برای سنگ های آتشفشانی در مناطق کمان مؤثر است. در نتیجه، در مطالعات اخیر (Hastie et al., 2007)، با توجه به مطالعات تئوری و آزمایشگاهی و بررسی عناصر مختلف، کبالت را به عنوان عنصری ردیاب و برای جانشینی سیلیس نیز مناسب است، انتخاب نمودند. این عنصر طی تبلور تفریقی، سازگاری بالایی در الیوین و اکسیدهای آهن - تیتان و سازگاری محدودی در پیروکسن و آمفیبول دارد و نسبت به فلدسپار ناسازگار می باشد (Pearce and Parkinson, 1993). اشکال کبالت در این است که به طور عمده با انباشت بلورهای الیوین نیز، مقدار آن در کومولاها افزایش می یابد. البته تجمع الیوین سبب کاهش سیلیس در این کومولاها می شود، در نتیجه مسأله مهمی را در طبقه بندی ایجاد نمی کند و در نتیجه روند خطی کبالت در برابر سیلیس حفظ خواهد شد.

طی فرآیند هوازدگی، کبالت تحرک کمی دارد زیرا جذب سطحی اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز می شود و همچنین عدد اکسایش آن از ۲ به ۳ افزایش می یابد. طی فرآیند دگرگونی نیز سازگاری کبالت در کانی های غنی از آهن مانند کلریت، اکسیدهای آهن - تیتان و آمفیبول، سبب عدم تحرک و باقی ماندن آن در محیط می گردد (Hastie et al., 2007).



شکل ۶- داده های ژئوشیمیایی نمونه های مورد مطالعه در نمودار $Nb/Y-Zr/Ti$ (Pearce, 1996).

سمت کالک آلکالن و شوشونیتی تغییر می کند. نسبت Th/Yb مورد استفاده در این نمودار می تواند میزان غنی شدگی از عناصر لیتوفیل بزرگ یون را نشان دهد و ترکیبات تولیتی، کالک آلکالن و شوشونیتی را از هم جدا نماید. استفاده از این نسبت، تأثیرات تبلور تفریقی، انباشتگی بلورهای پلاژیوکلاز تمرکز آن ها را در نتیجه فرآیند شستشو یا انحلال در نتیجه رگه زایی کاهش می دهد.

با توجه به شکل ۷، نمونه های منطقه مورد مطالعه، در محدوده کالک آلکالن واقع می شوند.

(Hastie et al., 2007). عناصر حفظ شده در برخی از مراحل فرورانش متحرک می شوند T به همین دلیل یافتن عنصری غیرمتحرک برای تقسیم بندی سنگ های آتشفشانی مشکل می باشد. امروزه در نتیجه آزمایشات و مشاهدات متعدد، مشخص شد که عناصر در محدوده های دمایی متفاوت، از پوسته فرورونده به گوه گوشته ای مهاجرت می کنند. در ابتدا متحرک ترین عناصر مانند B و Cs، سپس عناصری چون K و Ba و در انتها کم تحرک ترین عناصر کمیاب خاکی مانند Th و $LREE$ (جایجا می شوند (Becker et al., 2000)). گروه اخیر عناصر، هم ارزهای منحصرفردی برای پتاسیم می باشند، در نتیجه از Th در نمودار جدید (Hastie, 2007) به عنوان جانشین پتاسیم استفاده می شود. تحرک عنصر توریم بسیار پیچیده می باشد، در بررسی سیالات آبدار ناشی از پوسته اقیانوسی دگرسان شده به همراه مذاب های سیلیکاته از رسوبات همراه آن، مشخص شد که پتاسیم در هر دو فاز یاد شده متحرک است، اما توریم تنها در مذاب سیلیکاته ناشی از رسوبات جایجا می شود (Elliott, 2003). در هر صورت تحرک توریم با پائین آمدن دما کاهش می یابد.

همچنین بر اساس بررسی های تجربی مشخص گردیده که طی فرآیند هوازدگی عنصر توریم غیرمتحرک است. عدم تحرک توریم در برابر متحرک بودن اورانیوم، اساس بررسی های U-Th عدم تعادل محیط در شدت های هوازدگی می باشد (Dosseto et al., 2007).

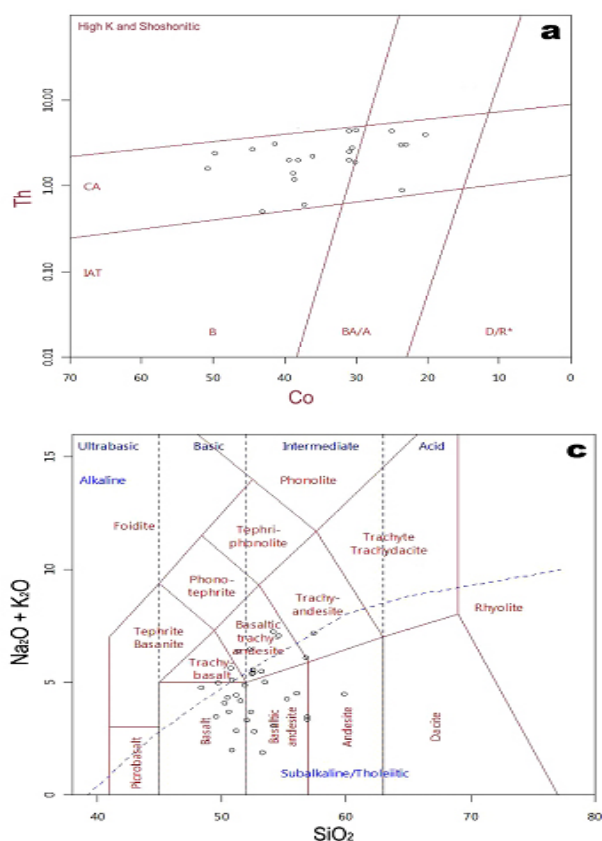
در نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود که در محدوده‌های بازالت و آندزیت ساب‌آلکانل و آلکالی بازالت قرار می‌گیرند (شکل d۸).

بحث

بررسی صحرایی، مطالعات پتروگرافی و آنالیزهای الکترون ماکروپروب نمونه‌های برداشتی از واحدهای سنگ آتشفشانی کرتاسه در منطقه سقز- پیرانشهر، نشان می‌دهد نمونه‌ها از لحاظ ویژگی‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و حتی دگرگونی و هوازدگی، بسیار مشابه می‌باشند. اما همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۸ مشاهده می‌شود، به جز نمودار a۸ (Hastie et al., 2007) که به خوبی موقعیت نمونه‌ها و ارتباط ژنتیکی آن‌ها را نشان می‌دهد، در سایر نمودارها پراکندگی مشاهده می‌شود. این پراکندگی ناشی از تأثیر هوازدگی و دگرگونی ضعیف بر این سنگ‌ها می‌باشد که سبب نوسان ترکیب شیمیایی، به‌ویژه در عناصر ناسازگار شده است. در نمودار $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ در برابر SiO_2 (LeBas et al., 1989) پراکندگی در موقعیت نمونه‌ها بارز می‌باشد که حاکی از نوسان مقادیر عناصر آلکانل بر اثر پدیده آلبیتی شدن پلاژیوکلازها

با توجه به موارد یاد شده توریم و کبالت، عناصری ایده‌آل برای طبقه‌بندی سنگ‌های آتشفشانی کمانی که دچار هوازدگی و دگرگونی ضعیف شده‌اند، می‌باشند.

در نمودارهای شکل a-d۸ نمونه‌های مورد بررسی در نمودارهای Th-Co (Hastie et al., 2007), $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (Peccerillo and Taylor, 1976), $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ و SiO_2 (LeBas et al, 1989) و $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ (Winchester and Floyd, 1977) ترسیم شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که در نمودار Th - Co بازالتی و آندزیت‌بازالتی در محدوده بازالت‌ها، آندزیت‌های بازالتی و آندزیت‌های کالک‌آلکانل قرار می‌گیرند (شکل a۸). در نمودار $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ ، نمونه‌های بازالتی و آندزیت‌بازالتی پراکنده بوده و در محدوده‌های تولییتی، کالک‌آلکانل و حتی غنی از پتاسیم و شوشونیتی قرار می‌گیرند (شکل b۸). در نمودار مجموع آلکانل در برابر سیلیس (شکل c۸) نیز پراکندگی نمونه‌های مورد مطالعه، بارز بوده و ترکیبات بازالتی تا تراکی آندزیتی و آندزیتی دارای سرشت‌های ساب‌آلکانل و آلکانل را در بر می‌گیرند. در نمودار $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ (Winchester and Floyd, 1977) نیز علی‌رغم استفاده از عناصر کم‌تحرك‌تر، بازهم پراکندگی



شکل ۸ - ترسیم نمونه‌های کالک‌آلکانل مورد بررسی بر روی نمودارهای طبقه‌بندی مختلف:

(a) نمودار (Th-Co) (Hastie et al., 2007); (b) نمودار $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (Peccerillo and Taylor, 1976); (c) نمودار $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ در برابر SiO_2 (LeBas et al., 1989) و (d) نمودار $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ (Winchester and Floyd, 1977). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در سایر نمودارها پراکندگی مشاهده می‌شود. به جز نمودار

در انتها با استفاده از نمودار نوین Co – Th (Hastie et al., 2007) که جانشینی برای نمودارهای معمول TAS ($\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) می باشد و قابلیت قابل ملاحظه ای در تشخیص نوع سنگ ها، سری ماگمایی و روندهای مشاهده شده بر اثر تحولات ماگمایی دارد، نمونه ها به عنوان بازالت، آندزیت بازالتی و آندزیت با سرشت کالک آلکانل تعیین شدند. توان این نمودار در رده بندی سنگ های هوازده و دگرگون شده بسیار قابل توجه است. قابلیت که در مقایسه با نمودارهای رده بندی معمول دیگر مانند نمودار $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (Peccerillo and Taylor, 1976)، نمودار $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ در برابر SiO_2 (LeBas et al., 1989) و نمودار $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ (Winchester and Floyd, 1977) مشاهده نگردد. بنابراین استفاده از آن جهت مطالعه سنگ های آتشفشانی تغییر یافته به ویژه در محیط کمان آتشفشانی پیشنهاد می گردد.

تشکر و قدردانی

در اینجا لازم است تا از زحمات جناب آقای دکتر شهريار محمودی و خانم دکتر موریل ارامبرت (مسئول آزمایشگاه EPMA دانشگاه اسلو) که در انجام مطالعات الکترون میکروپروب مساعدت نمودند، قدردانی شود. همچنین از شرکت مهندسين مشاور تهران پادير، به دليل همكاري در انجام مطالعات صحرایی و بررسی های پتروگرافی منطقه پیرانشهر صمیمانه تشکر می شود.

منابع

- Becker, H., Jochum, K. P. & Carlson, R. W., 2000. Trace element fractionation during dehydration of eclogites from high-pressure terranes and the implications for element fluxes in subduction zones, *Chemical Geology*, 163, 65-99.
- Davoudzadeh, M., Soffel, H., and Schmidt, K., 1981. On the rotation of the Central – East Iran microplate, *N. Jb. Geol. Palaont. Mh.* 3, 108-192.
- Elliott, T., 2003. Tracers of the Slab. Inside the Subduction Factory. American Geophysical Union, *Geophysical Monograph* 138, 23-45.
- Floyd, P. A. and Winchester, J. A., 1978. Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements. *Chemical Geology*, 21, 291-306.
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A. and Mitchell, S. F., 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: Development of the Th-Co discrimination diagram, *Journal of Petrology*, 1-17.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1989. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- LeBas, M.J., Le Maitre, R. W. and Woolley, A. R., 1992. The construction of the total alkali-silica chemical classification of

و تشکیل مقادیر جزئی فلدسپار پتاسیم در زمینه است (شکل ۸). همچنین در نمودار $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ (Winchester and Floyd, 1977) همانند شکل ۶ (Pearce, 1996) نمونه های کالک آلکانل به سوی ترکیبات آلکانل کشیده می شوند، یعنی حتی استفاده از عناصری کم تحرک مانند ایتريم، زیرکنيوم، نیوبوم و تیتانیم نیز مقادیری خطا دارد. بنابراین بسیاری از نمودارهای متداول تعریف شده، برای بررسی سنگ های آتشفشانی برای سنگ های متحول شده در اثر دگرگونی، دگرسانی یا هوازگی، به سادگی قابل استفاده نیستند.

نتیجه گیری

بررسی های صحرایی واحدهای آتشفشانی ساب ولکانیک و آذرآواری کرتاسه در منطقه سفز – پیرانشهر، ویژگی هایی مانند رنگ سبز، تورق ضعیف، درز و شکستگی های فراوان و سطوح هوازده و اکسیده را گاه در کنار ساختارهای دگرشکلی برشی از خود نشان می دهند (شکل ۲).

در مطالعات پتروگرافی نوع این سنگ ها آندزیت و آندزیت بازالتی به همراه سنگ های ساب ولکانیک و آذرآواری مرتبط تعیین شده است. در این سنگ ها کانی های ثانویه فراوانی چون اپیدوت، کلریت، اورالیت (مجموعه ترمولیت – اکتینولیت)، پرهینت، پمپلیت، اسفن، اکسیدهای آهن، کلسیت و کوارتز ثانویه در کنار کانی های اولیه ای چون پلاژیوکلاز، هورنبلند، پیروکسن و اکسیدهای آهن – تیتان مشاهده می گردد (شکل ۳).

در مطالعات الکترون میکروپروب مشخص شد پلاژیوکلازها علی رغم آثار ساخت منطقه ای در برخی نمونه ها و هسته های اپیدوتی و گاه کلسیتی شده، ترکیبی در حد آلپیت دارند و تحت پدیده آلپیتی شدن (همگن شدگی) قرار گرفته اند، همچنین در زمینه برخی نمونه ها، مقادیر جزئی فلدسپار پتاسیم در کنار سایر کانی های ثانویه مانند انواعی که در مطالعات پتروگرافی ذکر شد، تشکیل شده است (شکل ۴).

مجموعه این تغییرات در نتیجه دگرگونی ضعیفی در حد رخساره شیبست سبز که سنگ های منطقه را تحت تأثیر قرار داده ایجاد شده است. علاوه بر این، هوازگی شدید در کنار درز و شکستگی های فراوان موجود نیز سنگ های مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده و سبب تحول ژئوشیمیایی و تحرک برخی عناصر شده است.

در ادامه مطالعات و در بررسی های ژئوشیمیایی، استفاده از نمودارهای مختلف ژئوشیمیایی برای تعیین محیط ژئوتکتونیک، سرشت ماگمایی و نوع سنگ، با مشکلاتی همراه بوده و در نمودارهای معمول رده بندی، نمونه ها پراکندگی نشان می دادند. با استفاده از نمودار عنکبوتی و مقایسه آن با نمونه های ارائه شده توسط Winter (2001) با توجه به آنومالی منفی Nb، محیط تکتونیک تشکیل این سنگ ها به صورت کمان آتشفشانی و سرشت آن ها در نمودار $\text{Th}/\text{Yb} - \text{Ta}/\text{Yb}$ (Pearce, 1982) کالک آلکانل تعیین شد.

volcanic rocks. *Mineralogy and Petrology* 46, 1-22.

–Pearce, J. A. and Cann, J. R., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19, 290-300.

–Pearce, J. A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe, R. S. (ed.) *Andesites*. Chichester: John Wiley, 525-547.

–Pearce, J. A. and Peate, D. W., 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23, 251-285.

–Pearce, J. A., 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: Wyman, D. A. (eds) *Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes 12, 79-113.

–Pearce, J. A. and Parkinson, I. J., 1993. Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis. In: Prichard, H. M., Alabaster, T., Harris, N. B. W. & Neary, C. R. (eds.) *Magmatic Processes and Plate Tectonics (I. G. Gass Memorial Volume)*. Geological Society, London, Special

Publications 76, 373-403.

–Peccerillo, R. and Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81.

–Rickwood, P. C., 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22, 247-263.

–Stocklin, J., 1977. Structural correlation of Alpine ranges between Iran and Central Asia. *Memoire Hors-Serie, No. 8 de la Soc. Geol. de France*, 8, 333-353.

–Shervais, J. W., 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59, 101-118.

–Winchester, J. A. and Floyd, P. A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343.

–Winter, J. D., 2001. *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall, 699 P.