

ژئوشیمی و خاستگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی ترسیری شمال خوسف (شرق ایران)

عافیه خواجه^۱، سید محمد پورمعافی^۱ و سید سعید محمدی^{۲*}
^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

منطقه مورد مطالعه در شمال خوسف در استان خراسان جنوبی و در مرز پهنه زمین‌درز سیستان با بلوک لوت واقع شده است. در این محدوده گدازه‌های متعلق به ترسیر شامل: آندزیت، کوارتز آندزیت، داسیت و ریولیت رخمون دارد. بافت غالب در بیشتر نمونه‌های مطالعه شده پورفیری و گلومروپورفیری است. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ‌های آندزیتی شامل: پلاژیوکلاز، آمفیبول و پیروکسن است که در بعضی نمونه‌ها در خمیره میکرولیتی قرار گرفته‌اند. در کوارتز آندزیت و داسیت‌های منطقه نیز پلاژیوکلاز، بیوتیت، آمفیبول و کوارتز به صورت فنوکریست وجود دارد. ریولیت‌ها از کوارتز، آلکالی‌فلدسپار و پلاژیوکلاز تشکیل شده‌اند. وجود بافت غربالی، منطقه‌بندی، حاشیه رشد مجدد و ماکل‌های ترکیبی و ناقص در فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، خوردگی خلیجی و گردشگری در بلورهای کوارتز و حاشیه واکنشی در آمفیبول‌ها نشان‌دهنده عدم تعادل حین انجماد ماگما است. سنگ‌های مورد بررسی از نظر ژئوشیمیایی، کالک‌آلکان پتاسیم متوسط تا بالا هستند که دارای غنی‌شدگی در LILE و آنومالی منفی Ta، Nb و Ti بوده و نشان‌دهنده ماگمای مرتبط با فرورانش و متعلق به حاشیه فعال قاره‌ای است. در نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت، غنی‌شدگی گروه LREE نسبت به HREE مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد ماگمای مادر این سنگ‌ها از ذوب بخشی گوشته غنی‌شده به وسیله سیالات مرتبط با رسوبات فرورونده منشأ گرفته است. واژه‌های کلیدی: سنگ‌های آتشفشانی ترسیر، کالک‌آلکان، حاشیه فعال قاره، شمال خوسف، بلوک لوت

مقدمه

پهنه زمین‌درز سیستان واقع شده است (Darvishzade, 2006). بلوک لوت یکی از نه پهنه ساختاری در طبقه‌بندی اشتوکلین است (Stocklin, 1968). در بعضی از پژوهش‌ها با توجه به کمپلکس‌های افیولیتی در شرق ایران که بین

منطقه مطالعه شده در ۱۵ کیلومتری شمال خوسف و در موقعیت طول‌های جغرافیایی ۴۷° ۵۸' تا ۵۹° ۰۰' و عرض‌های جغرافیایی ۵۲° ۳۲' تا ۳۳° ۰۰' و در مرز بلوک لوت با انتهای شمال‌غربی

زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰:۱ خوسف قرار گرفته است (Vahdati Daneshmand and Kholghi, 1988). واحدهای سنگی عمده که در منطقه وجود دارد در محدوده سنی کرتاسه بالایی تا نئوژن قرار می‌گیرد و شامل: بخش‌های جزئی متعلق به آمیزه افیولیتی، رسوبات شبه فلیش، سنگ آهک‌های آلئولینا و نومولیت‌دار و سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ترسیر است (شکل ۱). در این منطقه فعالیت تکتونیکی شدید بوده و مرز اغلب واحدهای سنگی به صورت گسلی است. قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه مربوط به مجموعه‌های افیولیتی هستند. لیستونیت‌ها نیز در مجاورت توده‌های اولترامافیک قرار گرفته و با رنگ نارنجی تا قهوه‌ای مشخص است. با توجه به مطالعات انجام شده روی لیسونیت‌های شرق ایران، آنها را حاصل دگرسانی بخش‌های اولترامافیک مربوط به مجموعه‌های آمیزه افیولیتی می‌دانند (Zarrinkoub *et al.*, 2004). توده‌های نفوذی گرانیات آکالان و گرانودیوریت نیز در منطقه رخمون دارد. سنگ آهک‌ها که حاوی فسیل‌های آلئولینا و نومولیت هست با واحدهای ریوداسیتی پوشیده شده‌اند که نشان‌دهنده قدیمی‌تر بودن آنها نسبت به سنگ‌های آتشفشانی است. عمده‌ترین واحدهای سنگی منطقه را سنگ‌های آتشفشانی ترسیر (پالئوسن-ائوسن) که شامل: آندزیت، کوآتز آندزیت، داسیت و ریولیت است تشکیل می‌دهد. در این میان، آندزیت‌ها از فراوانی بیشتری برخوردار بوده و بیشتر به صورت گدازه و دایک در منطقه رخمون دارد. سنگ‌های اسیدی ریولیتی و داسیت دارای اشکال گنبدی بوده و دارای گسترش کمتری نسبت به آندزیت‌ها است. توف‌های آندزیتی نیز گسترش چشم‌گیری دارد که اغلب توسط گدازه‌ها پوشیده شده و در بعضی موارد به صورت متناوب با آندزیت‌ها قرار گرفته‌اند. در بعضی قسمت‌ها در آندزیت‌ها زینولیت‌هایی وجود دارد که به شدت

صفحات قاره‌ای لوت و افغان قرار گرفته‌اند، فرورانش لیتوسفر اقیانوسی به زیر بلوک افغان مطرح شده است (Saccani *et al.*, 2010). از سوی دیگر، Eftekharnazhad (۱۹۸۱) ماگماتیسم‌های شمال بلوک لوت را نتیجه فرورانش به زیر بلوک لوت دانسته است. اما به تازگی در پژوهش‌های انجام شده با توجه به داده‌های جدید عناصر کمیاب و ژئوشیمی ایزوتوپی گرانیوتئیدهای بلوک لوت و شواهد ساختاری، فرورانش دو سویه نامتقارن به زیر هر دو بلوک لوت و افغان با سرعت‌های متفاوت پوسته اقیانوسی در نظر گرفته شده است (Arjmandzadeh *et al.*, 2011). با توجه به سن‌سنجی‌های انجام شده بر روی آکالی بازالت‌های میوسن تا کواترنری منطقه لوت-سیستان، برخورد بین بلوک لوت و افغان به زمان کرتاسه پسین نسبت داده شده است (Pang *et al.*, 2012). ماگماتیسم شرق ایران بیشتر شامل سنگ‌های آتشفشانی ائوسن-الیگوسن است که به صورت گدازه و سنگ‌های آذرآواری رخمون دارند (Pang *et al.*, 2013). سنگ‌های منطقه مطالعه شده نیز بخشی از ماگماتیسم شرق ایران و ناحیه لوت-سیستان است.

ماگماتیسم ترسیر منطقه بیرجند-خوسف تاکنون توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Elahpour, 1996; Hazrati, 2008; Mohammadi *et al.*, 2011; Yousefzadeh, 2009; Zarrinkoub *et al.*, 2011; Salimi, 2011; Khaki *et al.*, 2012). با توجه به این که تاکنون مطالعات پترولوژیکی در مورد سنگ‌های آتشفشانی شمال خوسف انجام نشده است؛ این پژوهش با هدف بررسی ژئوشیمی و جایگاه تکتونیکی این سنگ‌ها انجام شده است.

زمین‌شناسی منطقه

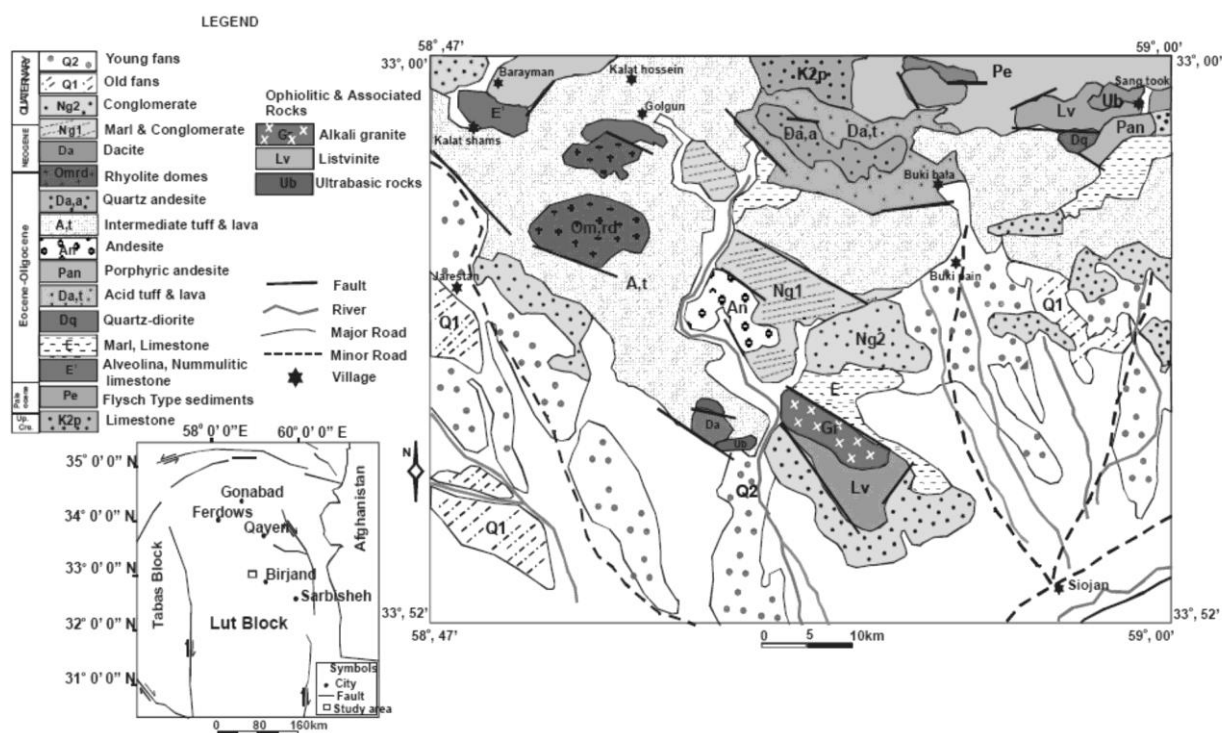
منطقه مطالعه شده در محدوده نقشه

اندازه‌گیری عناصر اصلی (گروه 4A) و ICP-MS (طیف‌سنج جرمی) برای اندازه‌گیری عناصر کمیاب و نادر خاکی (گروه 4B) به آزمایشگاه ACME کانادا ارسال شد. میزان دقت دستگاه برای عناصر اصلی ۰/۰۱ درصد، برای عناصر کمیاب ۰/۱ ppm و در مورد عناصر نادر خاکی ۰/۰۱ ppm است. از آنجا که روش XRF برای اندازه‌گیری عناصر اصلی دقیق‌تر بوده و میزان سیلیس نقش اساسی در نامگذاری سنگ‌ها و تفسیر داده‌ها دارد، میزان SiO_2 نمونه‌ها با روش XRF در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران نیز اندازه‌گیری شد. ترسیم نمودارهای ژئوشیمیایی با کمک نرم‌افزارهای ICP-ES (طیف‌سنج نشری) برای

دگرسان شده‌اند. واحدهای سنگی منطقه تحت تأثیر دگرسانی قرار گرفته‌اند که شاخص‌ترین آن کلریتی شدن است.

روش انجام پژوهش

برای انجام این پژوهش طی عملیات صحرائی و نمونه‌برداری سیستماتیک، تعداد ۹۰ نمونه سنگی برداشت شد. از بین نمونه‌های برداشت شده تعداد ۶۰ مقطع نازک تهیه و مورد مطالعه دقیق پتروگرافی و کانی‌شناسی قرار گرفت. سپس با توجه به تنوع سنگ شناختی منطقه، تعداد ۱۴ نمونه که دگرسانی کمتری داشت برای انجام تجزیه شیمیایی با روش ICP-ES (طیف‌سنج نشری) برای



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی شمال خوسف، ساده شده بر اساس نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ خوسف (Vahdati Daneshmand and Kholghi, 1988) و موقعیت آن در بلوک لوت، برگرفته از Karimpour و همکاران (۲۰۱۱) که با مربع نشان داده شده است.

بر روی سنگ‌های آتشفشانی منطقه شمال خوسف، آنها را در انواع آندزیت، داسیت و ریولیت

سنگ‌شناسی

با توجه به بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده

مسیر صعود به سطح در صورتی که سرعت به اندازه کافی کند باشد، ناپایدار شده و با مذب اطرافش که در اثر کاهش فشار، محتوای آب آن کاهش یافته واکنش می‌دهد (Brown and Gardner, 2006).

در نمونه آندزیت بازالتی، فنوکریست‌های پیروکسن نیمه شکل‌دار و دارای ماکل نواری بوده و تجمعات آنها سبب ایجاد بافت گلومروپورفیری شده است. در بعضی از مقاطع که ریزدانه و دارای بافت تراکیتی‌اند، پیروکسن‌ها به صورت صلیبی دیده می‌شود (شکل ۲-E) که با توجه به خمیره میکرولیتی شیشه‌ای در این نمونه‌ها، می‌توان به سرعت به نسبت بالای سرد شدن ماگما اشاره نمود.

داسیت‌ها: به صورت گنبدی با رنگ خاکستری روشن وجود دارد. بافت اصلی این سنگ‌ها پورفیری با خمیره ریزدانه و بافت فرعی پویی‌کلیتی و سری‌ایت نیز در آنها وجود دارد. فنوکریست‌های تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها شامل: پلاژیوکلاز از نوع الیگوکلاز-آندزین، هورنبلند، بیوتیت و کوارتز است. در بین این کانی‌ها پلاژیوکلاز با درصد حجمی ۶۰ درصد، فراوان‌ترین فنوکریست است که در اندازه‌های ۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌متر، ماکل‌دار و دارای دگرسانی بوده و بافت غربالی، منطقه‌بندی عادی، جذب‌شدگی و پرشدگی نشان می‌دهد. بیوتیت‌ها با اندازه‌های متفاوت ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر، ۱۵ تا ۲۵ درصد فنوکریست‌ها را تشکیل داده و در حاشیه خورده‌شدگی نشان می‌دهد. هورنبلند در اندازه‌های ۰/۱ تا ۰/۳ میلی‌متر و به صورت بلورهای لوزی‌شکل کاملاً اپاسیته شده و به رنگ قهوه‌ای مشاهده می‌شود. تعداد اندکی از فنوکریست‌ها را کوارتزهای گردشده تشکیل می‌دهد (شکل ۲-F) که در اطراف، حاشیه‌های

طبقه‌بندی کرده و ویژگی‌های آنها را تشریح می‌نماییم.

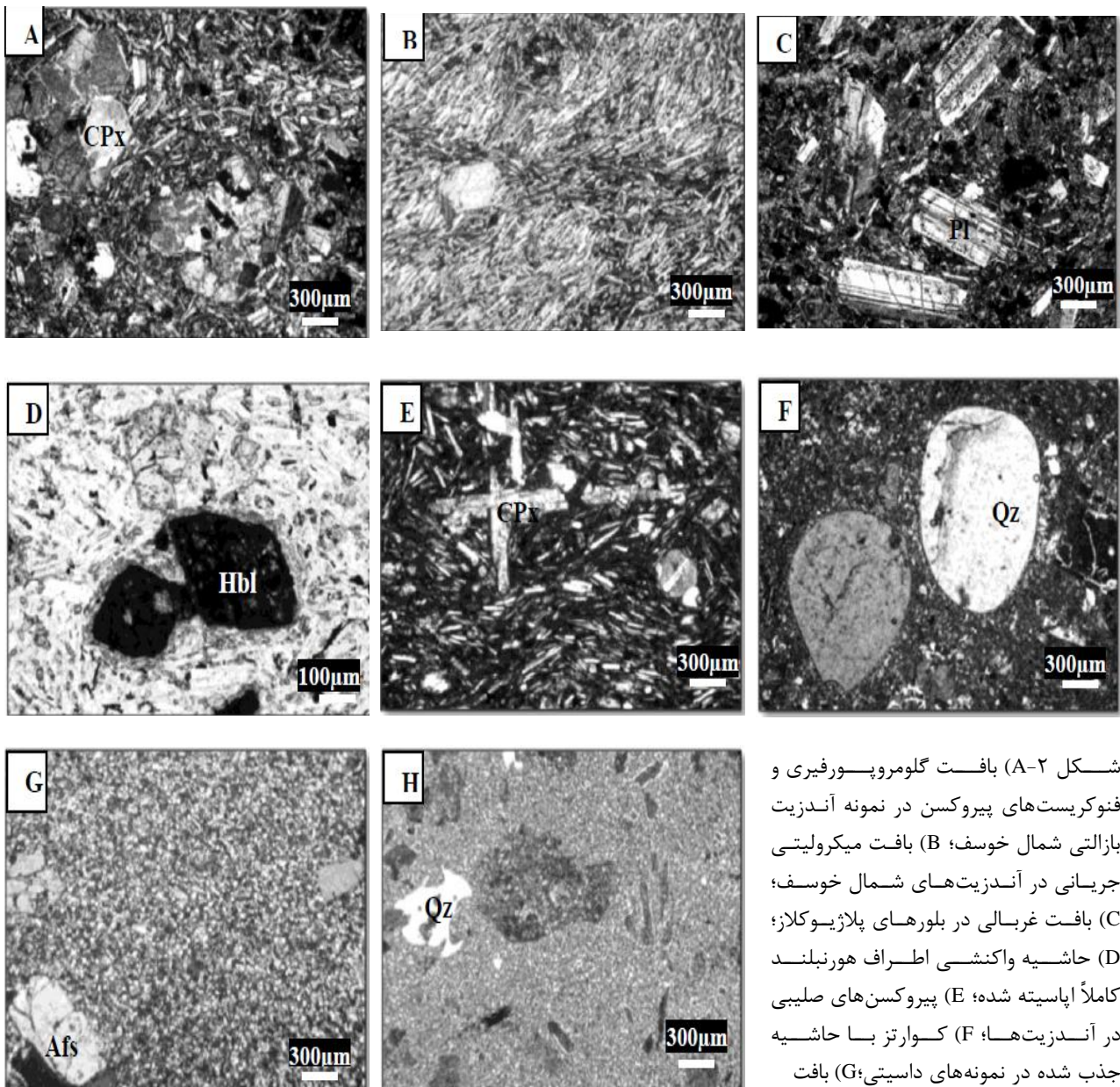
آندزیت‌ها: در منطقه مورد مطالعه متنوع بوده و در محدوده آندزیت بازالتی، آندزیت، تراکی‌آندزیت و کوارتزآندزیت قرار می‌گیرد. آندزیت‌ها ریزدانه بوده و به رنگ‌های تیره تا خاکستری دیده می‌شود. بافت اصلی و عمده در آنها پورفیری با خمیره میکرولیتی است. گاهی در آندزیت‌بازالت‌ها بافت گلومروپورفیری مشاهده می‌شود (شکل ۲-A). بافت‌های دیگر در این سنگ‌ها شامل: تراکیتی (شکل ۲-B)، پیلوتاکسیتیک و پویی‌کلیتی‌ک است. فنوکریست‌های تشکیل‌دهنده آندزیت‌های منطقه شامل: پلاژیوکلاز، هورنبلند و پیروکسن است. خمیره نیز از میکرولیت‌های پلاژیوکلاز، کانی‌های ثانویه مانند: کلسیت، اکسیدهای آهن و کانی‌های کدر تشکیل شده است. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز از نوع آندزین در اندازه‌های ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر و شکل‌دار هستند. منطقه‌بندی عادی، ماکل‌های کارلسباد و پلی‌سنتتیک، بافت غربالی (شکل ۲-C)، آثار انحلال و رشد مجدد از دیگر ویژگی‌های این کانی در این سنگ‌ها است.

هورنبلند فراوان‌ترین کانی مافیک در بیشتر سنگ‌های آندزیتی منطقه است که شکل‌دار بوده و در اندازه‌های متوسط ۰/۳ میلی‌متر وجود دارد و در تمامی نمونه‌ها اکسید و اپاسیته شده است. در نمونه آندزیت بازالتی علاوه بر اپاسیته شدن، حاشیه واکنشی نیز مشاهده می‌شود (شکل ۲-D). این حاشیه ریزدانه بوده و از کانی‌های پیروکسن به همراه اکسیدهای آهن تشکیل شده است. یک واکنش عمده که طی صعود ماگما روی می‌دهد تجزیه کانی‌های آب‌داری چون هورنبلند است که در ساختمان خود حدود ۲٪ حجمی آب دارد و در عمق مخزن ماگمایی متبلور می‌شود. این کانی در

شامل: کوارتز، کانیه‌های حاصل از دگرسانی و کربنات است. فنوکریست‌های تشکیل‌دهنده شامل: کوارتز، آلکالی‌فلدسپار (سانیدین)، پلاژیوکلاز (الیگوکلاز-آلبیت) و شکل‌های دروغین کانیه مافیک پر شده با اکسید آهن و محصولات دگرسانی هستند. کوارتز در این سنگ‌ها دارای بافت خلیجی و حاشیه‌های جذب شده قوی است (شکل ۲-H).

جذب شده داشته و گاهی از حاشیه و مرکز بلور خلیجی شده‌اند. خمیره از کوارتزهای ریزدانه بی‌شکل، میکروولیت‌های پلاژیوکلاز و کانیه‌های ثانویه کلسیت تشکیل شده است.

ریولیت‌ها: این سنگ‌ها به صورت گنبد‌های آتشفشانی و به رنگ روشن وجود دارد. دارای بافت پورفیری با خمیره ریزبلورین (شکل ۲-G) بوده که



شکل ۲-A) بافت گلومروپورفیری و فنوکریست‌های پیروکسن در نمونه آندزیت بازالتی شمال خوسف؛ B) بافت میکروولیتی جریان‌ی در آندزیت‌های شمال خوسف؛ C) بافت غربالی در بلورهای پلاژیوکلاز؛ D) حاشیه واکنشی اطراف هورنبلند کاملاً آپاسیته شده؛ E) پیروکسن‌های صلیبی در آندزیت‌ها؛ F) کوارتز با حاشیه جذب شده در نمونه‌های داسیتی؛ G) بافت

پورفیری با خمیره ریزبلورین در نمونه ریولیتی؛ H) کوارتز با بافت خلیجی در ریولیت با خمیره ریز بلورین. (نور در همه شکل‌ها به استثنای D در حالت XPL است و علائم اختصاری کانیه‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰) است.

ژئوشیمی

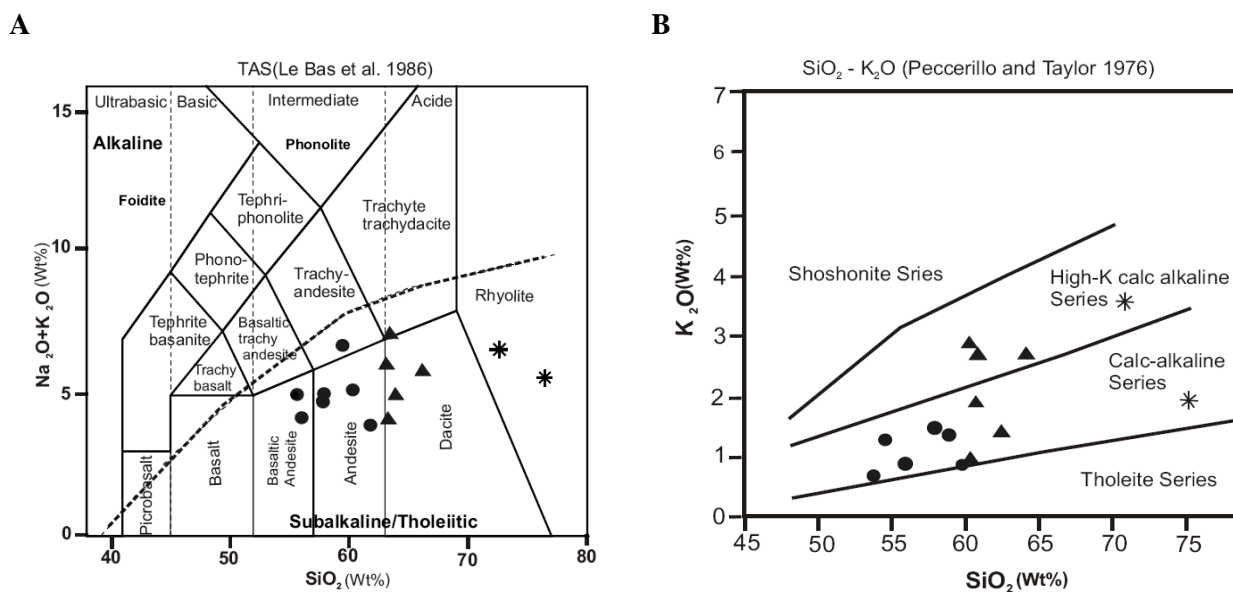
ماگما باشد. دلیل روند نزولی Fe_2O_3 نیز سازگار بودن عنصر آهن طی جدایش ماگمایی است که در کانی‌های مافیک جای می‌گیرد. به طور کلی، روند عناصر اصلی نسبت به سیلیس در نمودارهای هارکر بیانگر فرآیند جدایش از طریق تبلور بخشی است. نمونه‌های منطقه مطالعه شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) (شکل ۵-A) و کندریت (Boynton, 1984) (شکل ۵-B) بهنجار شده‌اند که بر اساس آن غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) نسبت به HFSE مشاهده می‌شود. این غنی‌شدگی می‌تواند ویژگی ماگمای مربوط به فرورانش (Winter, 2001; Wilson, 2007)؛ Gill, 2010) و یکی از ویژگی‌های سنگ‌های آتشفشانی کالک‌آلکان باشد (Gencalioglu Kusu and Geneli, 2010). وجود آنومالی مثبت Pb نشان‌دهنده آرایش ماگما با پوسته قاره‌ای است (Tabatabaei manesh et al.; Kamber et al., 2002). *al.*, 2013 تهی‌شدگی Ba در برخی نمونه‌ها می‌تواند بیانگر تفریق فلدسپارها و یا نقش پوسته قاره بالایی در فرآیندهای ماگمایی باشد (Gencalioglu Kusu and Geneli, 2010). غنی‌شدگی U، Th و همچنین، عناصر گروه LREE نسبت به HREE در نمودارها به ویژگی‌های منشأ وابسته بوده و نشان می‌دهد که ماگمای مادر این سنگ‌ها از ذوب بخشی گوشته غنی‌شده به وسیله سیالات، منشأ گرفته است (Gencalioglu Kusu and Geneli, 2010). غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE همچنین، می‌تواند بر اثر تفریق کانی هورنبلند یا وجود گارنت در منشأ رخ داده باشد (Jahangiri, 2007). ریولیت‌ها در مقایسه با سایر نمونه‌ها، آنومالی منفی Eu را نشان می‌دهد که بیانگر تفریق فلدسپارها بوده و از ویژگی‌های گدازه‌های کالک‌آلکان است (Martin, 1999).

نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های شمال خوسف و موقعیت جغرافیایی آنها در جدول ۱ ارایه شده است. نمونه‌های مطالعه شده در نمودار تغییرات مجموع آلکالی‌ها (Na_2O+K_2O) در برابر سیلیس که توسط Le Bas و همکاران (۱۹۸۶) معرفی شده؛ شامل: ریولیت، داسیت، تراکی آندزیت، آندزیت و آندزیت بازالتی است (شکل ۳-A). این سنگ‌ها بر اساس نمودار تمایزی K_2O در برابر سیلیس (Peccerillo and Taylor, 1976) در محدوده کالک‌آلکان پتاسیم متوسط تا بالا قرار می‌گیرد (شکل ۳-B). در شکل ۴ نمودار تغییرات برخی عناصر اصلی در مقابل سیلیس برای سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده نمایش داده شده است. میزان تغییرات SiO_2 نمونه‌ها از ۵۳/۷۱ تا ۷۴/۴۳ در نوسان است. Na_2O و K_2O در زمره اکسیدهای عناصر ناسازگار بوده و با پیشرفت تفریق، مقدار آنها در مذاب باقی‌مانده افزایش می‌یابد و در نهایت وارد ساختمان فلدسپارها می‌شود. در نمودار Na_2O نسبت به سیلیس روند مشخصی وجود ندارد. اما در نمودار K_2O در مقابل SiO_2 روند افزایشی نمایان است. روند کاهش مقدار Al_2O_3 با افزایش SiO_2 می‌تواند به تبلور پلاژیوکلاز به عنوان یکی از عمده‌ترین فازهای تبلور جز به جز و همچنین، فاز فنوکریست غالب در آندزیت‌ها مربوط باشد (He et al., 2010). روند نزولی CaO در سنگ‌های آتشفشانی شمال خوسف را می‌توان با تحول ترکیب پلاژیوکلازها از کلسیک به سدیک در حین تبلور ماگما نسبت داد که طی آن با تبلور پلاژیوکلازهای کلسیک در مراحل اولیه تبلور، میزان کلسیم ماگما کاهش یافته و با ادامه روند تبلور، بلورهای آلبیت متبلور شده‌اند (Morata and Aguirre, 2003). *Zarasvandi et al.*, 2013). روند کاهش MgO می‌تواند بیانگر تبلور کانی‌های مافیک طی تبلور

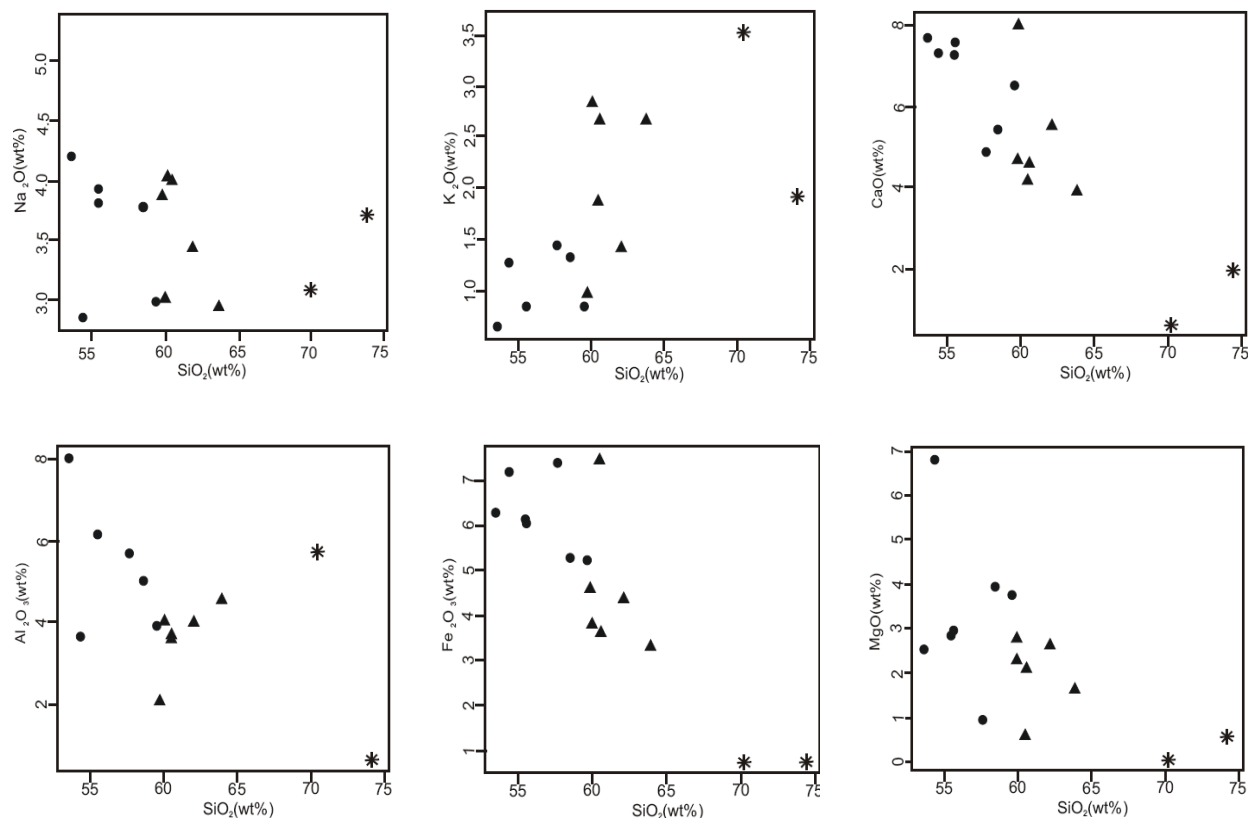
جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی و موقعیت جغرافیایی نمونه‌های شمال خوسف (میزان Total بدون در نظر گرفتن LOI است). مقادیر عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر کمیاب بر حسب ppm است.

Sample No.	At ₁₃	At ₁₆	At ₂₂	As ₃₂	As ₃₃	Ag ₃₉	Ag ₄₀
Rock type	Quartz Andesite	Dacite	Andesite	Andesite	Andesite	Quartz Andesite	Quartz Andesite
Location	N32°54'7" E58°53'29"	N32°54'46" E58°52'32"	N32°55'48" E58°51'25"	N32°58'9" E58°55'42"	N32°58'16" E58°55'47"	N32°58'16" E58°50'37"	N32°58'7" E58°50'25"
SiO ₂	60.02	63.83	54.53	58.63	59.64	59.89	62.14
TiO ₂	0.47	0.34	0.71	0.72	0.64	0.61	0.56
Al ₂ O ₃	17.03	17.61	16.77	18.02	17.00	15.23	17.07
Fe ₂ O _{3T}	3.77	3.29	7.16	5.29	5.25	4.56	4.36
MnO	0.068	0.055	0.088	0.07	0.077	0.057	0.075
MgO	2.23	1.62	6.78	3.92	3.77	2.7	2.63
CaO	4.62	3.92	7.3	5.43	6.5	7.97	5.53
Na ₂ O	3.89	2.93	2.83	3.76	2.99	2.99	3.43
K ₂ O	2.8	2.66	1.27	1.32	0.85	0.95	1.41
P ₂ O ₅	0.25	0.26	0.29	0.18	0.13	0.2	0.17
Total	95.48	96.51	97.72	97.33	96.83	94.88	97.37
Rb	53.2	55.9	36.7	26.3	10.6	24	23.2
Sr	773	698	342	283	411	322	299
Ba	1010	1049	167	285	168	168	183
Cs	3.2	1.6	2.7	1.2	10	2.3	1.7
Zr	48.1	30.6	103.9	152.5	107.3	116.8	154.1
Hf	1.61	1.34	2.69	3.86	2.98	2.92	3.8
Th	6.1	6.1	5.9	4.7	3.3	4.4	5.1
U	2.1	1.4	1.5	1.2	1	0.9	1.3
V	64	74	140	65	94	75	63
Y	8.8	7.8	14.5	12.8	10.9	11.1	12.2
Nb	7.62	7.45	7.75	6.50	5.25	5.90	6.34
Ta	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.5
Ga	15.14	15.81	13.38	13.95	15.12	12.56	13.38
La	19.3	17.3	15.3	10.0	9.5	8.6	10.3
Ce	41.06	36.99	28.29	22.32	20.60	18.63	22.61
Pr	4.6	4	3.1	2.7	2.6	2	2.5
Nd	16.5	14.9	12.6	10.1	9.9	8.4	9.7
Sm	2.6	2.2	2.3	2.1	2.1	1.7	1.8
Eu	0.5	0.5	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6
Gd	2	1.8	2.8	2.3	1.9	1.8	2
Tb	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
Dy	1.8	1.7	2.9	2.6	2.2	2.3	2.4
Ho	0.3	0.3	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5
Er	1	1	1.7	1.5	1.2	1.4	1.4
Tm	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Yb	1.1	1.0	1.6	1.6	1.4	1.4	1.5
Lu	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3

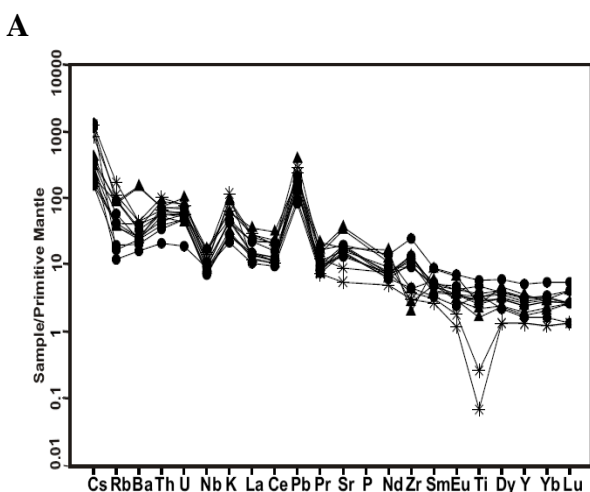
Sample No.	Ag ₄₁	Ag ₄₅	Ag ₄₈	Ag ₅₁	Ab ₅₂	Ab ₅₄	Ab ₅₆
Rock type	Quartz Andesite	Rhyolite	Andesite	Rhyolite	Andesite	Andesite	Andesite
Location	N32°57'51" E58°50'10"	N32°58'47" E58°50'24"	N32°54'16" E58°51'32"	N32°56'45" E58°49'00"	N32°56'49" E58°57'39"	N32°56'52" E58°57'46"	N32°57'8" E58°57'34"
ادامه جدول ۱-.....							
SiO ₂	60.53	74.43	55.58	70.29	55.64	57.77	53.71
TiO ₂	0.55	0.05	0.76	0.01	0.80	1.27	1.03
Al ₂ O ₃	16.72	13.96	19.08	18.90	19.10	18.61	20.82
Fe ₂ O _{3T}	7.45	0.78	6.07	0.82	6.09	7.36	6.27
MnO	0.112	0.042	0.034	0.009	0.104	0.152	0.104
MgO	0.56	0.58	2.87	0.08	2.93	0.88	2.5
CaO	4.18	2.33	7.27	0.69	7.55	4.89	7.66
Na ₂ O	3.99	3.71	3.91	3.1	3.82	5.26	4.19
K ₂ O	1.86	1.91	0.85	3.50	0.83	1.43	0.65
P ₂ O ₅	0.44	0.07	0.23	0.09	0.22	0.6	0.26
Total	96.39	97.86	96.65	96.98	97.08	98.22	97.19
Rb	59.6	71.2	57.2	107.4	12.3	26.2	7.7
Sr	375	186	329	117	377	408	405
Ba	245	308	234	306	140	182	112
Cs	2.7	6.5	8.9	9.9	1.2	1.4	2.7
Zr	22.4	42.5	50.0	34.2	124.6	274.6	141.2
Hf	0.68	1.6	1.71	1.65	2.93	5.64	3.12
Th	7.6	8.5	4.9	5.6	2.9	3.8	1.8
U	1.7	1.6	1.1	1.2	1	1.2	0.4
V	9	4	41	>1	123	57	98
Y	16.2	6	7.4	0.2	14.8	23.1	14.4
Nb	12.15	10.66	5.62	9.93	5.09	12.07	6.45
Ta	0.7	0.9	0.3	1.1	0.3	0.7	0.4
Ga	16.63	12.57	14.76	16.67	14.37	16.91	14.48
La	24.4	19.8	10.2	8.3	9.6	15.5	7.1
Ce	54.71	34.15	20.21	18.67	19.67	38.31	17.16
Pr	6	3.4	2.3	2	2.4	4.6	2.1
Nd	22.5	10.4	8.5	6.7	10.5	18.9	9.1
Sm	3.8	1.4	1.5	1.2	2.4	3.9	2.2
Eu	1.1	0.3	0.4	0.2	0.7	1.2	0.7
Gd	3.5	0.9	1.5	0.3	2.7	4.1	2.5
Tb	0.5	0.2	0.2	0.1	0.4	0.7	0.4
Dy	3.4	1	1.6	1	3	4.4	2.8
Ho	0.6	0.2	0.3	0.1	0.6	1	0.6
Er	1.6	0.5	0.9	0.3	1.7	2.8	1.6
Tm	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.3
Yb	1.4	0.6	0.8	0.5	1.6	2.7	1.7
Lu	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.3



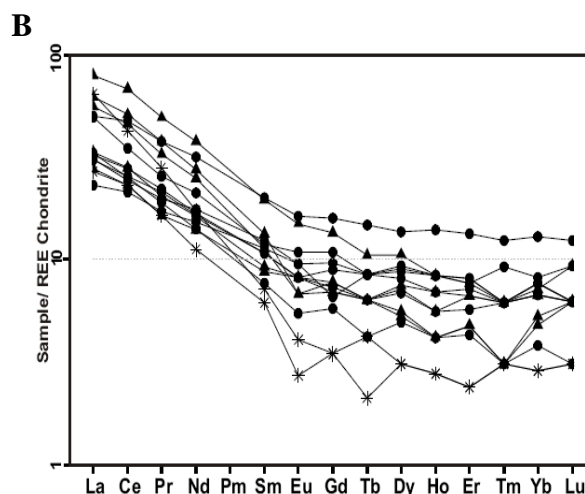
شکل ۳- موقعیت نمونه‌های شمال خوسف؛ (A تغییرات مجموع آلکالی‌ها در برابر سیلیس (Le Bas et al., 1986)؛ B نمودار تمایزی K₂O در برابر سیلیس (Peccerillo and Taylor, 1976))



شکل ۴- نمودارهای تغییرات عناصر اصلی نسبت به SiO₂ برای سنگ‌های آتشفشانی شمال خوسف (●: آندزیت، ▲: داسیت (کوآرتز آندزیت)، *: ریولیت)



شکل ۵- A) نمودار چند عنصری بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه برای نمونه‌های شمال خوسف (Sun and Donough, 1989)؛ B) نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت (Boynton, 1984)



بالای عناصر LILE و LREE در سنگ‌های آتشفشانی است. این ویژگی‌ها به حضور ترکیبات پیوسته‌ای در منشأ گوشته سنگ‌ها نیاز دارد که می‌تواند ناشی از فرآیندهای مرتبط با فرورانش باشد. در حاشیه صفحات همگرا ترکیب اولیه گوه گوشته‌ای به وسیله اضافه شدن ترکیبات مرتبط با فرورانش تغییر می‌کند. مذاب‌ها یا سیالات آزاد شده از رسوبات فرورانده، موب‌ها و یا ترکیبی از این موارد از جمله ترکیبات مرتبط با فرورانش است که می‌تواند باعث تغییر ترکیب گوشته شود (Edwards *et al.*; McCulloch and Gamble, 1991; Elliott *et al.*; Hawkesworth *et al.*, 1997; Class *et al.*, 1997; Turner *et al.*, 1997; Hochstaedter *et al.*, 2000; Munker, 2000; Nakamura and Iwamori, 2009).

عناصر LREE مانند: La, Ce, Nd, Pr و توریم در سیالات قابلیت تحرک بالایی ندارند اما رسوبات از این عناصر غنی شده هستند (Elliott *et al.*, 1997). غنی‌شدگی عناصر LILE نسبت به عناصر HFSE در نمونه‌های بررسی شده می‌تواند به علت تأثیر سیال‌ها یا مواد مذاب حاصل از صفحه فرورانده بر روی گوه گوشته‌ای باشد (Green,

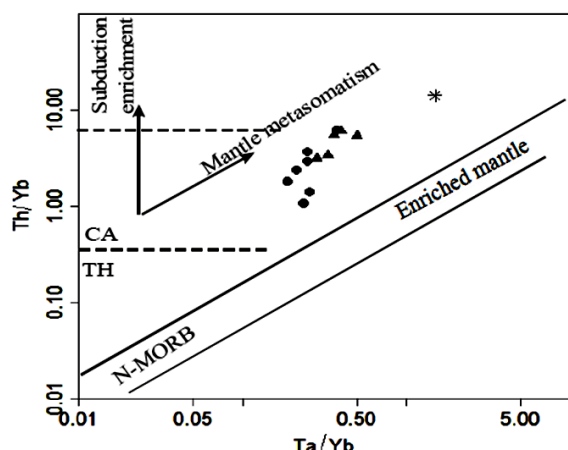
بحث

با توجه به نمودار نسبت Th/Y در مقابل Nb/Y که توسط Pearce (۱۹۸۳) ارائه شده است؛ نمونه‌های منطقه بررسی شده در محدوده بین گوشته تغییر یافته و غنی‌شدگی فرورانش قرار گرفته‌اند (شکل ۶). این ویژگی، نشان‌دهنده منشأ گوشته متاسوماتیسم شده به وسیله سیالات است. هر چه نسبت Th/Y در سنگ‌ها بالاتر باشد، بیانگر این است که گوشته به مقدار بیشتر توسط غنی‌شدگی پهنه فرورانش تحت تأثیر قرار گرفته است (Gencalioglu Kuscı and Geneli, 2010).

در نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 1983) نمونه‌های منطقه مطالعه شده در محدوده کالک‌آلکان معرفی شده توسط McCulloch و Gamble (۱۹۹۱) قرار گرفته و از روند گوشته متاسوماتیسم شده پیروی می‌کند (شکل ۷). نسبت بالای Th/Yb ممکن است ویژگی یک منشأ متاسوماتیسم شده طی غنی‌شدگی فرورانش و یا مرتبط با آرایش پیوسته یا هر دو فرآیند باشد (Gencalioglu Kuscı and Geneli, 2010).

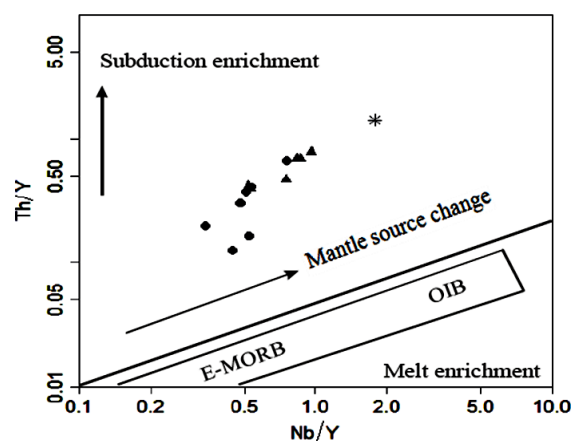
از جمله مواردی که برای تفسیر متاسوماتیسم گوشته و مذاب حاصل از آن ذکر شده، محتوای

فرورونده، بالاترین نقش را داشته و نمونه‌ها در راستای روند مربوطه قرار گرفته‌اند (شکل ۸) (Ersoy *et al.*, 2010). همچنین، در نمودار REE نیز شیب منفی نمودار و به ویژه طرح مقعر رو به بالا برای HREE‌ها می‌تواند ویژگی‌ای برای نشان دادن نقش هورنبلند یا گارنت در خاستگاه این سنگ‌ها باشد. حضور گارنت در منشأ ماگما (Patino *et al.*, 2000) و درجه ذوب بخشی پایین در گوشته اولیه، به وسیله تمرکز بالای عناصر فرعی ناسازگار و غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE (Wass and Rogers, 1980) مشخص شده است.



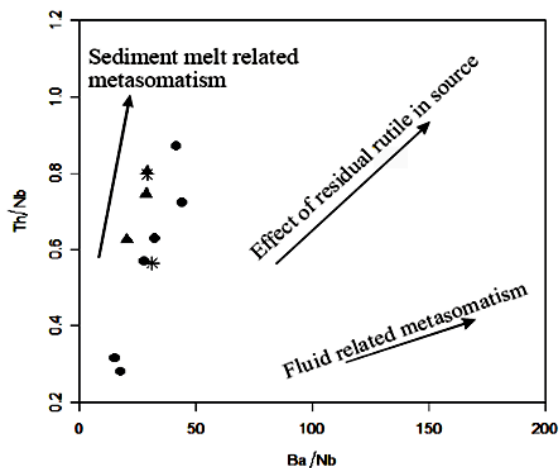
شکل ۷- دیاگرام Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 1983) برای نمونه‌های شمال خوسف (محدوده کالک‌آلکان برگرفته از McCulloch و Gamble (۱۹۹۱) است).

2006). سیال‌های آب‌دار منتج از صفحه فرورونده برخی از عناصر ناسازگار را از پوسته فرورانده به گوشته زیر قاره‌ای در ناحیه کمان منتقل می‌کند (Hermann *et al.*, 2006). اضافه شدن رسوبات پلاژیک و یا پوسته اقیانوسی دگرسان شده به منبع ذوب شدگی، سبب ایجاد آنومالی مثبت U و Th در نمودارهای عنکبوتی (شکل ۵-A) می‌شود (Fan *et al.*, 2003). با توجه به ویژگی‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های مطالعه شده و نمودارهای ترسیم شده می‌توان چنین نتیجه گرفت که در خاستگاه نمونه‌های بررسی شده از بین اجزای فرورانشی، متاسوماتیسم مرتبط با رسوبات



شکل ۶- دیاگرام Th/Y در مقابل Nb/Y برای نمونه‌های شمال خوسف (Pearce, 1983)

شکل ۸- نمودار Th/Nb در برابر Ba/Nb برای سنگ‌های آتشفشانی شمال خوسف (Ersoy *et al.*, 2010)



جایگاه تکتونیکی

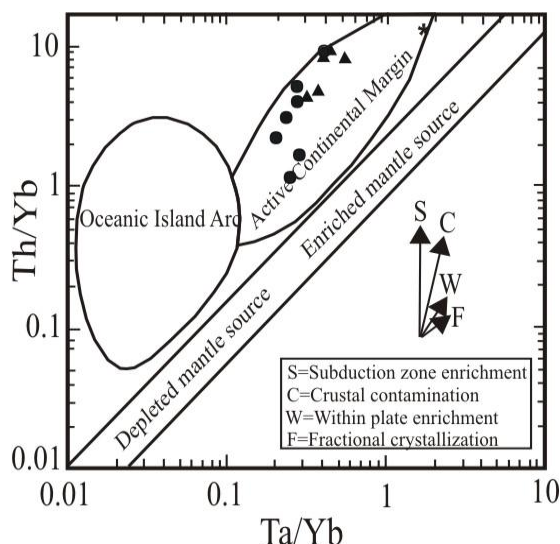
سنگ‌های آتشفشانی کالک‌آلکان (آندزیت-داسیت-ریولیت) محصولات عمده محیط‌های تکتونیکی مرزهای صفحات همگرا (قوس جزیره و حاشیه‌های قاره‌ای فعال) بوده (Harangi *et al.*, 2007) و ترکیب آنها در این گونه محیط‌ها به فرآیندهای داخلی در مرزهای همگرا بستگی دارد (Gill, 2010). همان گونه که در بخش ژئوشیمی بیان شد؛ ویژگی‌های شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی شمال خوسف نظیر: غنی‌شدگی LILE، LREE و آنومالی منفی Nb و Ti بیانگر ماگماهای وابسته به فرورانش است (Wilson, 2007؛ Gencalioglu (Kuscu and Geneli, 2010). ماگماها در حواشی قاره‌ای فعال از میزان سیلیس بیشتری برخوردار بوده و عموماً دارای ترکیب آندزیتی-داسیتی و میزان پتاسیم بالاتری هستند؛ اما ماگماهای جزایر قوسی بیشتر ترکیب آندزیت بازالتی دارد و دارای میزان پتاسیم کمتری است (Stern, 2002). بر این اساس، سنگ‌های آتشفشانی شمال خوسف، مشابهت بالایی با حاشیه‌های فعال قاره‌ای نشان می‌دهد.

به اعتقاد Pearce و Norry (۱۹۷۹) از نسبت عناصر کمیاب Zr/Y می‌توان برای تشخیص رژیم تکتونیکی استفاده نمود. به این صورت که مقادیر $Zr/Y > 3$ به کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای و مقادیر $Zr/Y < 3$ به کمان‌های آتشفشانی اقیانوسی تعلق دارد. سنگ‌های آتشفشانی شمال خوسف دارای نسبت Zr/Y بیشتر از ۳ بوده و در گروه قوس‌های آتشفشانی قاره‌ای قرار می‌گیرد. از نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb معرفی شده توسط Pearce (۱۹۸۳) نیز برای تشخیص جایگاه تکتونیکی سنگ‌های آتشفشانی شمال خوسف استفاده شد. برای تمایز گوه گوشته و پوسته فرورونده و رسوبات

از یکدیگر با به کارگیری نسبت‌های عناصر نادر Th/Yb-Ta/Yb دو نکته مد نظر قرار می‌گیرد (Pearce, 1983). نخست آن که با قرار دادن Yb در مخرج کسر برای هر دو محور قائم و افقی نمودار، اثرات ذوب بخشی و تبلور بخشی در شکل‌گیری ماگما به حداقل می‌رسد و در مرحله دوم، با استفاده از دو عنصر بسیار ناسازگار در صورت کسر برای هر دو محور قائم و افقی نمودار، می‌توان در مورد این که آیا سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده به گوشته غنی‌شده و یا گوشته تهی‌شده مربوط هستند؛ نتایج خوبی را ارائه داد (Zarasvandi *et al.*, 2013). بر پایه این نمودار، مشخص شد که سنگ‌های مطالعه شده به حاشیه قاره‌ای فعال متعلق بوده (شکل ۹) و ماگمای مادر آنها در اثر ذوب بخشی منشأ گوشته غنی‌شده حاصل شده است. نسبت Th/Yb برای سنگ‌های بررسی شده نسبت به گوشته بالاتر بوده که به فرآیندهای وابسته به فرورانش نسبت داده می‌شود. همان گونه که ملاحظه می‌گردد، نمونه ریولیتی نسبت به سایر نمونه‌ها آلودگی پوسته‌ای واضح‌تری را نشان می‌دهد. ماگماهای کمان به طور عمده در اثر ذوب بخشی در گوه گوشته‌ای وابسته به فرورانش، به دلیل اضافه شدن اجزای متاسوماتیک آزاد شده از لیتوسفر اقیانوسی فرورونده به وجود می‌آید. صفحه فرورونده و رسوبات همراه آن با فرورفتن در گوشته، جریان‌های سیالات آبدار تولید می‌نماید که به صورت یک کاتالیزور عمل نموده و باعث ذوب بخشی گوه گوشته و حمل LILE و LREE می‌شود (Pearce and Peate, 1995؛ Hoang *et al.*, 2011). بنابراین، گدازه‌های شمال خوسف شاید از ذوب بخشی گوه گوشته‌ای که در اثر تماس با سیالات مشتق شده از پوسته اقیانوسی فرورونده سیستان، از عناصر کمیاب غنی شده است، منشأ گرفته باشد.

نتیجه‌گیری

مشخص‌کننده محیط تکتونیکی بر مبنای عناصر کمیاب نیز محیط تشکیل این سنگ‌ها را قوس آتشفشانی با ویژگی‌های ماگماتیسم مرتبط با فرورانش مناطق قاره‌ای معرفی می‌نماید.



شکل ۹- نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb برای تشخیص جایگاه تکتونیکی سنگ‌های آتشفشانی شمال خوسف (Pearce, 1983).

سپاسگزاری

نگارندگان از گروه زمین‌شناسی دانشگاه بیرجند به خاطر مساعدت در استفاده از امکانات آزمایشگاهی و به ثمر رسیدن این پژوهش کمال تشکر را دارند.

با توجه به بررسی‌های پتروگرافی و ژئوشیمیایی انجام شده، سنگ‌های منطقه شمال خوسف در انواع آندزیت، کوارتزآندزیت، داسیت و ریولیت قرار گرفته و از این نظر، مشابهت بالایی با حاشیه‌های فعال قاره‌ای نشان می‌دهد. روند عناصر اصلی نسبت به سیلیس در نمودارهای هارکر بیانگر فرآیند جدایش از طریق تبلور بخشی است. غنی‌شدگی LILE نسبت به HFSE نشان می‌دهد که ماگمای تشکیل دهنده این سنگ‌ها مرتبط با فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای است. غنی‌شدگی U، Th و همچنین، عناصر گروه LREE نسبت به HREE مؤید این است که ماگمای مادر این سنگ‌ها از ذوب بخشی گوشته حاوی گارنت و غنی‌شده به وسیله سیالات مشتق شده از پوسته اقیانوسی فرورونده سیستان، منشأ گرفته است. وجود آنومالی منفی Eu در نمونه ریولیتی در مقایسه با سایر نمونه‌ها، بیانگر تفریق فلدسپارها است. آنومالی مثبت Pb نشان‌دهنده آرایش ماگما با پوسته قاره‌ای بوده و ویژگی‌های ژئوشیمیایی نمونه ریولیتی آلودگی پوسته‌ای واضح‌تری را نشان می‌دهد. نسبت $Zr/Y > 3$ و نمودارهای

منابع

- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F., Medina, J. M. and Homam, S. M. (2011) Two-sided asymmetric subduction; implications for tectonomagmatic and metallogenic evolution of the Lut block, eastern Iran. *Journal of Economic Geology* 1(3):1-14.
- Boynton, W. V. (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements, Meteorite studies. In: *Rare earth element geochemistry* (Ed. Henderson, P.) *Developments in Geochemistry* 2: 115-152. Elsevier, Amsterdam.
- Brown, B. L. and Gardner, J. E. (2006) The influence of magma ascent path on the texture, mineralogy and formation of hornblende reaction rims. *Earth and Planetary Science Letters* 246: 161-176.
- Class, C., Miller, D. M., Goldstein, S. L. and Langimur, C. H. (2000) Distinguishing melt and fluid subduction components in Umnak volcanics, Aleutian arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 1: 1-34.

- Darvishzade, A. (2006) *Geology of Iran, Stratigraphy, Tectonic, Metamorphism and Magmatism*. Amirkabir Publication, Tehran (in Persian).
- Edwards, C., Morris, J. and Thirlwall, M. (1993) Separating mantle from slab signatures in arc lavas using B/Be and radiogenic isotope systematic. *Nature* 362: 530-533.
- Eftekharneshad, J. (1981) Tectonic division of Iran with respect to sedimentary basins. *Journal of Iranian Petroleum Society* 82: 19-28 (in Persian).
- Elahpour, E. (1996) Petrogenetic and geochemical study of north Birjand volcanism with special survey of its deposit evolution ability. MSc thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (in Persian).
- Elliott, T., Plank, T., Zindler, A., White, W. and Bourdon, B. (1997) Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *Journal of Geophysical Research* 102: 14991-15019.
- Ersoy, E. Y., Helvacı, C. and Palmer, M. R. (2010) Mantle source characteristics and melting models for the early-middle Miocene mafic volcanism in western Anatolia: implications for enrichment processes of mantle lithosphere and origin of K-rich volcanism in post-collisional settings. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 198: 112-128.
- Fan, W., Gue, F., Wang, Y. J. and Lin, G. (2003) Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of postorogenic extension in the northern Da Hinggan mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 121: 115-135.
- Gencalioglu Kuscı, G. and Geneli, F. (2010) Review of post-collisional volcanism in the Central Anatolian volcanic province (Turkey), with special reference to the Tepekoıy volcanic complex, international. *Journal of Earth Sciences* 99: 593-621.
- Gill, R. (2010) *Igneous rocks and processes*. Wiley-Blackwell, Malaysia.
- Green, N. (2006) Influence of slab thermal structure on basalt source regions and melting conditions: REE and HFSE constraints from Garibaldi volcanic belt, northern Cascadia subduction system. *Lithos* 87: 23-49.
- Harangi, S., Downes, H., Thirlwall, M. and Gmeling, K. (2007) Geochemistry, petrogenesis and geodynamic relationships of Miocene calc-alkaline volcanic rocks in the western Carpathian arc, eastern Central Europe. *Journal of Petrology* 48(12): 2261-2287.
- Hawkesworth, C. J., Turner, S. P., McDermott, F., Peate, D. W. and Van Calsteren, P. (1997) U-Th isotopes in arc magmas; implications for element transfer from the subducted crust. *Science* 3512(276): 551-555.
- Hazrati, A. (2008) Petrology and petrography of west Birjand plutonics. MSc thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (in Persian).
- He, Y., Zhao, G., Sun, M. and Han, Y. (2010) Petrogenesis and tectonic setting of volcanic rocks in the Xiaoshan and Waifangshan areas along the southern margin of the north China craton: constraints from bulk-rock geochemistry and Sr-Nd isotopic composition. *Lithos* 114: 186-199.
- Hermann, J., Spandler, C., Hack, A. and Korsakov, A. V. (2006) Aqueous fluids and hydrous melts in high-pressure and ultra-high pressure rocks: implications for element transfer in subduction zones. *Lithos* 92: 399-417.
- Hoang, N., Itoh, J. and Miyagi, I. (2011) Subduction components in Pleistocene to recent Kurile arc magmas in NE Hokkaido, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 200: 255-266.
- Hochstaedter, A., Gill, J., Peters, R., Broughton, P., Holden, P. and Taylor, B. (2001) Across-arc geochemical trends in the Izu-Bonin arc: contributions from the subducting slab. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 2(7): 10-19.

- Jahangiri, A. (2007) Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: geochemical and geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences* 30: 433-447.
- Kamber, B. S., Ewart, A., Collerson, K. D., Bruce, M. C. and McDonald, G. D. (2002) Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 144: 38-56.
- Karimpour, M. H., Stern, C. R., Farmer, L., Saadat, S. and Malekezadeh, A. (2011) Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut block, eastern Iran. *Journal of Geopersia* 1(1):19-36.
- Khaki, Kh., Emami, M. H., Mohammadi, S. S. and Nasre Isfahani, A. (2012) Petrology and tectonic setting of Tertiary igneous rocks in Dokuhe area (south-west of Birjand). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 19(4):735-748 (in Persian).
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27: 745-750.
- Martin, H. (1999) Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos* 46: 411-429.
- McCulloch, M. T. and Gamble, J. A. (1991) Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters* 102: 358-374.
- Mohammadi, S. S., Zarrinkoub, M. H. and Keramati, F. (2011) The geochemistry and petrogenesis of Hossein abad Tertiary volcanic rocks (southwest of Birjand, east of Iran). *Petrology* 2(6): 83-96 (in Persian).
- Morata, D. and Aguirre, L. (2003) Extensional lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29°20' - 30°S), Chile: geochemistry and petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences* 16: 459-476.
- Münker, C. (2000) The isotope and trace element budget of the Cambrian Devil River arc system. New Zealand: identification of four source components. *Journal of Petrology* 41(6): 759-788.
- Nakamura, H. and Iwamori, H. (2009) Contribution of slab-fluid in arc magmas beneath the Japan arcs. *Gondwana Research* 16: 431-445.
- Pang, K. N., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. S., Yang, H. M., Chu, C. H., Lee, H. Y. and Lo, C. H. (2012) Age, geochemical characteristics and petrogenesis of late Cenozoic intraplate alkali basalts in the Lut-Sistan region, eastern Iran. *Chemical Geology* 306-307: 40-53.
- Pang, K. N., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Khatib, M. M., Mohammadi, S. S., Chiu, H. Y., Chu, C. H., Lee, H. Y. and Lo, C. H. (2013) Eocene-Oligocene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: magma genesis and tectonic implications. *Lithos* 180-181: 234-251.
- Patino, L. C., Carr, M. J. and Feigenson, M. D. (2000) Local and regional variations in Central American arc lavas controlled by variations in subducted sediment input. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 138: 265-283.
- Pearce, J. A. (1983) The role of the subcontinental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In: *Continental basalts and mantle xenoliths* (Eds. Hawkes-worth, C. J. and Norry, M. J.) 230-249. Natwich Shiva, Cambridge.
- Pearce, J. A. and Norry, M. J. (1979) Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variation in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69: 33-47.
- Pearce, J. A. and Peate, D. W. (1995) Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Earth and Planetary Science Letters* 23: 251-285.
- Peccerillo, A. and Taylor, S. R. (1976) Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanics rocks from Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58: 63-81.

- Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L. and Amini, S. A. (2010) Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): implication for the evolution of the Sistan ocean. *Lithos* 117: 209-228.
- Salimi, Z. (2011) Petrology and geochemistry of subvolcanic rocks in Feriznook area (northwest of Birjand). MSc thesis, University of Birjand, Birjand, Iran (in Persian).
- Stern, R. J. (2002) Subduction zones. *Reviews of Geophysics* 40(4): 1012-1054.
- Stocklin, J. (1968) Structural history and tectonics of Iran: A review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52: 1229-1258.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematic of ocean basalts: implications for mantle composition and process. In: *Magmatism in the ocean basins* (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) Special Publication 42: 313-345. Geological Society, London.
- Tabatabaei manesh, S. M., Mahmoodabadi, L. and Mirlohi, A. S. (2013) Geochemistry of the Eocene volcanic rocks in the SW of Jandaq (NE of Isfahan province). *Petrology* 4(14): 79-92 (in Persian).
- Turner, S. P., Hawkesworth, C. J., Rogers, N., Bartlett, J., Worthington, T., Hergt, J., Pearce, J. and Smith, I. (1997) $^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$ disequilibria, magma petrogenesis and flux rates beneath the depleted Tonga-Kermadec island arc. *Geochimica et Cosmochimica, Acta* 61: 4855-4884.
- Vahdati Daneshmand, F. and Kholghi, M. H. (1988) Geological Map of Iran 1:100000, sheet 7755-Khusf, Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Wass, S. Y. and Rogers, N. W. (1980) Mantle metasomatism-precursor to alkaline continental volcanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 44: 1811-1823.
- Whitney, D., Evans, B. D. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185-187.
- Wilson, M. (2007) *Igneous Petrogenesis*. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Winter, J. D. (2001) *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Yousefzadeh, M. H. (2009) Petrography, geochemistry and petrogenesis of Birjand-Khusf area Tertiary volcanic rocks with special emphasis on their enclaves. PhD thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (in Persian).
- Zarasvandi, A., Pourkaseb, H., Saki, A. and Karevani, M. (2013) Investigation of petrology and geochemistry of volcanic rocks in the Kasian area, northeast of Khorramabad. *Petrology* 4(14): 39-50 (in Persian).
- Zarrinkoub, M. H., Amini, S., Aftabi, A. and Karimpour, M. H. (2004) Mineralogy, geochemistry, structural position and genetic model for listvinite in east of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 13(2): 363-378 (in Persian).
- Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. S. and Yousefi, F. (2011) Geochemistry and petrogenesis of Givshad volcanic and subvolcanic rocks (southwest of Birjand, east of Iran). *Petrology* 2(7): 39-50 (in Persian).

Geochemistry and Tectonic setting of Tertiary volcanic rocks in north of Khusf (East of Iran)

Afieh Khajeh ¹, Seyyed Mohammad Pourmoafi ¹ and Seyyed Saeid Mohammadi ²

¹ Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

The study area is located in the northern part of Khusf in Southern Khorasan province which borders the Sistan suture zone and the Lut block. Tertiary volcanic lavas outcropped in this area contain andesite, quartz andesite, dacite and rhyolite. These rocks are dominated by porphyric and glomeroporphyric textures. The essential minerals in andesitic rocks are plagioclase, amphibole and pyroxene set in microlitic groundmass in some samples. Rock forming minerals in quartz andesite and dacite include of plagioclase, biotite, amphibole and quartz phenocrysts. Rhyolites are composed of quartz, alkali feldspar and plagioclase. The presence of sieve texture, zoning, regrowing rim, synthetic twinning in plagioclase crystals, rounded and embayed quartz and reaction rim in amphibole crystals refers to non-equilibrium condition during magma crystallization. Geochemically, the studied rocks are calc-alkaline and medium to high-K that are characterized by enrichment in LILE, the negative anomaly of Nb, Ta, Ti which indicate magma relation to subduction zone and active continental margin. Chondrite-normalized pattern shows LREE enrichment relative to HREE suggesting the parental magma could have generated from partial melting of metasomatized mantle by fluid related to subducted sediments.

Key words: Tertiary volcanic rocks, Calc-alkaline, Active continental margin, North of Khusf, Lut block