



## ژئوشیمی و جایگاه تکتونوماگمایی سنگهای آتشفشانی ترشیری منطقه کنگان، شمال شرق سریشه، خراسان جنوبی

مهشید ملکیان دستجردی<sup>۱</sup>، سید سعید محمدی<sup>۱\*</sup>، ملیحه نخعی<sup>۲</sup> و محمدحسین زرین کوب<sup>۱</sup>

(<sup>۱</sup>) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(<sup>۲</sup>) گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲، پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۰۹

### چکیده

منطقه کنگان در شمال شرق سریشه، خراسان جنوبی و حاشیه شرقی بلوک لوت قرار دارد. در این منطقه، گدازه‌های بازالتی بر روی سنگهای حدواسط و اسیدی شامل آندزیت، داسیت، ریولیت (گاهی پرلیتی) رخمون دارد. کانیهای اصلی بازالت شامل پلاژیوکلاز، اولوین و پیروکسن، در آندزیت شامل پلاژیوکلاز، پیروکسن، بیوتیت، آمفیبول و در گدازه‌های اسیدی متشکل از پلاژیوکلاز، کوارتز، سانیدین، بیوتیت و آمفیبول هستند. سنگهای حدواسط و اسیدی ماهیت کالک‌آلکان پتاسیم متوسط تا بالا و بازالت‌ها ماهیت آلکان دارند. غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE ( $Ce/Yb = 21/14-28/7$ )، نسبت  $Zr/Y$  بالا ( $4/79$  تا  $10/81$ )، غنی‌شدگی LILE و آنومالی منفی Eu، Nb، P، Ti، Ba، Sr در گدازه‌های حدواسط و اسیدی بیانگر ماگماتیسم کالک‌آلکان وابسته به فرورانش است. ویژگیهای ژئوشیمیایی نظیر نسبت  $La/Yb$  بالا ( $8/18$ )، محتوای پایین Rb به همراه نمودارهای تمایز محیط زمین‌ساختی، بیانگر محیط درون صفحه‌ای قاره‌ای برای بازالت است. ماگمای سازنده سنگهای مورد بررسی، نتیجه ذوب‌بخشی یک منبع گارنت لروولیتی غنی شده در عمق ۱۰۰ تا ۱۱۰ کیلومتری است.

واژه‌های کلیدی: آندزیت، آلکالی بازالت، حاشیه فعال قاره‌ای، کنگان، بلوک لوت

### مقدمه

ژوراسیک به بعد با نفوذ توده‌هایی مثل سرخ‌کوه آغاز شده و در ترشیری به اوج خود رسیده است، به طوری که سنگهای آتشفشانی ترشیری، به‌ویژه آئوسن، با ضخامت حدود ۲۰۰۰ متر، بیش از نیمی از بلوک لوت را می‌پوشانند (Jung et al., 2011; Karimpour et al., 1983). شرق ایران و به‌ویژه بلوک لوت، به دلیل داشتن موقعیتهای زمین‌ساختی مختلف در زمانهای گذشته، دارای حجم عظیم ماگماتیسم با ویژگیهای ژئوشیمیایی مختلف است. این امر سبب شده تا بلوک لوت توانایی بسیار مناسبی برای انواع کانی‌سازی فلزی و غیر فلزی داشته باشد. بنابراین، درک هر چه بهتر ژئوشیمی و منشأ ماگما در توده‌های مرتبط و یا بدون کانی‌سازی، گامی مهم در جهت اکتشاف کانسارهای مختلف در شرق ایران خواهد بود (Karimpour et al., 2012). در منطقه کنگان در شمال

منطقه کنگان در ۱۲ کیلومتری شمال شرق شهرستان سریشه، در استان خراسان جنوبی بین طولهای جغرافیایی  $8^{\circ} 52'$  تا  $59^{\circ} 38' 38''$  شرقی و عرضهای جغرافیایی  $45^{\circ} 38'$  تا  $32^{\circ} 36' 42''$  شمالی قرار دارد. از دیدگاه تقسیم‌بندی ساختاری ایران، برخی از محققان، این منطقه را در مرز شرقی بلوک لوت (Karimpour et al., 2011; Richards et al., 2012; Karimpour et al., 2012) و عده‌ای آن را در قلمرو زمین‌درز سیستان معرفی کرده‌اند (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983; Saccani et al., 2010; Pang et al., 2012). غلامی (Gholami, 2009) ویژگیهای ساختاری منطقه مورد بررسی را مشابه بلوک لوت دانسته است. ماگماتیسم بلوک لوت از

شرق سربیشه، سنگهای آتشفشانی حدواسط تا اسیدی ائوسن-الیگوسن به همراه بازالت‌های میوسن- پلیوسن رخنمون دارند. در این منطقه، توف‌های بنتونیتی‌شده و باندهای پرلیتی در ارتباط با فعالیت آتشفشانی اسیدی تا حدواسط تشکیل شده‌اند و دارای اهمیت اقتصادی هستند. در گذشته، پژوهش‌هایی توسط محققان مختلف پیرامون پترولوژی سنگهای آتشفشانی منطقه سربیشه انجام شده است (Nazari, 2011; Goodarzi, 2011; Makipour, 2011; Mohammadi, 2012; Pang et al., 2013; Goodarzi et al., 2014; Chahkandi Nejad, 2015). بر اساس بررسی‌های این پژوهشگران، گدازه‌های ترشیری در مناطق حد فاصل بیرجند- سربیشه و اطراف سربیشه دارای ماهیت کالک‌آلکان و عمدتاً در ارتباط با حاشیه قاره‌ای فعال معرفی شده است. به دلیل این‌که در منطقه کنگان در شمال‌شرق سربیشه نیز گدازه‌های ترشیری با ترکیبات سنگی مختلف رخنمون داشته و تاکنون مورد بررسی پترولوژیکی قرار نگرفته است، در این پژوهش سعی شده تا با بهره‌گیری از داده‌های ژئوشیمیایی، منشأ و محیط زمین‌ساختی سنگهای آتشفشانی منطقه کنگان، تعیین شود که این امر به تکمیل نتایج حاصل از بررسی‌های قبلی و همچنین شناخت ماهیت و محیط زمین‌ساختی ماگماتیسم شرق ایران کمک خواهد کرد.

#### زمین‌شناسی منطقه

منطقه کنگان در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سربیشه (Nazari and Salamati, 1999) واقع شده است. در این منطقه سنگهای آذرآواری شامل توف و برش به همراه واحدهای گدازه‌ای متعلق به ائوسن تا پلیوسن رخنمون دارند (شکل ۱). قدیمی‌ترین واحدهای گدازه‌ای موجود در منطقه، شامل آندزیت‌های رخنمون‌یافته در جنوب شرق منطقه و همچنین آندزیت با قاعده پرلیتی است که در شمال‌شرق و شرق روستای کنگان به صورت گنبد‌های منفرد دیده می‌شوند. پیروکسن‌آندزیت با گسترش وسیع در مرکز و شمال تا شمال شرق محدوده مورد بررسی، به شکل گنبد‌های بهم پیوسته و مرتفع رخنمون دارد. فرسایش پوست پیازی، ساخت تافونی، بلوکه شدن و ساختهای پورفیری و حفره‌ای در نمونه دستی آنها قابل مشاهده است. در بخش‌های مرکزی و شمال غربی محدوده مورد بررسی، گدازه‌های داسیتی تا ریولیتی گاهی پرلیتی‌شده، با رنگ‌های روشن بر روی واحدهای آندزیتی و

پیروکسن‌آندزیتی قرار دارند. در شمال‌شرق روستای کنگان، رخنمون کوچکی از پرلیت با رنگ خاکستری روشن تا تیره مایل به سیاه، دارای جلای مرواریدی و بافت پورفیری وجود دارد. واحد بازالتی با گسترش بسیار محدود، در شمال شرق روستای دسته قیچ، با سطح هوازده خاکستری تیره و سطح تازه سیاه رنگ بر روی واحدهای پیروکسن‌آندزیتی برون‌زد دارد. مرز گدازه‌های آندزیتی ائوسن-الیگوسن با واحد بازالتی به دلیل خردشدگی واحدها و وجود واریزه‌های فراوان به سادگی قابل تفکیک نیست، اما شواهدی نظیر خردشدگی و دگرسانی بیشتر در گدازه‌های آندزیتی را می‌توان به قدیمی‌تر بودن آنها نسبت به بازالتها مرتبط دانست. از نظر زمین‌ساختی، منطقه مورد بررسی تحت تأثیر پهنه گسلی سربیشه (Karimi Dehkordi, 2012) و نیز گسل دسته‌قیچ با امتداد کلی N40-50W، سازوکار راست‌گرد، مؤلفه راندگی و شیب شمال شرقی (Gholami, 2009) قرار دارد که سبب گسیختگی واحدهای سنگی و تسهیل فرآیند دگرسانی به‌ویژه در توف‌ها و تشکیل پهنه‌های بنتونیتی شده است.

#### روش مطالعه

پس از برداشتهای صحرائی و نمونه‌برداری، تعداد ۷۷ مقطع نازک تهیه و توسط میکروسکپ پلاریزان بررسی شدند. سپس ۱۵ نمونه از سنگهای دارای حداقل دگرسانی، انتخاب و جهت انجام آنالیز عناصر اصلی به روش ICP و آنالیز عناصر کمیاب به روش ICP-MS به آزمایشگاه ACME کانادا ارسال شد. در تعبیر و تفسیر نتایج آنالیزها و ترسیم نمودارها از نرم‌افزارهای GCDkit و CorelDraw استفاده و ترسیم نقشه زمین‌شناسی منطقه نیز با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS انجام شد.

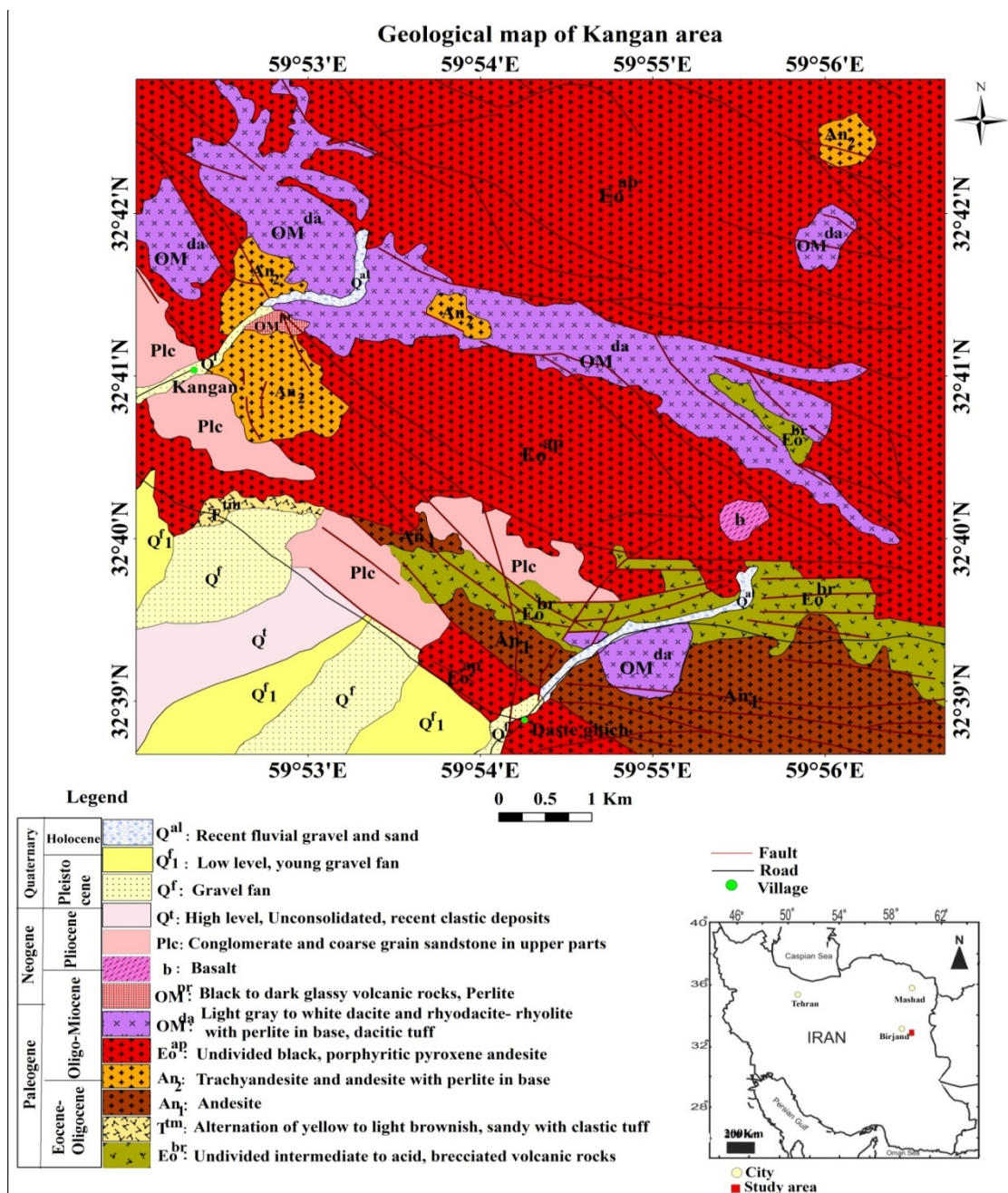
#### سنگ‌نگاری

واحدهای گدازه‌ای منطقه کنگان شامل بازالت، آندزیت، داسیت و ریولیت هستند که در زیر ویژگی‌های سنگ‌نگاری آنها بررسی شده است.

**بازالت:** این واحد دارای بافت پورفیری با زمینه میکروولیتی، گلوپورفیری، پوئیکلیتیک و حفره‌ای است. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز به‌میزان ۴۰ تا ۵۰ درصد، از نوع لابرادوریت و دارای حاشیه واجذبی، منطقه‌بندی، بافت غربالی و خوردگی هستند.

شده است. کلینوپیروکسن نوع اوژیت (شکل ۲-ب) ۲۰ تا ۳۰ درصد حجم فنوکریست‌ها را در بر گرفته‌اند و دارای بافت غربالی است. در زمینه این سنگ، میکرولیت‌های پلاژیوکلاز به‌همراه ریزبلورهای پیروکسن، الیوین و کانیه‌های کدر وجود دارد.

ایجاد تغییرات ناگهانی در فشار، دما و یا ترکیب ماگما، عامل ظهور منطقه‌بندی است (Perugini and Poli, 2012; Ustunisik et al., 2014). در پاره‌ای از موارد فنوکریست‌های پلاژیوکلاز دچار دگرسانی کربناتی شده‌اند. فنوکریست‌های الیوین (شکل ۲-ا) حدود ۳۰ درصد حجم فنوکریست‌ها را تشکیل داده و در برخی از موارد، سرپانتینی



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه کنگان، تهیه شده بر اساس نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ سربیشه (Nazari and Salamati, 1999)، با اصلاحات و ترسیم مجدد

**Fig. 1.** Geological map of Kangan area, based on 1:100000 geological map of Sarbisheh (Nazari and Salamati, 1999), modified and redrawing

**آندزیت‌ها:** بافت این سنگها پورفیری با زمینه میکروولیتی، پوئیکیلیتیک، سری‌ایت، ویتروفیری و حفره‌ای است. پلاژیوکلازها بر مبنای زاویه خاموشی از نوع اولیگوکلاز تا آندزین بوده که ۵۰ تا ۶۵ درصد حجم فنوکریست‌ها را تشکیل داده و اندازه آن از ۰/۲ تا ۸ میلی‌متر متغیر است. این کانی دارای منطقه‌بندی، گردشگی، حاشیه‌واجذبی (شکل ۲-C) و بافت غربالی ریز و درشت (شکل ۲-D) است. بافت غربالی در اثر کاهش ناگهانی فشار یا افزایش دما ایجاد می‌شود؛ به طوری که کاهش فشار، بافت غربالی درشت و افزایش حرارت، بافت غربالی ریز را ایجاد می‌کند (Renjith, 2014). کلینوپروکسن حدود ۱۵ تا ۳۵ درصد حجم فنوکریست‌ها را اشغال نموده و اندازه آنها از ۰/۲ تا ۳/۵ میلی‌متر متغیر است. فراوانی این کانی در برخی نمونه‌ها سبب تمایل آنها به پیروکسن آندزیت شده است. منطقه‌بندی، بافت غربالی (شکل ۲-D) و حاشیه‌های واجذبی از ویژگی‌های این کانی است. آمفیبول نوع هورنبلند (شکل ۲-E و F) و بیوتیت دیگر کانیهای مافیک موجود در این سنگها هستند و هر یک از آنها ۵ تا ۱۰٪ حجم فنوکریست‌ها را اشغال نموده‌اند. وجود درشت‌بلورهای آمفیبول، دلیلی بر ماگماتیسم آبدار و مناطق کمان ماگمایی است (Poma et al., 2004). بلورهای بیوتیت و هورنبلند (شکل ۲-E) گاهی حاشیه سوخته نشان می‌دهند. هر چه ضخامت حاشیه سوخته بیشتر باشد؛ صعود ماگما کندتر صورت گرفته است (Kawabata and Shuto, 2005). گاهی آمفیبول‌ها منطقه‌بندی نشان می‌دهند (شکل ۲-F) که احتمالاً بخشهای تیره از Al و Fe و بخشهای روشن از Mg و Si غنی هستند (Rutherford and Devine, 2003). حضور مقادیری سانیدین در زمینه برخی نمونه‌ها سبب تمایل آنها به تراکی آندزیت شده است. در این نمونه‌ها، میکروولیت‌های سانیدین به‌میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد به‌همراه بلورهای ریز پلاژیوکلاز، پیروکسن، کانیهای کدر و شیشه در زمینه سنگ حضور دارند.

**داسیت:** این سنگ دارای بافتهای پورفیری، ویتروفیری (شکل ۲-G)، گاهی شیشه‌ای جریان، گلوپروپورفیری و پوئیکیلیتیک است. درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز دارای حاشیه‌های گرد شده، بافت غربالی و منطقه‌بندی بوده و از انواع آلبیت تا اولیگوکلاز هستند. این کانی حدود ۳۵ درصد حجم فنوکریست‌ها را در بر گرفته و اندازه آنها از ۰/۳ تا ۸

میلی‌متر در تغییر است. کوارتز با فراوانی ۲۰ تا ۲۵ درصد، دارای خوردگی، حاشیه خلیجی (شکل ۲-G) و شکستگی است. حضور سانیدین به میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد در برخی نمونه‌ها، سبب تمایل ترکیب از داسیت به سمت ریوداسیت شده است. شکستگی و حاشیه‌های گرد شده از ویژگی‌های کانی سانیدین در این نمونه‌ها است. بیوتیت و آمفیبول نوع هورنبلند از جمله کانیهای مافیک موجود در این سنگها بوده که گاهی دارای حواشی سوخته هستند. زمینه فلسیک این سنگها حاوی کوارتز، فلدسپارها و مقادیری شیشه است.

**ریولیت (پرلیتی‌شده):** گدازه‌های ریولیتی منطقه کنگان دارای بافتهای پورفیری با خمیره شیشه‌ای جریان و پرلیتی (شکل ۲-H)، گلوپروپورفیری، اسفروولیتی، پوئیکیلیتیک و حفره‌ای هستند. کوارتز با فراوانی حدود ۵ تا ۱۰ درصد، به‌صورت بلورهای بی‌شکل (شکل ۲-H)، شکسته شده و دارای خوردگی خلیجی دیده می‌شود. بلورهای دارای خوردگی و گرد شده سانیدین به میزان حدود ۱۵ درصد و پلاژیوکلاز نوع آلبیت تا اولیگوکلاز (شکل ۲-H) حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد در این واحد سنگی حضور دارد. بیوتیت به‌عنوان کانی مافیک به مقدار کم وجود دارد و در اغلب موارد اکسید شده است (شکل ۲-H). زمینه این سنگها که بخش عمده آن را تشکیل داده، عمدتاً از سیلیس آمورف تشکیل شده است.

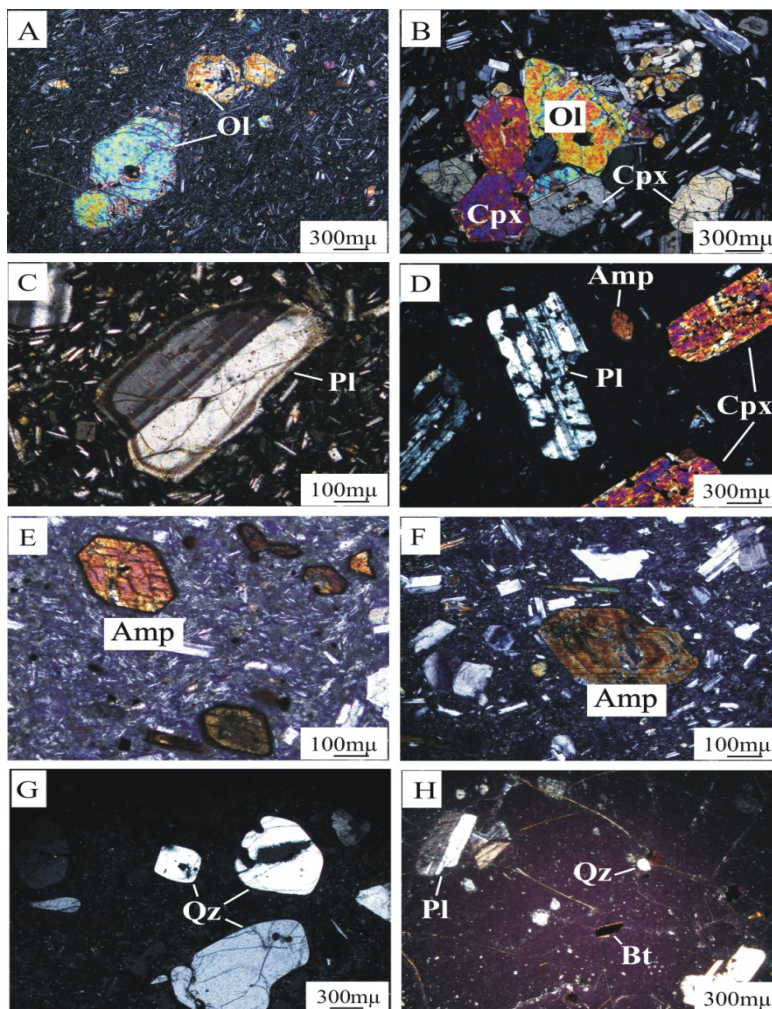
### ژئوشیمی

نتایج آنالیز ژئوشیمیایی عناصر اصلی و کمیاب گدازه‌های منطقه کنگان در جدول ۱ آمده است. نمونه‌های KM54 و KM59 ریولیت‌های دارای ویژگی‌های پرلیتی هستند. در ابتدا، برای تأیید واقع نشدن دگرسانی قابل توجه در نمونه‌ها از نمودار  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  در مقابل  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  (Takanashi et al., 2011) استفاده شد (شکل ۳-A) که بر اساس آن، نمونه‌های منطقه کنگان در محدوده غیر دگرسان قرار گرفته‌اند.

**عناصر اصلی:** میزان سیلیس در گدازه‌های ائوسن-الیگوسن منطقه کنگان بین ۵۷/۱۰ تا ۷۴/۳ درصد و در نمونه برداشت شده از واحد میوسن-پلیوسن ۴۷/۹۹ درصد است، به‌طوری‌که گدازه‌های قدیمی‌تر دارای ترکیب حدواسط تا اسیدی و واحد گدازه‌های میوسن-پلیوسن دارای ترکیب بازیک است. برای نام‌گذاری تمام گدازه‌ها از نمودار مجموع آلكالان در برابر

Irvine and ) AFM (2013). نمونه‌های ساب‌آلکان در نمودار (Baragar, 1971) در دسته کالک‌آلکان قرار گرفتند (شکل C-۳). همچنین در نمودار  $K_2O$  در برابر  $SiO_2$  (Le Maitre, 1989)، نمونه‌های کالک‌آلکان، از انواع توانایی متوسط تا بالا تعیین شد (شکل D-۳). بر اساس این نمودار، ترکیب گدازه‌های حدواسط و اسیدی منطقه کنگان از آندزیت بازالتی تا ریولیت متغیر است.

سیلیس (Le Bas et al., 1986) استفاده شد که بر اساس آن، نمونه‌ها در محدوده بازالت، آندزیت، داسیت و ریولیت قرار گرفته‌اند. در این نمودار، نمونه بازالتی در محدوده آلکان و سایر نمونه‌ها در قلمرو ساب‌آلکان واقع شده‌اند (شکل B-۳). در نمونه بازالتی مقدار درصد وزنی  $Na_2O+K_2O$  بیش از ۱ و مقدار  $TiO_2$  برابر ۱/۶۷ درصد است که این از ویژگیهای بازالت‌های آلکان سدیک است (Rajabi and Torabi, )



شکل ۲. تصاویر پتروگرافی گدازه‌های منطقه کنگان: A: درشت بلور اولیون و ریز بلورهای پلاژیوکلاز در بازالت، B: درشت بلورهای اولیون و کلینوپیروکسن همراه پلاژیوکلاز در بازالت، C: حاشیه واجذبی پلاژیوکلاز در پیروکسن آندزیت، D: بافت غربالی در بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن و حضور آمفیبول در پیروکسن آندزیت، E: درشت بلورهای شکل‌دار آمفیبول با حاشیه سوخته در آندزیت، F: منطقه‌بندی هورنبلند در آندزیت، G: بافت ویتروفیری و کوارتز گردشده با حاشیه خلیجی در داسیت و H: بافت پرلیتی و کانیهای پلاژیوکلاز، کوارتز و بیوتیت در ریولیت (نور در همه تصاویر XPL است). علایم اختصاری کانیها برگرفته از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010)

**Fig. 2.** Microphotographs of Kangan area lavas A: Olivine phenocryst and microliths of plagioclase in basalt, B: Phenocrysts of olivine and clinopyroxene with plagioclase in basalt, C: Resorption rim around plagioclase in pyroxene andesite, D: Sieve texture in plagioclase and clinopyroxene and existence of amphibole in pyroxene andesite, E: Phenocrysts of euhedral amphibole with burned margin in andesite, F: Zoning of hornblende in andesite, G: Vitrophyric texture and rounded quartz with embayment in dacite, and H: Perlitic texture and plagioclase, quartz and biotite minerals in rhyolite. (All pictures except for D in crossed polarized light). Mineral abbreviations from Whitney and Evans (2010)

عنصر نادر خاکی و کمیاب: نمودارهای عناصر نادر خاکی به‌هنجار شده با کندریت (Boynton, 1984) و عناصر کمیاب به‌هنجار شده با گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) برای نمونه‌های اسیدی و حدواسط منطقه کنگان که به‌ترتیب در شکل ۴- A و B نمایش داده شده‌اند. دارای الگوی پراکندگی یکنواخت در REE، نسبت بالای

LREE/HREE، غنی‌شدگی LILE، آنومالی منفی Nb و نیز بی‌هنجاری منفی Eu، Ti، P و Sr به ویژه در نمونه‌های ریولیتی هستند. یکنواختی روند الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی در گدازه‌های حدواسط و اسیدی، بیانگر منشأ مشترک آنهاست (Kharbish, 2010).

جدول ۱. نتایج آنالیز عناصر اصلی (wt.%) و کمیاب (ppm) سنگهای آتشفشانی منطقه کنگان

**Table 1.** Whole rock major (wt.%) and trace element (ppm) composition of volcanic rocks of Kangan area

Sample name	DM47	SM18	SM14	KM93	KM83	
Sample location	X Y	59°55'31" 32°40'9"	59°55'7" 32°41'35"	59°56'17" 32°41'39"	59°52'25" 32°41'58"	59°54'3" 32°42'25"
Rock type	Basalt	Andesite	Andesite	Andesite	Andesite	
SiO <sub>2</sub> (wt%)	47.99	62.38	61.63	59.62	57.10	
TiO <sub>2</sub>	1.67	0.76	0.9	0.86	0.93	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.82	16.58	16.05	17.07	16.71	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3T</sub>	9.35	4.5	5.16	5.58	5.75	
MnO	0.14	0.07	0.09	0.10	0.10	
MgO	7.81	2.38	2.68	3.84	3.27	
CaO	9.71	5.06	4.94	6.29	6.68	
Na <sub>2</sub> O	3.99	3.47	4.23	3.48	3.73	
K <sub>2</sub> O	0.45	2.82	1.87	2.25	2.03	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.34	0.16	0.2	0.18	0.25	
LOI	0.4	1.6	2.0	0.9	3.20	
Total	99.91	99.78	99.75	99.81	99.74	
Sc(ppm)	25	11	12	14	14	
V	185	70	82	107	107	
Co	39.5	11.7	13.5	16	15.7	
Ni	103	20	20	20	20	
Ga	15.3	16.6	17.1	15.9	15.70	
Rb	7.6	133.6	109.1	96/8	117.3	
Sr	566.8	315.8	339.7	346.6	427.6	
Nb	15.3	10.9	13.0	9.8	13.0	
Cs	0.3	7.5	12.0	6.6	6.4	
Ba	146	346	356	307	336	
Hf	3.6	5.9	6.6	4.9	5.5	
Ta	1.1	0.8	1.1	0.6	0.9	
Th	1.7	14.5	13.5	11	11.4	
U	0.4	2.9	2.6	2.5	2.3	
W	0.5	2.1	2.3	1	1.4	
Zr	172	242.8	268.7	201.3	250	
Y	24.1	23.7	28.4	24.3	25.2	
La	16.7	30.9	30.6	25	31.9	
Ce	35.7	57.8	58.3	48.2	59.7	
Pr	4.23	6.24	6.78	5.54	6.62	
Nd	17.9	22.3	23.9	20.6	24.3	
Sm	3.92	4.5	4.82	4.07	4.81	
Eu	1.48	1.02	1.11	1.04	1.21	
Gd	4.74	44.4	5.11	4.4	4.66	
Tb	0.74	0.75	0.8	0.72	0.76	
Dy	4.43	4.31	4.91	3.94	4.39	
Ho	0.79	0.88	0.95	0.83	0.85	
Er	2.44	2.53	2.83	2.47	2.45	
Tm	0.34	0.35	0.42	0.35	0.36	
Yb	2.04	2.54	2.7	2.28	2.48	
Lu	0.35	0.4	0.44	0.36	0.39	

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیز عناصر اصلی (wt.%) و کمیاب (ppm) سنگهای آتشفشانی منطقه کنگان

**Table 1 (Continued).** Whole rock major (wt.%) and trace element (ppm) composition of volcanic rocks of Kangan area

Sample name	KM103	KM101	DM44	DM61	KM64
Sample location	X	Y			
	59°53'24"	32°40'27"	59°54'15"	32°40'38"	59°56'27"
			59°55'53"	32°39'46"	59°52'11"
				32°39'8"	32°41'36"
Rock type	Andesite	Andesite	Andesite	Andesite	Dacite
SiO <sub>2</sub> (wt.%)	62.21	61.03	61.67	60.85	63.19
TiO <sub>2</sub>	0.76	0.97	0.84	0.80	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.14	17.5	16.68	16.65	15.87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3T</sub>	4.59	4.87	4.79	4.85	4.20
MnO	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07
MgO	3.00	1.75	2.59	3.33	2.84
CaO	5.08	5.15	4.88	5.36	4.82
Na <sub>2</sub> O	3.45	4.06	3.88	3.69	3.38
K <sub>2</sub> O	2.39	2.43	2.61	2.03	3.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.29	0.22	0.21	0.14
LOI	1.9	1.6	1.5	1.9	1.5
Total	99.73	99.92	99.75	99.75	99.75
Sc(ppm)	11	9	10	11	10
V	81	84	75	83	68
Co	15.3	13.1	12.6	14.5	13.9
Ni	46	20	35	45	33
Ga	16.0	17.1	14.7	14.9	15.2
Rb	89.3	89.9	86.3	70.1	113.4
Sr	349.7	434.0	354.1	375.6	314.9
Nb	12.0	15.1	14.1	12.3	10.8
Cs	5.7	6.4	6.2	4.8	8.7
Ba	337	458	363	330	411
Hf	5.6	5.7	6.2	5.2	5.1
Ta	0.9	1.1	1.1	0.9	1
Th	11.1	12.9	11.1	9.8	17.5
U	2.2	2.5	2.1	1.9	3.4
W	1.3	1.4	1.2	1	1.6
Zr	238.3	246.9	254.9	227	205.3
Y	23.1	24.5	24.5	24.1	22
La	28.6	35	31.8	27.8	31.5
Ce	53.3	65.8	55.1	50.8	57.4
Pr	5.88	7.07	6.11	5.57	6.16
Nd	21.1	26.8	21.6	21.3	22
Sm	4.3	4.87	4.4	4.03	4
Eu	1.04	1.21	1.07	1.03	0.94
Gd	4.26	4.88	4.45	4.19	4.01
Tb	0.68	0.78	0.71	0.63	0.66
Dy	4.13	4.55	4.12	3.9	3.95
Ho	0.81	0.92	0.88	0.78	0.76
Er	2.38	2.42	2.34	2.3	2.24
Tm	0.35	0.4	0.39	0.36	0.36
Yb	2.49	2.71	2.54	2.29	2.33
Lu	0.39	0.4	0.42	0.37	0.36

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیز عناصر اصلی (wt.%) و کمیاب (ppm) سنگهای آتشفشانی منطقه کنگان

**Table 1 (Continued).** Whole rock major (wt.%) and trace element (ppm) composition of volcanic rocks of Kangan area

Sample Name	KM76	DM14	KM54	KM59	KM98
Sample location	X 59°52'54"	59°55'5"	59°52'45"	59°53'33"	59°55'10"
	Y 32°41'54"	32°39'5"	32°41'19"	32°41'20"	32°41'5"
Rock type	Dacite	Dacite	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite
SiO <sub>2</sub> (wt%)	66.32	63.23	72.63	73.25	74.30
TiO <sub>2</sub>	0.51	0.56	0.14	0.15	0.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.03	16.89	12.64	12.62	12.96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3T</sub>	3.20	3.97	1.11	1.36	0.74
MnO	0.05	0.04	0.02	0.01	0.01
MgO	1.49	1.25	0.06	0.11	0.24
CaO	2.97	5.21	1.09	0.84	0.97
Na <sub>2</sub> O	2.97	3.91	2.48	2.75	2.16
K <sub>2</sub> O	4.49	1.57	6.03	5.39	4.92
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.17	0.02	0.03	0.03
LOI	2.7	3.1	3.7	3.4	3.4
Total	99.84	99.75	99.78	99.92	99.9
Sc (ppm)	7	8	3	3	2
V	48	57	8	8	8
Co	8.1	7.9	0.8	1.1	1
Ni	20	20	20	20	20
Ga	14.4	14.5	14.7	14.8	12.3
Rb	154.7	52.2	222.2	221.5	190.9
Sr	237.9	383.5	49.6	53.0	60
Nb	11.1	8.4	11.9	12.4	11.8
Cs	11.5	4.6	26.8	25.5	10.9
Ba	457	248	174	158	326
Hf	5.6	4.6	4.7	5	4.2
Ta	1.2	0.6	1.7	1.6	1.3
Th	23	7	35.4	35.1	33.4
U	4.6	1.7	7.7	7.1	6.8
W	2.6	0.5	5.1	4.9	2.9
Zr	215.4	178.3	146.6	159.8	140.8
Y	22.2	17.7	30.6	30.3	20.7
La	33.8	21	42.4	45.5	41.6
Ce	59.3	41.2	76.8	76.9	66.6
Pr	6.5	4.6	7.92	8.42	6.8
Nd	21.5	16.8	26	26.8	21.8
Sm	4.09	3.12	4.77	4.87	3.57
Eu	0.78	0.91	0.27	0.3	0.48
Gd	3.82	3.2	4.76	4.82	3.36
Tb	0.61	0.54	0.81	0.82	0.55
Dy	3.56	3.28	5.01	4.85	3.27
Ho	0.72	0.59	1.01	0.97	0.67
Er	2.21	1.72	3.11	2.92	1.97
Tm	0.35	0.26	0.47	0.43	0.32
Yb	2.24	1.73	3.34	3.38	2.32
Lu	0.36	0.29	0.52	0.55	0.36

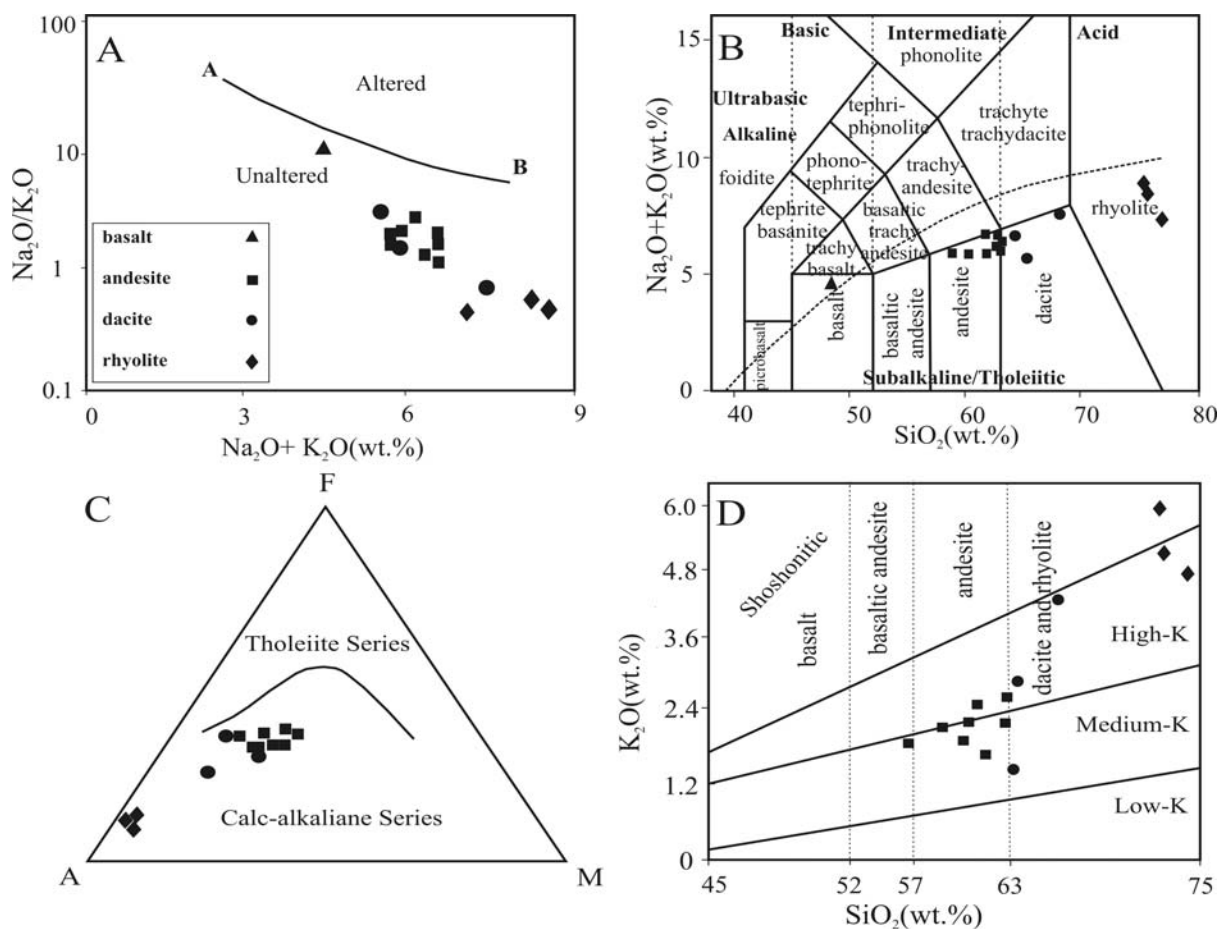
منابع گوشته‌ای نشان می‌دهد (Soesoo, 2000). آنومالی منفی Ba در فازهای اسیدی می‌تواند بیانگر تفریق فلدسپارها و یا نقش پوسته قاره‌ای بالایی در فرآیندهای ماگمایی باشد (Arsalan and Aslan, 2006). غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE در این سنگها، ممکن است به دلیل باقی ماندن

آنومالی منفی Ti، Nb و Eu به همراه غنی‌شدگی LILE (به استثنای Ba) در گدازه‌های اسیدی و حدواسط از ویژگیهای گدازه‌های کالک‌آلکالن وابسته به فرورانش است (Wu et al., 2003; Wilson, 2007; Yang and Li, ) (Kuscu and Geneli, 2010) و تأثیر فرورانش را بر



نادر خاکی سبک و تهی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سنگین را نشان می‌دهد (شکل ۴- C). عناصر نادر خاکی سبک نسبت به فازهای تبلور یافته اولیه نظیر الیوین، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز، ناسازگار بوده است و در حین تبلور و تفریق این فازها در ماگما، به‌میزان فزاینده‌ای در مایعات باقی‌مانده تحول یافته، متمرکز می‌شوند (Rollinson, 1993).

گارنت در منشأ (MacDonald et al., 2000)، آرایش با مواد پوسته‌ای (Sirvastava and Singh, 2004) و یا متاسوماتیسم سیالات حاصل از آب‌زدایی پوسته اقیانوسی فرورانده (Pearce and Peate, 1995; Winter, 2001) باشد. نمودار عناصر نادر خاکی به‌هنجار شده با کندریت (Boynton, 1984) برای نمونه بازالتی، غنی‌شدگی عناصر



شکل ۳. A: نمودار  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  در مقابل  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  (Takanashi et al., 2011) برای تأیید دگرسانی نبودن نمونه‌ها، B: نمودار مجموع آلکالی در برابر سیلیس (Le Bas et al., 1986) برای طبقه‌بندی سنگها و جداکردن دسته آلکالی و ساب‌آلکالی، C: نمودار سه تایی  $\text{FeO}-\text{MgO}-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  برای جداکردن دسته کالک‌آلکالی از دسته تولیتی و D: نمودار  $\text{K}_2\text{O}$  در مقابل  $\text{SiO}_2$  (Irvine and Baragar, 1971) و محل نمونه‌های آتشفشانی کنگان (Le Maitre, 1989)

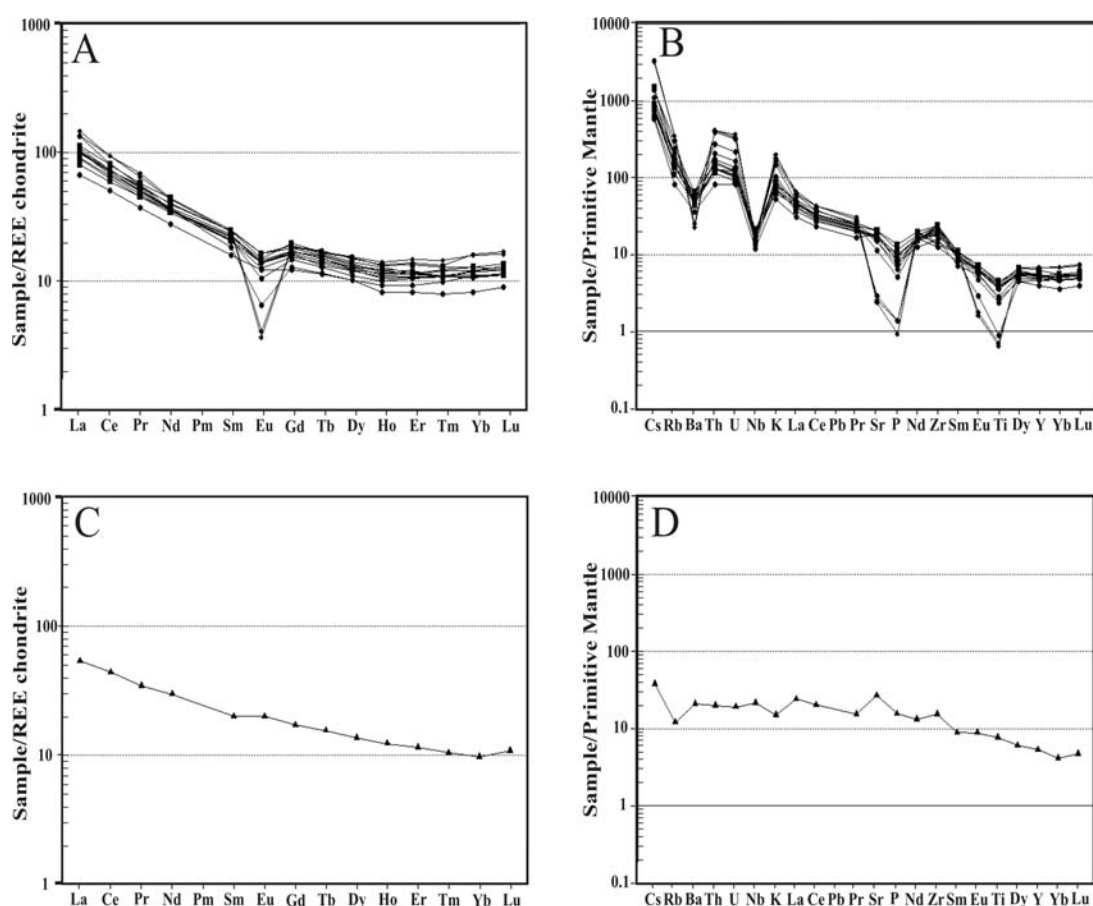
**Fig. 3.** A:  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  versus  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  diagram (Takanashi et al., 2011) for samples that are unaltered, B: Total alkalis ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) versus  $\text{SiO}_2$  (Le Bas et al., 1986) for classification of samples and discrimination between alkaline and sub-alkaline series, C:  $\text{FeO}-\text{MgO}-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  ternary diagram for discrimination of calc-alkaline and tholeiitic series (Irvine and Baragar, 1971), and D:  $\text{K}_2\text{O}$  versus  $\text{SiO}_2$  diagram (Le Maitre, 1989) and position of Kangan volcanic rocks

(Hirschman, 1998). با استفاده از نسبت  $\text{La}_N/\text{Sm}_N$  سنگها می‌توان نشان داد که کدام یک از عوامل یادشده در ایجاد غنی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سبک در بازالت نقش

غنی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سبک، به دو عامل درجات کم ذوب‌بخشی منبع گوشته‌ای غنی‌شده (کمتر از ۱۵ درصد) و آرایش ماگما توسط مواد پوسته‌ای نسبت داده می‌شود

در آن قابل توجه است. نبود بی‌هنجاری منفی HFSE، نشان می‌دهد که بازالت مورد بررسی، ویژگیهای ماگماهای کمانی را ندارد و حاصل تبلور ماگمای مشتق شده از منابع گوشته‌ای غنی‌شده زیر لیتوسفر قاره‌ای است (Ghasemi et al., 2011). میزان بالاتر Ti و Nb به همراه محتوای پایین‌تر Rb در نمونه بازیک نسبت به سنگهای حدواسط و اسیدی منطقه کنگان، می‌تواند بیانگر ماهیت گوشته‌ای آن باشد (Elahpour et al., 2011). نسبت La/Yb در نمونه بازالتی منطقه کنگان برابر ۸/۱۸ است که این ویژگی به همراه نبود آنومالی منفی عنصر Eu، بیانگر ویژگیهای بازالت درون صفحه‌ای است (Yang et al., 2009).

داشته است (Ghasemi et al., 2011). نسبت  $La_N/Sm_N$  در سنگهای پوسته‌ای بیش از ۴/۲۵ بوده (Sirvastava and Singh, 2004) و در بازالت کنگان ۲/۶۸ است. بنابراین، می‌توان گفت ماگمای سازنده بازالت کنگان از ذوب‌بخشی درجه پایین یک منبع گوشته‌ای غنی‌شده منشأ گرفته و متحمل آلیش پوسته‌ای چندانی نشده است. در نمودار چند عنصری به‌هنجار شده با گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، نمونه بازالتی، غنی‌شدگی از LREE و LILE و تهی‌شدگی از HREE نشان می‌دهد (شکل ۴-D). آنومالی مثبت عنصر Cs می‌تواند بیانگر آلیش با مواد پوسته‌ای باشد و غنی‌شدگی از Sr، با حضور پلاژیوکلاز فراوان



شکل ۴. A: نمودار عناصر نادر خاکی به‌هنجار شده با کندریت (Boynton, 1984)، B: نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب به‌هنجار شده با گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) برای گدازه‌های حدواسط و اسیدی کنگان، C: نمودار عناصر نادر خاکی به‌هنجار شده با کندریت (Boynton, 1984) و D: نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب به‌هنجار شده با گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) برای گدازه بازالتی کنگان

**Fig. 4.** A: Chondrite-normalized REE diagram (Boynton, 1984), B: Primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (Sun and McDonough, 1989) for intermediate and acid lavas of Kangan; C: Chondrite-normalized REE diagram (Boynton, 1984), and D: Primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (Sun and McDonough, 1989) for basaltic lava of Kangan

## بحث

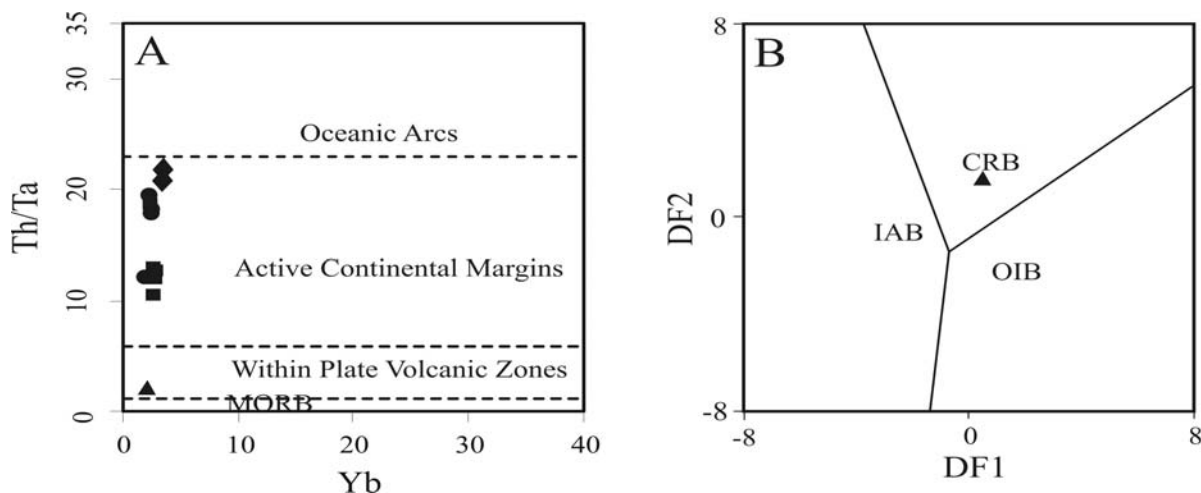
قاره‌ای واقع شد (شکل ۵-B). عوامل استفاده شده در این نمودار عبارتند از:

$$DF1 = -4.6761 \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 2.5330 \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0.3884 \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 3.9688 \ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.8980 \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0.5832 \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0.2896 \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0.2704 \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 1.0810 \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.1845 \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 1.5445$$

$$DF2 = 0.6751 \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 4.5895 \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 2.0897 \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.8514 \ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0.4334 \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 1.4832 \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 2.3627 \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 1.6558 \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}$$

## محیط زمین‌ساختی و منشأ

در نمودار تفکیک محیط‌های تکتونیکی، بر اساس نسبت‌های Th/Ta در برابر Yb (Schandl and Gorton, 2002)، نمونه‌های اسیدی و حدواسط منطقه کنگان در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای و نمونه بازالت در قلمرو مناطق آتشفشانی درون صفحه‌ای قرار می‌گیرد (شکل ۵-A). برای تمایز بازالت‌های درون صفحه قاره‌ای از اقیانوسی، از نمودار DF2 مقابل DF1 (Verma et al., 2006) استفاده شد که بر اساس آن نمونه بازالتی کنگان در محدوده بازالت‌های ریفت



شکل ۵. موقعیت نمونه‌های منطقه کنگان در A: نمودار تفکیک محیط‌های زمین‌ساخت بر اساس Th/Ta در برابر Yb (Schandl and Gorton, 2002) و B: نمودار متمایز کننده انواع بازالت‌ها (Verma et al., 2006) (علایم مشابه شکل ۳)

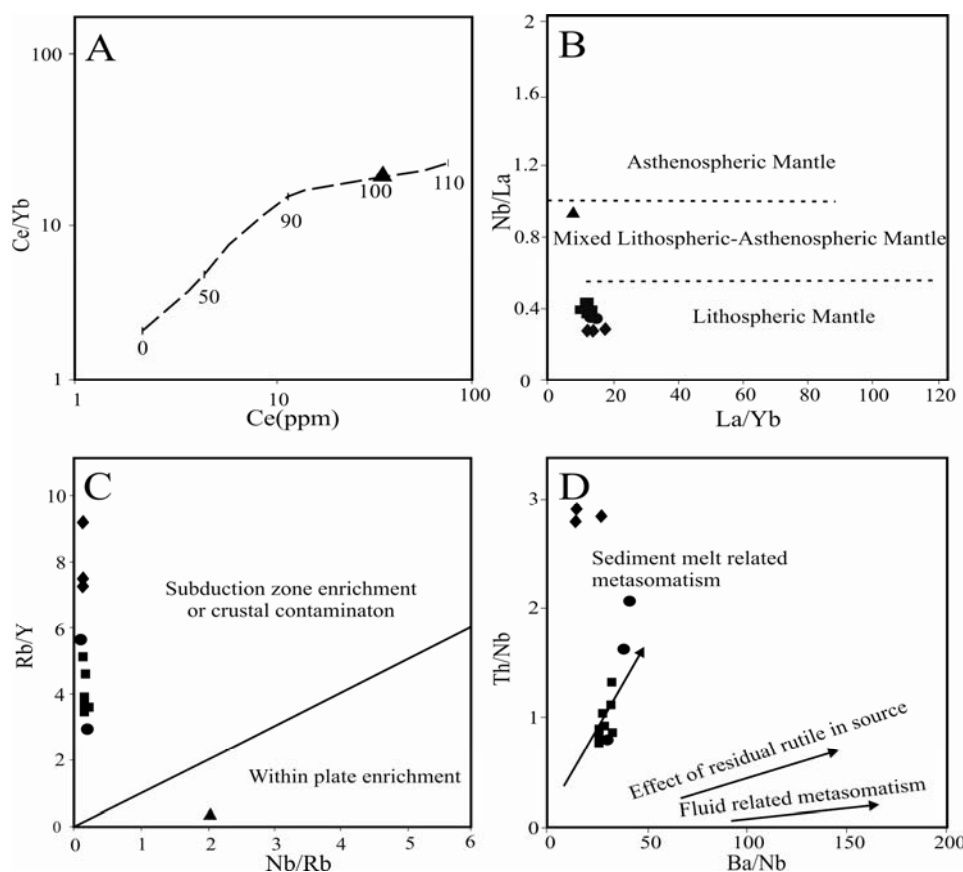
**Fig. 5.** Position of Kangan samples on A: Tectonic setting discriminate diagram based on Th/Ta versus Yb (Schandl and Gorton, 2002), B: Discriminate diagram of basalt types (Verma et al., 2006) ( Symbols are similar to Fig. 3)

منشأ گوشته استنوسفری است (Smith et al., 1999). بر این اساس، برای تعیین منشأ نمونه‌ها، از نمودار La/Yb در برابر Nb/La (Smith et al., 1999; Moharami et al., 2014) که محدوده گوشته لیتوسفری و استنوسفری را از یکدیگر متمایز می‌کند، استفاده شد. طبق این نمودار، منشأ سنگهای اسیدی و حدواسط از گوشته لیتوسفری و منشأ بازالت آلکان کنگان، مخلوط گوشته لیتوسفری و استنوسفری تعیین شد (شکل ۶-B). نسبت Zr/Y در گوشته برابر ۲/۴۶ (Sun and McDonough, 1989) و در سنگهای منطقه کنگان ۴/۷۹ تا ۱۰/۸۱ است. بنابراین، منشأ سنگهای گدازه‌ای مورد بررسی را می‌توان به گوشته غنی شده نسبت داد. به دلیل این که آرایش با مواد پوسته‌ای افزایش میزان Rb و از طرفی کاهش Nb را

ماتسون و اسکارسون (Mattsson and Oskarsson, 2005) نسبت بالای Ce/Yb را نشان‌دهنده ذوب‌بخشی اندک و باقی‌ماندن گارنت در منشأ معرفی کرده‌اند. این نسبت در گدازه بازالتی کنگان ۱۷/۵ است. از نمودار تغییرات Ce/Yb مقابل Ce (Ellam, 1992) برای تعیین عمق رخداد ذوب‌بخشی ناحیه منشأ ماگما استفاده شد، که بر مبنای آن عمق رخداد ذوب‌بخشی و تشکیل ماگمای سازنده بازالت منطقه کنگان، حدود ۱۰۰ کیلومتر، یعنی منطبق بر گوشته استنوسفری و عمق پایداری گارنت لرزولیت تعیین شد (شکل ۶-A). از آن‌جا که در گوشته لیتوسفری Nb نسبت به La تهی شده است، بنابراین نسبت پایین Nb/La نشان‌دهنده ماگمایی با منشأ گوشته لیتوسفری و نسبت بالای آن بیانگر

ماگماتیسم مرتبط با یک منبع تغییر یافته توسط فرورانش عنوان شده است (Sommer et al., 2006). میانگین این نسبت در سنگهای کالک‌آلکالن منطقه کنگان برابر ۱۸/۱ است. غنی‌شدگی U، Th و نیز LREE نسبت به HREE در نمونه‌های کالک‌آلکالن کنگان نشان می‌دهد که ماگمای مادر این سنگها از ذوب‌بخشی گوشته غنی شده به‌وسیله سیالات، منشأ گرفته است (Castillo, 2006; Kuscı and Genelı, 2010). در نمودار Ba/Nb در برابر Th/Nb (Ersoy et al., 2010)، نقش رسوبات ذوب‌شده طی فرورانش، در فرآیند متاسوماتیسم بررسی شد.

باعث می‌شود (Reichew et al., 2005)، با استفاده از نسبت Rb/Y در مقابل Nb/Rb، می‌توان غنی‌شدگی به‌وسیله سیالات در زون فرورانش یا آلودگی پوسته‌ای و همچنین غنی‌شدگی درون صفحات را تعیین کرد. بنابراین، برای بررسی رخداد غنی‌شدگی در منشأ نمونه‌ها، از نمودار Rb/Y در برابر Nb/Rb (Temel and Gondogdu, 1998) استفاده شد. در این نمودار، گدازه‌های اسیدی و حدواسط شواهد غنی‌شدگی در منطقه فرورانش و یا آلودگی پوسته‌ای را نشان می‌دهند؛ اما نمونه بازالتی دارای منشأ غنی‌شده درون صفحه‌ای است (شکل ۶-C). علاوه بر این، نسبت  $Zr/Nb > 10$  نیز از ویژگیهای



شکل ۶. A: موقعیت بازالت کنگان در نمودار Ce/Yb در مقابل Ce (Ellam, 1992)؛ B: نمودار نسبت Nb/La در مقابل La/Yb (Smith et al., 1999; Moharami et al., 2014)؛ C: نمودار Rb/Y در مقابل Nb/Rb (Temel and Gondogdu, 1998) و D: نمودار Th/Nb در مقابل Ba/Nb (Ersoy et al., 2010) (علائم مشابه شکل ۳)

**Fig. 6.** A: Position of basalt of Kangan on Ce/Yb versus Ce diagram (Ellam, 1992) B: Nb/La versus La/Yb diagram (Smith et al., 1999; Moharami et al., 2014), C: Rb/Y versus Nb/Rb (Temel and Gondogdu, 1998), and D: Th/Nb versus Ba/Nb diagram (Ersoy et al., 2010) (Symbols are similar to Fig. 3)

شدگی از Nb نسبت به Th و Rb، غنی‌شدگی از LREE و همچنین نسبت  $Nb/La > 0.5$  از ویژگیهای بازالت‌های غنی

بر این اساس، نمونه‌ها در راستای روند مربوط به متاسوماتیسم وابسته به رسوبات ذوب‌شده، قرار گرفته‌اند (شکل ۶-D). غنی

شرق سربیشه شامل سنگهای آتشفشانی حدواسط تا اسیدی پالئوژن به همراه نهشته‌های آذرآواری (توف - برش) و گدازه‌های بازالتی نئوژن هستند. گدازه‌های اسیدی، دارای ترکیب داسیتی تا ریولیتی بوده و در برخی موارد، فرآیند پرلیتی شدن را تحمل کرده است. علاوه بر این، عملکرد پهنه گسلی سربیشه در واحدهای سنگی به‌ویژه توف‌ها، سبب خردشدگی، رخداد دگرسانی و تشکیل پهنه‌های بنتونیتی شده است. بافت‌های غالب در گدازه‌های منطقه کنگان شامل پورفیری با زمینه میکرولیتی، گلوپوروفیری، حفره‌ای، پوئیکلیتیک، سری‌ایت، ویتروفیری، پورفیری با خمیره شیشه‌ای جریان، پرلیتی و اسفرولیتی است. در اغلب گدازه‌های کنگان، شواهد نبود تعادل در کانیها مانند منطقه‌بندی و بافت غربالی در پلاژیوکلازها، حواشی گردشده و حاشیه‌های واجذبی در برخی فنوکریست‌ها وجود دارد. شواهد پتروگرافی و مقدار L.O.I. در گدازه‌ها بیانگر میزان پایین دگرسانی در این سنگهاست. بر اساس ترکیب عناصر اصلی و کمیاب، بازالت کنگان از نوع آلکالن سدیک بوده و در رده بازالت‌های غنی از Nb قرار می‌گیرد. روند یکنواخت الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی در گدازه‌های حدواسط و اسیدی، بیانگر منشأ مشترک آنهاست؛ در حالی که تمایز الگوی این عناصر در گدازه بازالتی، بیانگر منشأ متفاوت آن نسبت به سایر سنگهای مورد بررسی است. بر اساس نمودارهای عناصر کمیاب، منشأ سنگهای اسیدی و حدواسط کنگان از گوشته لیتوسفری و منشأ بازالت آلکالن، مخلوط گوشته لیتوسفری و استنوسفری تعیین شد. وجود نشانه‌های قاره‌ای در گدازه‌های حدواسط و اسیدی منطقه کنگان را می‌توان به اضافه شدن مذاب حاصل از رسوبات به منشأ گوه گوشته‌ای در نتیجه فرورانش اقیانوس سیستان نسبت داد. اما نسبت پایین alkali/Nb در نمونه بازالتی کنگان، بیانگر نبود رخداد آلودگی پوسته‌ای یا مقدار بسیار ناچیز آن است (Meshesha and Shinjo, 2007).

Nb است (Sajona et al., 1996; Wang et al., 2008). نسبت Nb/La در نمونه بازالتی کنگان برابر ۰/۸۸ است و بر این اساس، می‌توان گدازه‌های بازالتی کنگان را در رده بازالت‌های غنی از Nb محسوب کرد. بازالت‌های غنی از Nb از نوع بازالت‌های آلکالن سدیک، دارای غنی‌شدگی  $P_2O_5$ ,  $Al_2O_3$  و MgO بوده و محتوای پایین HREE و Y در آنها بیانگر ذوب‌بخشی درجه پایین یک منشأ گارنت پریدوتیت است (Mazhari, 2016). این ویژگیها در نمونه بازالتی کنگان وجود دارد (جدول ۱) و بنابراین، می‌توان منشأ گوشته گارنت پریدوتیتی را برای آن در نظر گرفت. نتایج بررسیهای قبلی نیز ماگماتیسم بازالتی جوان در شرق ایران را با محیطهای درون صفحه‌ای کششی مرتبط دانسته که در امتداد گسلهای فعال از یک منبع گوشته غنی شده یا استنوسفر منشأ گرفته‌اند (Pang et al., 2012).

نسبتهای عناصر ناسازگار نظیر Nb/La و Nb/U، طی ذوب گوشته و تبلور بخشی دچار تغییر شده و با استفاده از آنها می‌توان به رخداد آلودگی پوسته‌ای پی برد (Pang et al., 2013). میانگین نسبت Nb/U برای پوسته قاره‌ای معادل ۴/۴ و نسبت Nb/La برابر ۰/۳۹ است (Rudnick and Gao, 2003). مقادیر میانگین این نسبتها برای سنگهای کالک آلکالن منطقه کنگان به ترتیب ۴/۲ و ۰/۳۵ است که به مقادیر یادشده برای پوسته قاره‌ای نزدیک بوده و می‌تواند بیانگر رخداد آلودگی پوسته‌ای در حین تشکیل آنها باشد. بنابراین، وجود نشانه‌های قاره‌ای در گدازه‌های حدواسط و اسیدی منطقه کنگان را می‌توان به اضافه شدن مذاب حاصل از رسوبات به منشأ گوه گوشته‌ای در نتیجه فرورانش اقیانوس سیستان نسبت داد. اما نسبت پایین alkali/Nb در نمونه بازالتی کنگان، بیانگر نبود رخداد آلودگی پوسته‌ای یا مقدار بسیار ناچیز آن است (Meshesha and Shinjo, 2007).

### نتیجه‌گیری

فعالیت‌های آتشفشانی ترشیری در منطقه کنگان واقع در شمال

### References

Arsalan, M. and Aslan, Z., 2006. Mineralogy, Petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary granitic intrusions in the Eastern Pontides, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(2): 177-193.

Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of rare earth elements: meteorite studies. In: P. Henderson (Editor), *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 63-114.

Camp, V.E. and Griffis, R., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in

- the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*, 15(3): 221-239.
- Castillo, P.R., 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 51(3):257-268.
- Chahkandi Nejad, M., 2015. Petrology of Tertiary volcanic rocks in Asfich area, south west of Sarbisheh with emphasis on their economic potential. M.Sc. Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran, 84 pp.
- Elahpour, E., Vosoughi Aedini, M., Pour Moaafi, S.M., Khatib, M.M. and Heuss Assbichler, S., 2011. The study of geochemical nature of Tertiary volcanics and young basaltic rocks in northeast region of Birjand. *Iranian Journal of Geology*, 5(17): 103-117 (in Persian with English abstract).
- Ellam, R.M., 1992. Lithospheric thickness as a control on basalt geochemistry. *Geology*, 20(2): 153-156.
- 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(1-2): 112-128.
- Ghasemi, H.A., Barahmand, M. and Sadeghian, M., 2011. The Oligocene basaltic lavas of east and southeast of Shahroud: Implication for back-arc basin setting of Central Iran Oligo-Miocene basin. *Journal of Petrology*, 2(7): 77-94. (in Persian with English abstract)
- Gholami, E., 2009. Deformation analysis along major trends of north- northeastern Lut plain. Ph.D. Thesis, Tarbiat modares University, Tehran, Iran, 181 pp.
- Goodarzi, M., 2011. Petrology of volcanic rocks in east of Sarbisheh (east of Iran). M.Sc Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran, 141 pp.
- Goodarzi, M., Mohammadi, S.S. and Zarrinkoub, M.H., 2014. Petrography, geochemistry and tectonic setting of Salmabad Tertiary volcanic rocks, southeast of Sarbisheh, eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 6(2): 593-621. (in Persian with English abstract)
- Hirschman, M., 1998. Origin of the transgressive granophyres in the layered series of the Skaergaard intrusion, East Greenland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 52(1): 185-207.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8(5): 523-548.
- Jung, D., Keller, J., Khorasani, R., Marcks, C., Baumann, A. and Horn, P., 1983. Petrology of the Tertiary magmatic activity the northern Lut area, East of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 51, 519 pp.
- Karimi Dehkordi, M., 2012. Deformation analysis along of Sarbishe fault zone in eastern Iran. M.Sc Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran, 143 pp.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Farmer, G.L. and Stern, C.R., 2012. Petrogenesis of granitoids, U-Pb Zircon geochronology, Sr-Nd isotopic characteristics and important occurrence of Tertiary mineralization within the Lut block, eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 1-27. (in Persian with English abstract)
- 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. *Geopersia*, 1(1):19-36.
- Kawabata, H. and Shuto, K., 2005. Magma mixing recorded in intermediate rocks associated with high-Mg andesites from the Setouchi volcanic belt, Japan: implications for Archean TTG formation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140(4): 241-271.
- Kharbish, S., 2010. Geochemistry and magmatic setting of wadi El- Markh Island are gabbro-diorite central- eastern Desert, Egypt. *Chemie der Erde*, 70(3): 257-266.
- Kuscu, G.G. and Geneli, F., 2010. Review of post-collisional volcanism in the central Anatolian volcanic province (Turkey), with special reference to the Tepekoy volcanic complex. *International Journal of Earth Sciences*, 99(3): 593-621.
- 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(3): 745-750.
- Le Maitre, R.W., 1989. *Igneous rocks: a classification and glossary of terms*. Cambridge University Press, New York, 236 pp.
- MacDonald, R., Hawakesworth, C.J. and Heath,

- J., 2000. The lesser Antilles volcanic Chain: a study in arc magmatism. *Earth Science Review*, 49(1-4): 1-76.
- Makipour, M., 2011. Geology, Alteration and Petrology of igneous rocks in Golab area (Sarbisheh, east of Iran). M.Sc. Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran, 117 pp.
- Mattsson, H.B. and Oskarsson, N., 2005. Petrogenesis of alkaline basalts at the tip of a propagating rift: Evidence from the Heimae volcanic centre, south Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 147(3-4): 245-267.
- Mazhari, S.A., 2016. Petrogenesis of adakite and high-Nb basalt association in the SW of Sabzevar zone, NE of Iran: evidence for slab melt-mantle interaction. *Journal of African Earth Sciences*, 116: 170-181.
- Meshesha, D. and Shinjo, R., 2007. Crustal contamination and diversity of magma sources in the northwestern Ethiopian volcanic province. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 102(5): 272-290.
- Mohammadi, S.S., 2012. Geology and Petrology of Tertiary volcanic rocks of Sarbisheh perlite mine area (eastern Iran) and industrial applications. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 59-76. (in Persian with English abstract)
- Moharami, F., Azadi, I., Mirmohamadi, M., Mehdipour Ghazi, J. and Rahgoshay, M., 2014. Petrological and Geodynamical Constraints of Chaldoran Basaltic Rocks, NW Iran: Evidence from Geochemical Characteris. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 6(1): 31-43.
- Nazari, Z., 2011. Geology and Petrology of volcanic rocks in northwest of Sarbisheh (east of Iran). M.Sc. Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran, 114 pp.
- Nazari, H. and Salamati, R., 1999. Geological map of Sarbisheh, scale 1:100000. Geological survey of Iran.
- 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.
- 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.
- Pearce, J.A. and Peate, D.W., 1995. Tectonic implication of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251-285.
- Perugini, D. and Poli, G., 2012. The mixing of magmas in plutonic and volcanic environments: Analogies and difference. *Lithos*, 153: 261-227.
- Poma, S., Quenardelle, S., Litvak, V., Maisonnave, E.B. and Koukharsky, M., 2004. The Sierra de Macon, plutonic expression of the Ordovician magmatic arc, Salta Province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(7): 587-697.
- Rajabi, S. and Torabi, G., 2013. Petrology of Toveireh alkaline basalt an evidence of within-plate Oligocene volcanism in the northwest of Central-East Iranian Microcontinent, southwest of Jandaq. *Journal of Petrology*, 16(4): 21-37. (in Persian with English abstract)
- Reichew, M.K., Saundres, A.D., White, R.V. and Ukhamedov, A.I., 2005. Geochemistry and Petrogenesis of Basalts from the west Siberian Basin, an extension of the Permo-Triassic Siberian Traps, Russia. *Lithos* 79(3-4): 425-452.
- Renjith, M.I., 2014. Micro-textures in plagioclase from the 1994e 1995v eruption, Barren Island Volcano: Evidence of dynamic magma plumbing system in the Andaman subduction zone. *Geoscience Frontiers*, 5(1): 113-126.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A. and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Economic Geology*, 107(2): 295-332.
- Rollinson, H. R., 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation. John Wiley and Sons, New York, 352 pp.
- Rudnick, R.L. and Gao, S., 2003. Composition of the continental crust. In: R.L. Rudnick (Editor), *Treatise in Geochemistry*, Volume 3. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp.1-64.
- Rutherford, M.J. and Devine, J.D., 2003. Magmatic conditions and magma ascent as indicated by hornblende phase equilibria and reactions in the 1995-2002 Soufrière Hills magma. *Journal of Petrology*, 44(8): 1433-1454.

- Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L. and Amini, S., 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(1-4): 209–228.
- Sajona, F.G., Maury, R.C., Bellon, H., Cotton, J. and Defant, M., 1996. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zomboanga Peninsula, Western Mindanao Philippines. *Journal of Petrology*, 37(3): 693–726.
- Schandl, E.S. and Gorton, M.P., 2002. Application of high field strength elements to discriminate tectonic setting in VMS environment. *Economic Geology*, 97(3): 629–642.
- Sirvastava, R.K. and Singh, R.K., 2004. Trace element geochemistry and genesis of Precambrian sub-alkaline mafic dikes from the Central Indian craton: evidence for mantle metasomatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(3): 373–389.
- Smith, E.I., Sánchez, A., Walker, J.D. and Wang, K., 1999. Geochemistry of mafic magmas in the Hurricane Volcanic field, Utah: implications for small- and large-scale chemical variability of the lithospheric mantle. *Journal of Geology*, 107(4): 433–448.
- Soesoo, A., 2000. Fraction crystallization of mantle derived melt as mechanism for some I-type granite petrogenesis, an example from Lachlan fold belts. *Journal of the Geological Society*, 157(1): 135–149.
- Sommer, C.A., Lima, E.F., Nardi, L.V.S., Liz, J.D. and Waichel, B.L., 2006. The evolution of Neoproterozoic magmatism in Southernmost Brazil: shoshonitic, high-K tholeiitic and silica saturated, sodic alkaline volcanism in post collisional basins. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(3): 573–589.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematic of ocean basalts: implications for mantle composition and process. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, London, pp. 313–345.
- Takanashi, K., Shuto, K. and Sato, M., 2011. Origin of Late Paleogene to Neogene basalts and associated coeval felsic volcanic rocks in Southwest Hokkaido, northern NE Japan arc: Constraints from Sr and Nd isotopes and major and trace-element chemistry. *Lithos*, 125(1-2): 368–392.
- Temel, A. and Gondogdu, M.N., 1998. Petrological and Geochemical Characteristics of Cenozoic High-k calcalkaline volcanism in Konya, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1-4): 357–377.
- Tirrul, R., Bell, L.R., Griffis, R. J. and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94(1): 134–150.
- Ustunisik, G., Kilinic, A. and Nielsen, R.L., 2014. New insights into the processes controlling compositional zoning in plagioclase. *Lithos*, 200–201: 80–93.
- Verma, S.P., Guevara, M. and Agrawal, S., 2006. Discriminating four tectonic settings: Five new geochemical diagrams for basic and ultrabasic volcanic rocks based on log-ratio transformation of major-element data. *Journal of Earth System Science*, 115(5): 485–528.
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J., Wan, Y., Li, C., Zi, F., Jiang, Z., Qiu, H., Chu, Z., Zhao, Z. and Dong, Y., 2008. Triassic Nb-enriched basalts, magnesian andesites, and adakites of the Qiangtang terrane (Central Tibet): evidence for metasomatism by slab-derived melts in the mantle wedge. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(4): 437–490.
- Whitney, D. and Evans, B.D., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Wilson, M., 2007. *Igneous Petrogenesis*. Springer Verlag, London, 466 pp.
- Winter, J.D., 2001. *An introduction to Igneous and metamorphic petrology*. Prentice Hall, New Jersey, 796 pp.
- Wu, F.Y., Walker, R.J., Ren, Z.W., Sun, D.U. and Zhou, X.H., 2003. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China. *Chemical Geology*, 196(1-4): 107–129.
- Yang, W. and Li, S., 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, 102(1-3): 88–117.
- Yang, Z., Luo, Z., Zhang, Y., Huang, F., Sun, C. and Dal, J., 2009. Petrogenesis and Geological Implication of the Tianheyong Cenozoic basalts, Inner Mongolia. *China Earth Science Frontiers*, 16(2): 90–106.





## Geochemistry and tectonomagmatic setting of Tertiary volcanic rocks of the Kangan area, northeast of Sarbisheh, southern Khorasan

Mahshid Malekian Dastjerdi<sup>1</sup>, Seyyed Saeid Mohammadi<sup>1\*</sup>, Malihe Nakhaei<sup>2</sup>, Mohammad Hossein Zarrinkoub<sup>1</sup>

1) Department of Mining Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

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

Submitted: Feb. 21, 2016

Accepted: May 29, 2016

**Keywords:** *Andesite, Alkali basalt, Active continental margin, Kangan, Lut block*

### Introduction

The study area is located 12km away from the north east of Sarbisheh at the eastern border of the Lut block (Karimpour et al., 2011; Richards et al., 2012). The magmatic activity in the Lut block has begun in the middle Jurassic (165-162 Ma) and reached its peak in the Tertiary age (Jung et al., 1983; Karimpour et al., 2011). Volcanic and subvolcanic rocks in the Tertiary age cover over half of the Lut block with up to 2000 m thickness and they were formed due to subduction prior to the collision of the Arabian and Asian plates (Jung et al., 1983; Karimpour et al., 2011).

In the Kangan area, the basaltic lavas cropped out beyond the above intermediate to acid volcanic rocks. In this area, bentonite and perlite deposits have an economic importance. The main purpose of this paper is to present a better understanding of the tectono-magmatic settings of volcanic rocks in the northeast of Sarbisheh, east of Iran based on their geochemical characteristics.

### Materials and methods

Fifteen samples were analyzed for major elements by inductively coupled plasma (ICP) technologies and trace elements by using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), following a lithium metaborate/tetraborate fusion and nitric acid total digestion, at the Acme laboratories, Vancouver, Canada.

### Results

The Kangan area is located at the northeast of Sarbisheh, Southern Khorasan and the eastern border of the Lut block. In this area, basaltic lavas

have cropped out above intermediate to acid lavas such as andesite, dacite, rhyolite (sometimes perlitic). The main minerals in the basalt are plagioclase, olivine and pyroxene, in andesite contain plagioclase, pyroxene, biotite and amphibole and in acid rocks include plagioclase, quartz, sanidine, biotite and amphibole. Intermediate to acid rocks have medium to high-K calc-alkaline nature and basalt is alkaline. Enrichment in LREE relative to HREE (Ce/Yb= 21.14-28.7), high ratio of Zr/Y (4.79- 10.81), enrichment in LILE and negative anomaly of Eu, Nb, P, Ti, Ba and Sr in intermediate to acid lavas are characteristics of subduction related calc-alkaline magmatism. Geochemical characteristics such as high ratio of La/Yb (8.18), low content of Rb with tectonic setting discriminant diagrams show within plate environment for basalt. The constituent magma of the studied rocks originated from an enriched garnet lherzolite source in 100 to 110km depth.

### Discussion

Enrichment in LREE relative to HREE (Ce/Yb= 21.14-28.7), high ratio of Zr/Y (4.79- 10.81), enrichment in LILE and negative anomaly of Eu, Nb, P, Ti, Ba and Sr in intermediate to acid lavas are characteristics of subduction related calc-alkaline magmatism. Tectonic setting discrimination diagrams show that andesite to dacitic rocks are located in active continental margin (Schandle and Gorton, 2002) and basalt is placed within the volcanic plate zone and continental rift type (Verma et al., 2006). Intermediate to acid rocks of Kangan area

\*Corresponding authors Email: ssmohammadi@birjand.ac.ir

originated from lithospheric mantle (Moharami et al., 2014) that is enriched by sediment melt related metasomatism (Ersoy et al., 2010) whereas Kangan basaltic lava origin is Nb enriched (Wang et al., 2008; Sajona et al., 1996) mixed lithospheric - asthenospheric mantle (Moharami et al., 2014). According to the trace elements diagrams (Ellam, 1992), partial melting depth for generation of Kangan area lavas was determined to be about 100 to 110Km. Because of absent crustal contamination instances in the basalt, it can be argued that ascending of magma has been rapid and probably similar to other alkali basalts in east of Iran, it may be related to deep fault systems.

### Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers for their constructive comments which greatly contributed to the improvement of the manuscript.

### References

- Ellam, R.M., 1992. Lithospheric thickness as a control on basalt geochemistry. *Geology*, 20(2): 153-156.
- Ersoy, E.Y., Helvaci, 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(1-2): 112-128.
- Jung, D., Keller, J., Khorasani, R., Marcks, C., Baumann, A. and Horn, P., 1983. Petrology of the Tertiary magmatic activity the northern Lut area, East of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 51, 519 pp.
- 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. *Geopersia*, 1(1):19-36.
- Moharami, F., Azadi, I., Mirmohamadi, M., Mehdipour Ghazi, J. and Rahgoshay, M., 2014. Petrological and Geodynamical Constraints of Chaldoran Basaltic Rocks, NW Iran: Evidence from Geochemical Characteris. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 6(1): 31-43.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Raziqie, A. and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu  $\pm$  Mo  $\pm$  Au potential: examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Economic Geology*, 107(2): 295-332.
- Sajona, F.G., Maury, R.C., Bellon, H., Cotton, J. and Defant, M., 1996. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zomboanga Peninsula, Western Mindanao Philippines. *Journal of Petrology*, 37(3): 693-726.
- Schandl, E.S. and Gorton, M.P., 2002. Application of high field strength elements to discriminate tectonic setting in VMS environment. *Economic Geology*, 97(3): 629-642.
- Verma, S.P., Guevara, M. and Agrawal, S., 2006. Discriminating four tectonic settings: Five new geochemical diagrams for basic and ultrabasic volcanic rocks based on log-ratio transformation of major-element data. *Journal of Earth System Science*, 115(5): 485-528.
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J., Wan, Y., Li, C., Zi, F., Jiang, Z., Qiu, H., Chu, Z., Zhao, Z. and Dong, Y., 2008. Triassic Nb-enriched basalts, magnesian andesites, and adakites of the Qiangtang terrane (Central Tibet): evidence for metasomatism by slab-derived melts in the mantle wedge. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(4): 437-490.