

# زمین‌شیمی، محیط زمین‌ساختی و منشأ گدازه‌های الیگو- میوسن منطقه زولسک، شمال خاور سریشه (خراسان جنوبی)

مریم کوچی<sup>۱</sup>، سیدسعید محمدی<sup>۲</sup> و ملیحه نخعی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۰۷

## چکیده

در شمال خاور سریشه در استان خراسان جنوبی، رخنمون‌هایی از سنگ‌های گدازه‌ای وجود دارد که از نظر تقسیمات زمین‌شناسی در بخش خاوری بلوک لوت قرار گرفته‌اند. ترکیب سنگ‌شناختی مجموعه بررسی شده شامل آندزیت (پروکسن آندزیت، آندزیت، تراکی آندزیت)، داسیت و ریولیت است. بافت‌های غالب در این سنگ‌ها، پورفیری با خمیره میکروولیتی شیشه‌ای، گلوپورفیری، پویی کیلیتیک و حفره‌ای هستند. کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌های آندزیتی شامل پلاژیوکلاز، پروکسن و آمفیبول همراه با مقادیر کم بیوتیت و سائیدین و در ریولیت‌ها و داسیت‌ها شامل کوارتز، سائیدین، پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت هستند. بافت‌های غیرتعدالی نظیر منطقه‌بندی شیمیایی، بافت غربالی و حاشیه‌های گردشده و خلیجی در درشت‌بلورهای این سنگ‌ها مشاهده می‌شود. نتایج بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که این گدازه‌ها به سری ماگمایی کالک‌آلکانل پتاسیم بالا تا متوسط تعلق دارند. غنی‌شدگی از LREE و LILE، تهی‌شدگی از HREE و HFSE و بی‌هنجاری منفی عناصری نظیر Nb، Ti و P در این سنگ‌ها نشان از ماگماتیسم کمان آتشفشانی حاشیه فعال قاره دارد. بر اساس نمودارهای تمایز زمین‌ساختی نیز محیط تکنونیک گدازه‌های منطقه زولسک با پهنه فرورانش و حاشیه فعال قاره‌ای مرتبط است. نسبت پایین Dy/Yb (کمتر از ۲) در گدازه‌های بررسی شده، بیانگر منشأ گوشته اسپینل لرزولیتی برای ماگماست.

**کلیدواژه‌ها:** آندزیت، الیگو- میوسن، حاشیه فعال قاره، زولسک، بلوک لوت.

\*نویسنده مسئول: سیدسعید محمدی

E-mail: ssmohammadi@birjand.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

منطقه مورد مطالعه در ۱۱ کیلومتری شمال خاور سریشه در محدوده بین طول‌های جغرافیایی ۶' ۵۰' ۵۹° تا ۲۷' ۵۶' ۵۹° و عرض‌های جغرافیایی ۴۰' ۴۲' ۳۲° تا ۵۱' ۴۵' ۳۲° شمالی و در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سریشه (نظری و سلامتی، ۱۳۷۸) قرار دارد. این منطقه از لحاظ تقسیمات ساختاری در بخش خاوری بلوک لوت واقع شده است. ماگماتیسم گسترده در بلوک لوت از ژوراسیک آغاز شده و در تشریری به اوج خود رسیده است (Karimpour et al., 2011). سن ماگماتیسم خاور ایران که عمدتاً به صورت گدازه و سنگ‌های آذرآواری رخنمون دارند، ائوسن تا الیگوسن تعیین شده است (Jung et al., 1983). سن ماگماتیسم خاور ایران که عمدتاً به صورت گدازه و سنگ‌های آذرآواری رخنمون دارند، ائوسن تا الیگوسن تعیین شده است (Pang et al., 2013). ماگماتیسم تشریری منطقه سریشه تاکنون توسط پژوهشگران مختلف از جمله نظری (۱۳۹۰)، پارسایی (۱۳۹۱)، مکی‌پور (۱۳۹۱)، گودرزی و همکاران (۱۳۹۳)، ملکیان دستجردی (۱۳۹۴)، بیانی (۱۳۹۴)، چهکنندی‌نژاد (۱۳۹۴)، بهاروندی (۱۳۹۵) و عرب (۱۳۹۵) مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج پژوهش‌های اخیر، گدازه‌های منطقه سریشه، دارای ماهیت کالک‌آلکانل و از نظر جایگاه تکنونیک وابسته به محیط فرورانش و حاشیه فعال قاره معرفی شده است. بر پایه مطالعات صورت گرفته توسط برخی از این محققین، این بخش از پهنه لوت به لحاظ اکتشاف ذخایر بنتونیت، پرلیت و آگات حائز اهمیت است. با وجود اینکه در نواحی مجاور محدوده مورد بررسی، مطالعاتی انجام شده است اما تاکنون بررسی‌های سنگ‌شناسی بر روی گدازه‌های منطقه زولسک صورت نگرفته است، لذا مطالعه دقیق آن ضروری به نظر می‌رسد.

وجود گسل‌های متعدد وابسته به پهنه گسلی سریشه در محدوده مورد بررسی، سبب خردشدگی گدازه‌ها و سنگ‌های آذرآواری همراه آنها شده است. وجود پهنه‌های بنتونیتی و دگرسانی توف‌ها در راستای برخی گسل‌ها حاکی از نقش مؤثر این پهنه گسلی در ایجاد پتانسیل اقتصادی در منطقه است. همچنین، به دلیل اینکه آگات‌ها اغلب نتیجه ته‌نشینی تدریجی محلول‌های اشباع از سیلیس در شکاف‌ها و حفره‌های سنگ‌ها هستند، وجود درزه و شکستگی‌های فراوان در گدازه‌های منطقه سبب تسهیل فرایند شستشوی سیلیس و تأمین سیلیس لازم جهت تشکیل آگات و سیلیس نیمه‌قیمتی شده است.

## ۲- زمین‌شناسی منطقه

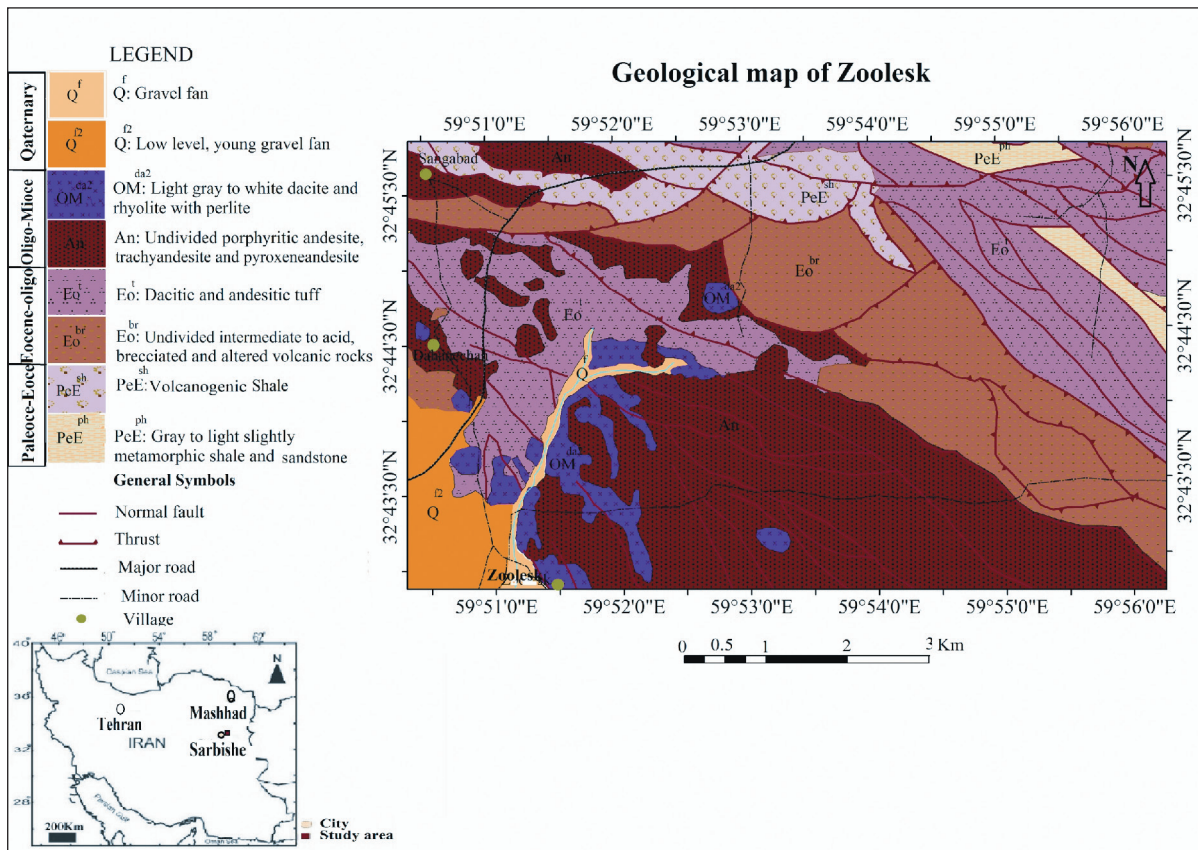
منطقه زولسک در شمال خاور نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سریشه (نظری و سلامتی، ۱۳۷۸) قرار گرفته است. واحدهای سنگی موجود در منطقه زولسک بر اساس نقشه زمین‌شناسی تهیه شده (شکل ۱) بر مبنای مطالعات صحرائی، آزمایشگاهی و بهره‌گیری از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ سریشه (نظری و سلامتی، ۱۳۷۸) عبارتند از:

**۳- روش انجام پژوهش**

برای انجام این پژوهش، ابتدا اطلاعات قبلی مرتبط با گدازه‌های منطقه سریشه شامل

Acme کانادا ارسال شد. عناصر اصلی به روش ICP-AES و عناصر فرعی، کمیاب و نادر خاکی به روش ICP-MS تجزیه شدند. نقشه زمین‌شناسی اصلاح شده منطقه زولسک بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سربیشه و نتایج بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و ژئوشیمی تهیه شد. نتایج تجزیه‌های شیمیایی با کمک نرم‌افزار GCDKit پردازش و نمودارهای مورد نیاز توسط نرم‌افزار Corel Draw ترسیم مجدد شد.

نقشه‌های زمین‌شناسی و پایان‌نامه‌های انجام شده، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. سپس پیمایش‌های صحرایی دقیق انجام و طی آن خصوصیات صحرایی گدازه‌های منطقه زولسک به دقت بررسی و از رخنمون‌های مناسب، نمونه‌برداری انجام شد. از نمونه‌های مختلف، ۸۲ مقطع نازک تهیه شد و مورد مطالعات دقیق سنگ‌نگاری قرار گرفت. سپس ۱۵ عدد از نمونه‌ها بر اساس نوع واحد سنگی و کمترین میزان دگرسانی انتخاب و برای انجام آنالیز شیمی سنگ کل به آزمایشگاه



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه زولسک، براساس نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ سربیشه (نظری و سلامتی، ۱۳۷۸) با اصلاحات.

#### ۴- سنگ‌نگاری

بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، گدازه‌های منطقه زولسک شامل آندزیت، داسیت، ریولیت (گاهی پرلیتی) و توف‌های داسیتی - آندزیتی هستند.

#### ۴-۱. آندزیت

گدازه‌های آندزیتی (پیروکسن‌آندزیت، آندزیت و تراکی‌آندزیت) به رنگ خاکستری تیره و روشن دیده می‌شود. بافت‌های غالب در آندزیت شامل پورفیری با خمیره میکروولیتی شیشه‌ای، گلوپورفیری، پویی‌کلیتیک، ساب‌افیتیک و حفره‌ای و کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌های آندزیتی شامل پلاژیوکلاز، پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و به ندرت سانیدین هستند. پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی موجود در آندزیت‌هاست که حدود ۵۵ تا ۶۵ درصد حجم سنگ را به خود اختصاص داده است. اندازه این کانی از ۰/۱ تا ۷ میلی‌متر متغیر است و به صورت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار هستند (شکل ۲- الف). ترکیب پلاژیوکلازها بر مبنای زاویه خاموشی، آندزین تا الیگوکلاز است. پلاژیوکلازها به صورت فنوکریست و میکروولیت در زمینه وجود دارند. کلینوپیروکسن‌ها شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با حاشیه خلیجی هستند (شکل ۲- الف) و ۲۰ تا ۲۵ درصد حجم سنگ را به خود اختصاص داده‌اند. هورنبلندها با اندازه ۰/۵ تا ۱/۲ میلی‌متر به مقدار کم وجود دارند. شواهد عدم تعادل نظیر حاشیه خلیجی، خوردگی

و حاشیه‌های جذب و مضرسی در پلاژیوکلازها و پیروکسن‌ها و حاشیه تیره در اطراف بیوتیت (شکل ۲- ب) مشاهده می‌شود. در زمینه میکروولیتی برخی نمونه‌ها، مقداری سانیدین وجود دارد که سبب تمایل ترکیب سنگ به تراکی‌آندزیت شده است.

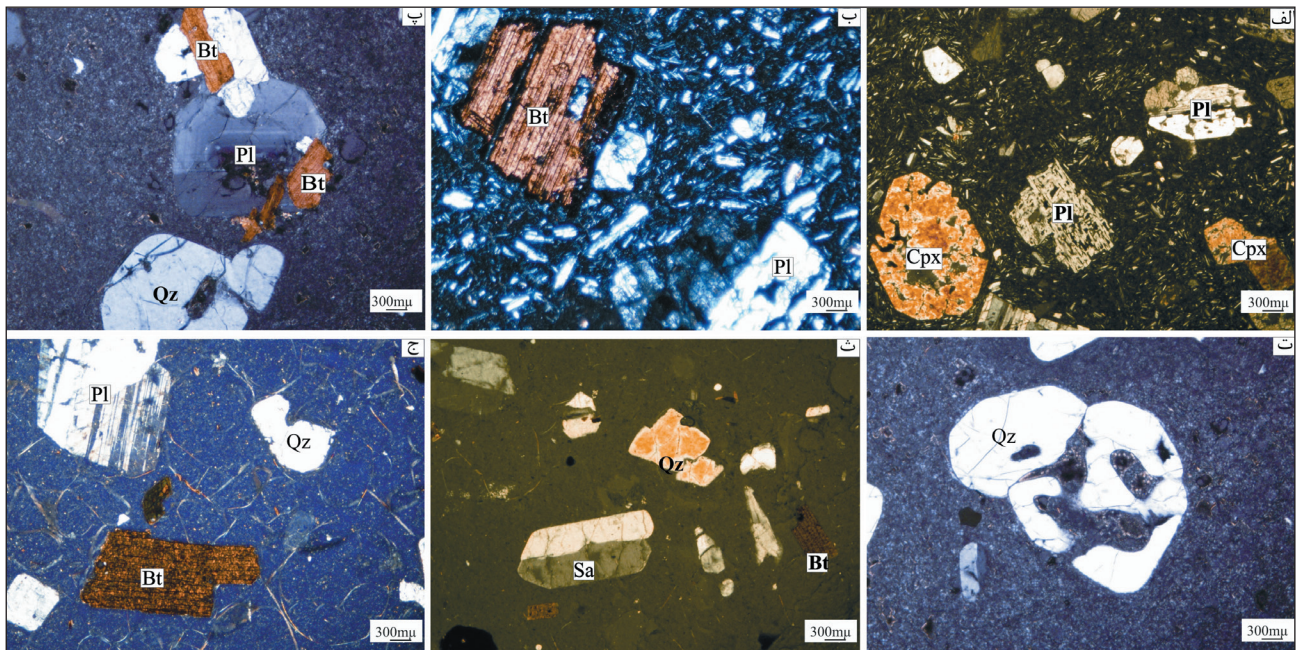
#### ۴-۲. داسیت

این سنگ در صحرا به رنگ خاکستری روشن وجود دارد. بافت رایج در داسیت، پورفیری با زمینه ریزدانه است. فنوکریست‌های معمول در این واحد گدازه‌ای شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، آمفیبول، بیوتیت و به ندرت سانیدین هستند. کوارتز به صورت فنوکریست و ریزدانه حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهد. کوارتزها حواشی گرد شده و خلیجی دارند (شکل ۲- پ و ت). فنوکریست‌های پلاژیوکلاز نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل، دارای ماگل پلی‌سنتیک و از نوع آلپیت تا الیگوکلاز هستند حدود ۳۵ تا ۴۵ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهند. خوردگی خلیجی و گردشدگی حواشی در پلاژیوکلازها نیز دیده می‌شود (شکل ۲- پ). بیوتیت حدود ۱۰ درصد حجم سنگ را به خود اختصاص داده است (شکل ۲- پ). هورنبلند به صورت نیمه‌شکل‌دار به مقدار کم یافت می‌شود. در برخی نمونه‌ها، سانیدین به صورت نسبتاً ریز و به میزان کمتر از ۱۰ درصد وجود دارد.

### ۴-۳. ریولیت

درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهد (شکل ۲-ث). فنوکریست‌های پلاژیوکلاز حدود ۱۵ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهند و اندازه آنها بین ۱ تا ۲ میلی‌متر تغییر می‌کند. بیوتیت به صورت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار حدود ۵ درصد حجم سنگ را اشغال کرده و اندازه آن بین ۰/۴ تا ۲ میلی‌متر متغیر است (شکل ۲-ث). ریولیت‌ها در بخش‌هایی از شمال خاور روستای زولسک، خصوصیات پرلیتی نظیر بافت شیشه‌ای پرلیتی نشان می‌دهند (شکل ۲-ج). به دلیل عملکرد گسل‌ها و وجود درزه‌ها و شکستگی‌های فراوان، دگرسانی‌های زیادی در منطقه مشاهده می‌شود. دگرسانی‌های رایج شامل سرسیتی، آرژیلیک، کربناتی شدن و سیلیسی شدن هستند.

این واحد سنگی در نمونه دستی به رنگ خاکستری روشن و گاهی صورتی دیده می‌شود. بافت‌های عمده شامل پورفیری با خمیره میکروکریستال، گاهی کریپتوکریستال و به ندرت حفره‌ای است. کانی‌های کوارتز، سانیدین، پلاژیوکلاز و بیوتیت در این سنگ حضور دارند. کوارتز به صورت فنوکریست در برخی نمونه‌ها، حدود ۴۰ درصد حجم سنگ را به خود اختصاص داده است. اندازه کوارتز بین ۰/۱ تا ۲/۲ میلی‌متر متغیر بوده و دارای شکستگی، حواشی گرد شده و خلیجی است (شکل ۲-ث). سانیدین از جمله فنوکریست‌های رایج در ریولیت است که ۲۰ تا ۲۵



شکل ۲- خصوصیات میکروسکوپی سنگ‌های گدازه‌ای منطقه زولسک؛ (الف) بافت غربالی پلاژیوکلاز و حاشیه خلیجی کلینوپیروکسن در آندزیت‌ها؛ (ب) بیوتیت دارای حاشیه تیره در آندزیت؛ (پ و ت) کوارتز با حاشیه گرد شده و خلیجی، پلاژیوکلاز و بیوتیت در داسیت‌ها؛ (ث) کوارتز، سانیدین و بیوتیت در ریولیت‌ها؛ (ج) کوارتز، پلاژیوکلاز و بیوتیت در پرلیت (نور در تمامی شکل‌ها XPL است). علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از (Whitney and Evans, 2010).

### ۵- زمین‌شیمی

نتایج آنالیز عناصر اصلی و کمیاب گدازه‌های منطقه زولسک در جدول ۱ آورده شده است. میزان سیلیس در این سنگ‌ها بین ۵۸/۳۰ تا ۷۹/۸۲ درصد،  $Al_2O_3$  بین ۱۰/۷۵ تا ۱۶/۹۴ درصد، MgO بین ۰/۰۹ تا ۳/۴۴ درصد، CaO بین ۰/۴۱ تا ۵/۹۹ درصد و اکسید آهن بین ۰/۷۰ تا ۶/۰۴ درصد متغیر است. مقادیر اکسید سدیم و پتاسیم در این نمونه‌ها نسبتاً بالاست. به طوری که  $Na_2O$  بین ۲/۴۶ تا ۴/۲۴ درصد و  $K_2O$  بین ۱/۹۴ تا ۵/۰۵ درصد هستند.

نمونه‌های مورد بررسی در نمودار  $Zr/TiO_2$  در مقابل  $SiO_2$  (Winchester and Floyd, 1977) (شکل ۳-الف)، در محدوده آندزیت، داسیت و ریولیت قرار می‌گیرند. برای تعیین ماهیت ماگمای سازنده سنگ‌های آتشفشانی منطقه زولسک از نمودار  $K_2O$  در مقابل  $SiO_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976) استفاده شد. در این نمودار، سنگ‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده کالک آلکالین پتاسیم بالا تا متوسط قرار دارند (شکل ۳-ب). الگوی تغییرات عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) برای نمونه‌های مورد مطالعه در شکل ۳-پ نشان داده شده است. عناصر P، Ti، Nb، Ba و K تهی‌شدگی و Zr، Cs، Rb، K غنی‌شدگی نشان می‌دهند. عناصر لیتوفیل با شعاع یونی بزرگ (LIL) عناصر ناسازگار و متحرک هستند. در حالی که عناصر واسطه با شدت میدان بالا (HFS) و برخی از

عناصر تحولی در شرایط دگرگونی و دگرسانی، عناصر سازگار و تقریباً نامتحرک هستند. غنی‌شدگی LILE نسبت به HFSE، تشکیل ماگما در پهنه فرورانش را تأیید می‌کند (Caffe et al., 2012). غنی‌شدگی از پتاسیم ( $K_2O=1/94-5/05$ ) می‌تواند در ارتباط با منشأ گوشته حاوی کانی‌های آب‌دار نظیر فلوگوپیت و آمفیبول و یا حاصل آرایش پوسته‌ای باشد (Foley, 1992a and b; Zheng et al., 2016). غنی‌شدگی از LILE و وجود آنومالی منفی Ba، Ti و P می‌تواند حاصل ذوب بخشی سنگ‌های پوسته قاره‌ای در قوس ماگمایی مرتبط با فرورانش باشد (Kolb et al., 2013). تهی‌شدگی از Ti نشانگر تبلور بخشی اکسیدهای Fe و Ti و یا کلینوپیروکسن در مراحل اولیه تفریق و یا فوگاسیته بالای اکسیژن است. آنومالی منفی Ba می‌تواند در ارتباط با تفریق فلدسپارها باشد (Arslan and Aslan, 2006). تهی‌شدگی Ti و Nb شاخص ماگماهای کالک آلکالین در یک حاشیه فعال قاره‌ای بوده و میزان Nb کمتر از ۷۰ ppm با مناطق فرورانش مرتبط است (Green, 2006). میزان Nb پایین در سنگ‌های اسیدی و حدواسط مورد مطالعه (۱۳/۳-۹/۵ ppm) بیانگر وابستگی آنها به مناطق فرورانش است. نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Boynton, 1984) برای گدازه‌های زولسک در شکل ۳-ت آمده است. در این نمودار، عناصر کمیاب سبک (LREE) نسبت به عناصر کمیاب سنگین (HREE)

مطالعه بین ۰/۸۶ تا ۰/۲۵ است که بی‌هنجاری منفی آن می‌تواند در ارتباط با تفریق فلدسپارها در حین تبلور ماگما باشد (Tepper et al., 1993; Girardi et al., 2012).

غنی‌شدگی نشان می‌دهند که از خصوصیات ماگماهای وابسته به فرورانش است (Helvacl et al., 2009; Asiabanha et al., 2012). نسبت  $Eu/Eu^*$  در گدازه‌های مورد

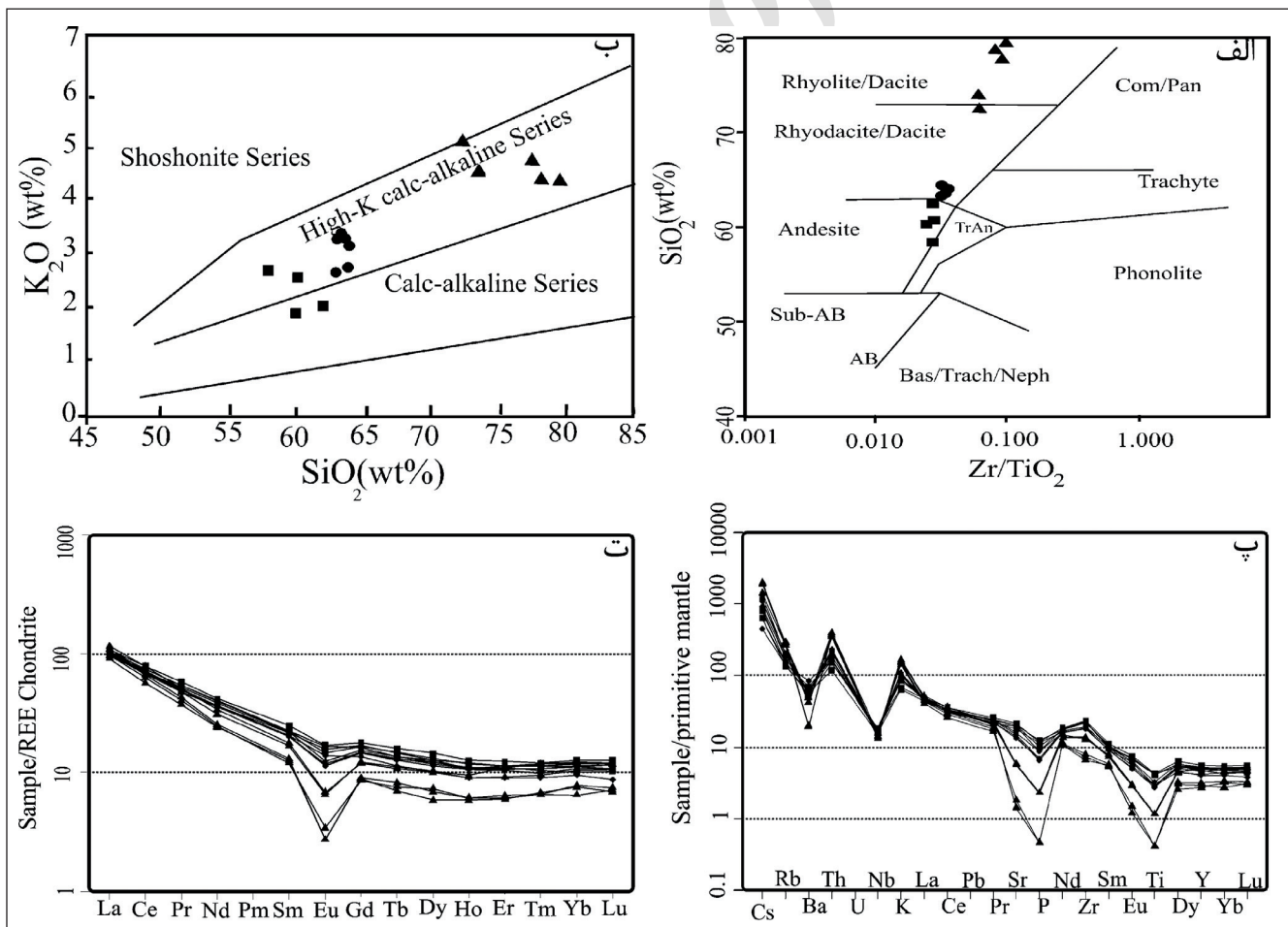
جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه زولسک.

Sample No.	A18	G6	C4	C2	D1	F8	B23	A24
Rock type	آندزیت	آندزیت	آندزیت	آندزیت	داسیت	داسیت	داسیت	داسیت
X	E59° 52' 59"	E59° 53' 41"	E59° 25' 44"	E59° 35' 59"	E59° 51' 16"	E59° 52' 51"	E59° 50' 49"	E59° 51' 35"
Y	N32° 43' 04"	N32° 43' 31"	N32° 43' 23"	N32° 43' 29"	N32° 43' 29"	N32° 44' 48"	N32° 43' 45"	N32° 42' 55"
SiO <sub>2</sub> (wt%)	۶۰/۳۳	۵۸/۳۰	۶۲/۳۹	۶۰/۴۹	۶۳/۹۳	۶۲/۳۸	۶۳/۴۸	۶۴/۲۶
TiO <sub>2</sub>	۸۹/۰	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۳
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴۸/۱۶	۱۶/۹۱	۱۶/۸۶	۱۶/۵۰	۱۵/۷۵	۱۶/۹۴	۱۵/۸۵	۱۵/۱۲
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	۱۶/۵	۶/۰۴	۴/۹۲	۵/۳۱	۴/۱۳	۳/۵۳	۴/۱۹	۴/۳۵
MnO	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۷
MgO	۳/۴۴	۳/۳۹	۱/۸۱	۳/۲۴	۲/۶۱	۰/۹۶	۲/۰۷	۲/۸۵
CaO	۵/۷۹	۵/۹۹	۴/۸۵	۵/۶۲	۴/۳۷	۴/۴۸	۴/۴۰	۴/۲۳
Na <sub>2</sub> O	۳/۵۵	۳/۶۵	۴/۲۴	۳/۶۵	۳/۴۷	۳/۸۸	۳/۴۸	۳/۳۸
K <sub>2</sub> O	۱/۹۴	۲/۶۹	۲/۰۴	۲/۵۵	۳/۲۷	۲/۷۰	۳/۲۷	۳/۱۶
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۵
L.O.I	۱/۸	۱/۵	۱/۴	۱/۲	۱/۵	۳/۱	۲/۲	۱/۶
Total	۹۹/۸۱	۹۹/۷۸	۹۹/۷۹	۹۹/۸۰	۹۹/۸۴	۹۹/۸۸	۹۹/۸۵	۹۹/۷۹
Ni(ppm)	۵۳	۲۵	۲۰	۲۰	۳۶	۲۰	۳۲	۳۹
Sc	۱۳	۱۳	۱۰	۱۳	۹	۶	۱۰	۱۰
Ba	۴۲۰	۳۶۵	۴۹۴	۴۳۵	۳۹۳	۵۹۹	۴۰۹	۳۹۳
Cs	۵/۰	۶/۹	۵/۰	۶/۳	۹/۱	۳/۶	۹/۷	۸/۸
Ga	۱۴/۷	۱۵/۳	۱۵/۵	۱۵/۱	۱۳/۷	۱۴/۹	۱۲/۸	۱۵/۱
Hf	۵/۲	۶	۵/۴	۵/۷	۵/۱	۴/۹	۵/۱	۵/۱
Nb	۱۱	۱۳/۲	۱۲/۴	۱۱/۹	۱۰/۹	۱۱/۲	۱۰/۷	۱۰/۷
Rb	۸۵/۷	۹۱/۷	۹۴/۳	۹۶/۴	۱۱۴/۹	۸۸/۲	۱۱۶/۲	۱۳۱/۶
Sr	۳۷۷/۶	۴۵۲/۲	۴۲۳/۶	۴۲۷/۲	۲۹۴/۴	۴۱۲/۸	۲۹۴	۲۸۳/۱
Ta	۰/۹	۱/۰	۱/۱	۰/۹	۱/۱	۰/۹	۰/۹	۰/۸
Th	۱۰/۱	۱۲/۷	۱۴/۲	۱۴	۱۹/۱	۱۴	۱۸/۸	۱۸/۴
U	۲/۳	۲/۹	۳/۱	۳/۰	۴/۱	۳/۱	۴/۰	۴/۱
V	۸۴	۱۰۴	۸۸	۹۶	۶۹	۵۳	۶۵	۷۲
Zr	۲۲۱/۶	۲۶۳/۳	۲۴۵	۲۴۸/۷	۲۰۷	۱۹۸/۹	۲۰۴/۴	۲۰۹/۹
Y	۲۳/۲	۲۵/۱	۲۱	۲۳/۱	۲۰/۹	۱۸/۱	۲۱/۹	۲۲/۴
La	۳۰/۱	۳۳/۷	۳۲/۸	۳۲/۹	۳۱/۷	۳۲/۳	۳۱/۷	۳۰/۵
Ce	۵۵/۷	۴۶	۶۰/۳	۶۰/۲	۵۸/۱	۵۵/۲	۵۸/۳	۵۶/۷
Pr	۶/۱۲	۷/۱۴	۶/۵۹	۶/۵۷	۶/۱۷	۵/۸۷	۶/۰۹	۶/۰۶
Nd	۲۱/۹	۲۵/۲	۲۳/۸	۲۳/۷	۲۱/۷	۲۱/۵	۲۱/۵	۲۱/۸
Sm	۴/۲۷	۴/۸۹	۴/۴۲	۴/۶۵	۳/۹۷	۳/۹۹	۳/۹۵	۴/۰۱
Eu	۱/۱۵	۱/۲۵	۱/۲۱	۱/۱۱	۰/۸۷	۱/۰۲	۰/۸۳	۰/۸۴
Gd	۴/۴۰	۴/۶۵	۴/۱۹	۴/۳۵	۳/۸۴	۳/۵۴	۳/۷۹	۳/۸۶
Tb	۰/۶۹	۰/۷۶	۰/۶۴	۰/۷۰	۰/۶۲	۰/۵۴	۰/۶۰	۰/۶۱
Dy	۴/۰۵	۴/۶۷	۳/۹۷	۴/۲۴	۳/۸۱	۳/۳۱	۳/۶۷	۳/۹۱
Ho	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۷۹	۰/۸۶	۰/۷۷	۰/۶۵	۰/۷۶	۰/۷۷

Sample No.	A18	G6	C4	C2	D1	F8	B23	A24
Rock type	آندزیت	آندزیت	آندزیت	آندزیت	داسیت	داسیت	داسیت	داسیت
Er	۲/۳۷	۲/۶۲	۲/۳۰	۲/۴۸	۲/۲۵	۱/۸۹	۲/۲۰	۲/۲۲
Tm	۰/۳۸	۰/۳۹	۰/۳۴	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۳۵
Yb	۲/۵۴	۲/۶۶	۲/۱۰	۲/۴۷	۲/۳۶	۲	۲/۲۴	۲/۳۳
Lu	۰/۳۹	۰/۴۱	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۳۷
Eu/Eu*	۰/۸۱	۰/۸۰	۰/۸۶	۰/۷۵	۰/۶۸	۰/۸۳	۰/۶۶	۰/۶۵
Ba/Nb	۳۸/۱۸	۲۷/۶۵	۳۹/۸۰	۳۶/۵۵	۳۶/۰۵	۵۳/۴۸	۳۸/۲۲	۳۶/۷۳
Ce/Yb	۲۱/۹۳	۱۷/۲۹	۲۸/۷۱	۲۴/۳۷	۲۴/۶۲	۲۷/۶۰	۲۶/۰۳	۲۴/۳۳

Sample No.	G8	C15	D4	A10	D7	D11	B5
Rock type	داسیت	داسیت	ریولیت	ریولیت	ریولیت	ریولیت	ریولیت
X	E59° 53' 09"	E59° 50' 46"	E59° 51' 35"	E59° 52' 05"	E59° 51' 21"	E59° 51' 41"	E59° 50' 27"
Y	N32° 43' 10"	N32° 44' 07"	N32° 43' 33"	N32° 43' 04"	N32° 43' 46"	N32° 44' 01"	N32° 44' 36"
SiO <sub>2</sub> (wt%)	۶۴/۱۹	۶۳/۶۷	۷۲/۵۹	۷۸/۵۷	۷۳/۸۴	۷۹/۸۲	۷۷/۷۷
TiO <sub>2</sub>	۰/۷۱	۰/۶۳	۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۰۹
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۵/۹۵	۱۵/۶۷	۱۲/۹۰	۱۱/۱۰	۱۳/۱۳	۱۰/۷۵	۱۱/۳۰
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	۴/۳۳	۴/۳۵	۱/۷۹	۰/۹۰	۱/۸۰	۰/۷۰	۰/۷۵
MnO	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱
MgO	۲/۱۵	۲/۶۴	۰/۵۴	۰/۱۲	۰/۳۰	۰/۰۹	۰/۲۳
CaO	۴/۵۲	۴/۳۲	۱/۴۴	۰/۵۹	۱/۵۰	۰/۴۱	۰/۴۶
Na <sub>2</sub> O	۳/۵۴	۳/۳۸	۲/۴۶	۳/۰۲	۳/۲۰	۲/۴۶	۲/۴۸
K <sub>2</sub> O	۲/۷۶	۳/۳۶	۵/۰۵	۴/۳۸	۴/۵۷	۴/۳۳	۴/۷۰
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱
L.O.I	۱/۴	۱/۶	۲/۸	۱/۱	۱/۳	۱/۳	۲/۱
Total	۹۹/۸۵	۹۹/۸۳	۹۹/۹۲	۹۹/۹۲	۹۹/۹۳	۹۹/۹۶	۹۹/۹۱
Ni(ppm)	۲۰	۳۸	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
Sc	۱۰	۱۰	۳	۱	۳	۱	۱
Ba	۴۳۵	۴۳۰	۲۹۷	۱۳۵	۳۴۶	۱۳۹	۱۳۷
Cs	۷/۴	۱۰/۳	۱۵/۹	۱۵/۹	۱۵/۵	۱۵/۲	۱۱/۴
Ga	۱۵/۷	۱۴/۱	۱۲/۶	۸/۶	۱۲/۳	۱۰/۳	۹/۵
Hf	۵/۸	۵/۳	۴/۴	۳	۴/۳	۳/۳	۲/۷
Nb	۱۱/۶	۱۱/۶	۱۰/۲	۱۰	۱۱/۲	۱۰	۹/۵
Rb	۱۱۳/۶	۱۲۴/۶	۲۲۲/۷	۱۶۹	۱۷۹/۸	۱۸۴/۸	۱۶۸/۹
Sr	۳۴۰/۴	۳۱۱/۵	۱۲۲/۸	۳۹/۲	۱۲۱	۳۰/۱	۲۹/۵
Ta	۱/۰	۱/۰	۱/۳	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱/۲
Th	۱۶/۲	۲۰/۱	۳/۲	۳۱/۹	۳۳/۶	۳۳/۸	۳۱/۹
U	۲/۹	۴/۰	۲/۶	۲/۵	۵/۵	۳/۵	۵/۰
V	۶۵	۷۲	۱۸	۱۱	۱۷	۸	۱۲
Zr	۲۵۶/۶	۲۱۵/۳	۱۵۲/۱	۷۳/۸	۱۴۴/۷	۸۹/۳	۸۲/۱
Y	۲۴	۲۳/۷	۲۲/۴	۱۲/۳	۱۹/۱	۱۳	۱۴/۴
La	۳۲/۷	۳۲/۶	۳۴/۱	۲۸/۳	۳۶/۱	۳۱/۵	۳۰/۳
Ce	۶۰/۴	۵۷/۵	۵۸/۱	۴۶	۶۴	۵۴/۳	۵۱/۵
Pr	۶/۶۴	۶/۴۲	۵/۸۲	۴/۵۶	۶/۲۸	۵/۲۵	۴/۹۶
Nd	۲۴/۲	۲۳	۱۸/۶	۱۴/۵	۲۰/۴	۱۵/۲	۱۴/۷

Sample No.	G8	C15	D4	A10	D7	D11	B5
Rock type	داسیت	داسیت	ریولیت	ریولیت	ریولیت	ریولیت	ریولیت
Sm	۴/۴۱	۴/۳۳	۳/۲۷	۲/۴۵	۳/۴۸	۲/۵۶	۲/۳۵
Eu	۱/۰۷	۰/۹۲	۰/۴۸	۰/۲۰	۰/۵	۰/۲۰	۱/۲۵
Gd	۴/۳۳	۴/۰۱	۳/۱۴	۲/۳۱	۳/۱۰	۲/۳۳	۲/۳۳
Tb	۰/۷۰	۰/۶۵	۰/۵۳	۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۳۹	۰/۳۶
Dy	۴/۲۲	۴/۰۵	۳/۳۱	۱/۸۸	۳/۲۱	۲/۲۲	۲/۳۶
Ho	۰/۸۴	۰/۷۸	۰/۶۸	۰/۴۲	۰/۶۵	۰/۴۴	۰/۴۴
Er	۲/۴۰	۲/۴۰	۲/۳۰	۱/۲۵	۱/۹۲	۱/۲۸	۱/۳۴
Tm	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۲۲	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۲۱
Yb	۲/۴۸	۲/۳۳	۲/۵۳	۱/۵۷	۲/۱۹	۱/۳۵	۱/۶۳
Lu	۰/۳۹	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۲۳	۰/۲۴
*Eu/Eu	۰/۷۵	۰/۶۸	۰/۴۶	۰/۲۶	۰/۴۷	۰/۲۵	۰/۳۳
Ba/Nb	۳۷/۵۰	۳۷/۰۶	۲۹/۱۲	۱۳/۵۰	۳۰/۸۹	۱۳/۹۰	۱۴/۴۲
Ce/Yb	۲۴/۳۵	۲۴/۶۸	۲۲/۹۶	۲۹/۳۰	۲۹/۲۲	۴۰/۲۲	۳۱/۵۹



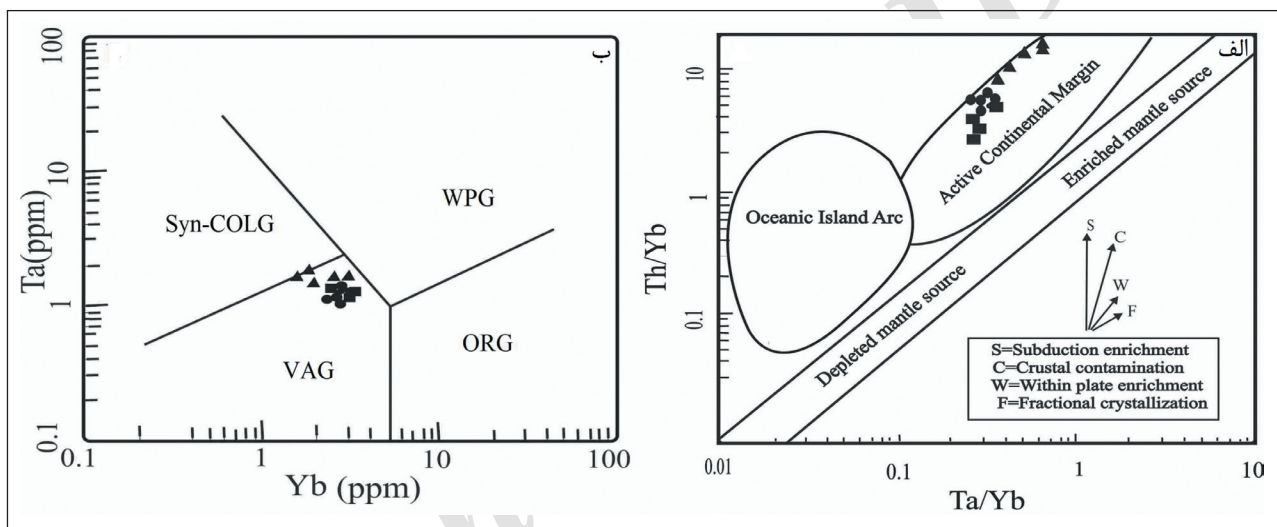
شکل ۳- الف) موقعیت نمونه‌های منطقه زولسک در نمودار  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  در مقابل  $\text{SiO}_2$  (Winchester and Floyd, 1977)؛ ب) نمودار  $\text{K}_2\text{O}$  در مقابل  $\text{SiO}_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976) برای تعیین ماهیت ماگما؛ پ) نمودار چندعنصری بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)؛ ت) نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Boynton, 1984). علائم مورد استفاده در شکل عبارتند از: مربع=آندزیت؛ دایره=داسیت؛ مثلث=ریولیت.

۶- بحث

۶-۱. جایگاه تکنونیک

مطالعه متعلق به حاشیه قاره‌ای فعال هستند (شکل ۴- الف). متاسوماتیسم مرتبط با فرورانش باعث غنی‌شدگی گوه گوشته‌ای از LILE و LREE و صعود ماگما از میان پوسته قاره‌ای ضخیم شده باعث آلودگی پوسته و در نتیجه افزایش K و Th می‌شود (Esperanca et al., 1992). نسبت بالای Th/Yb می‌تواند ویژگی یک منشأ متاسوماتیزم شده طی فرورانش و یا مرتبط با آرایش پوسته یا هر دو فرایند باشد (Condie, 1989). تغییرات نسبت Ta/Yb و Th/Yb بیانگر تغییرات در خاستگاه است و ماگمای مادر آنها بر اثر ذوب بخشی گوه گوشته‌ای وابسته به فرورانش به علت اضافه شدن اجزای متاسوماتیک آزاد شده از لیوسفر اقیانوسی فرورونده به وجود می‌آید (Hoang et al., 2011; Harangi et al., 2007). نمودار Ta در برابر Yb (Pearce et al., 1984) نیز نشان می‌دهد که موقعیت تکنونیک سنگ‌های آتشفشانی حدواسط و اسیدی منطقه زولسک با کمان‌های آتشفشانی مطابقت دارد (شکل ۴- ب).

همان‌طور که گفته شد، گدازه‌های منطقه زولسک ترکیب آندزیت، داسیت، ریولیت و ماهیت کالک آلکالین پتاسیم بالا تا متوسط دارند. موازی بودن الگوی عناصر کمیاب در سنگ‌های منطقه مورد مطالعه، می‌تواند بیانگر خاستگاه مشترک این سنگ‌ها و نقش تبلور تفریقی به عنوان سازوکار اصلی تشکیل آنها باشد. آندزیت، داسیت و ریولیت در محیط‌های مختلف زمین‌ساختی یافت می‌شوند، اما عمدتاً در مناطق فرورانش (فوس جزیره و حاشیه فعال قاره‌ای) وجود دارند. ترکیب آنها در این گونه محیط‌ها به فرایندهای داخلی در مرزهای همگرا بستگی دارد (Gill, 2010; Price et al., 2016). ماگماهای حاشیه فعال قاره‌ای دارای نسبت بالای LILE/HFSE و LREE/HREE هستند (Castillo, 2006). از نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 1983; Pearce et al., 2009; Siddiqui et al., 2007; Helvacl et al., 2009) برای تشخیص جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه زولسک استفاده شد. بر این اساس، گدازه‌های مورد

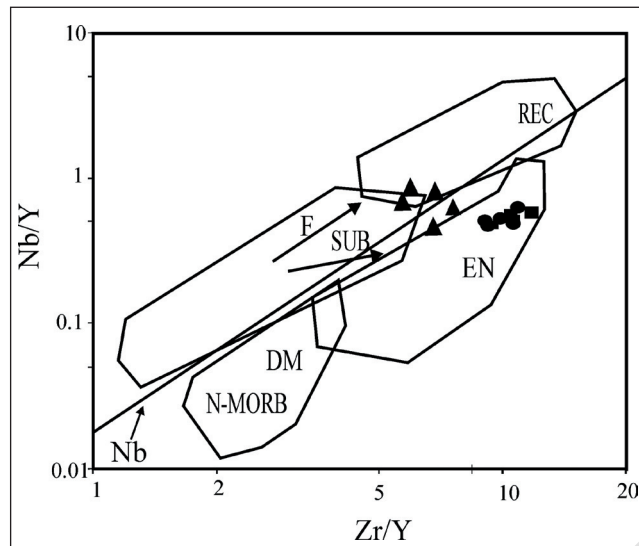


شکل ۴- الف) نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 1983; Siddiqui et al., 2007; Helvacl et al., 2009)؛ ب) نمودار Ta در مقابل Yb (Pearce et al., 1984). علائم مشابه شکل ۳ است.

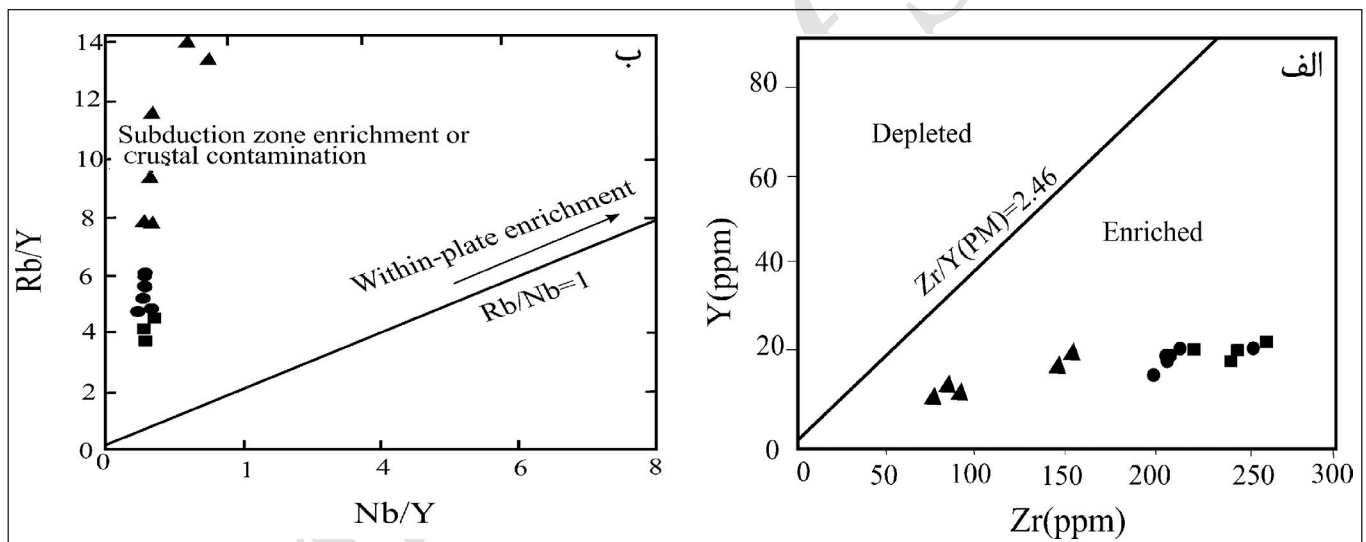
۶-۲. منشأ

عناصری مانند Y و Zr در مقابل سیالات غیر متحرک هستند و قادرند که اطلاعاتی در مورد منبع گوشته‌ای و میزان غنی‌شدگی و تهی‌شدگی در اختیار قرار دهند (Tatsumi et al., 1986). نمودار Y در مقابل Zr (Sun and McDonough, 1989) برای تفکیک مواد مذاب منشأ گرفته از گوشته غنی شده استفاده شد که تمام نمونه‌ها در محدوده گوشته غنی شده قرار گرفته‌اند (شکل ۶- الف). به منظور تعیین روند غنی‌شدگی عنصری سنگ‌های منطقه زولسک در ارتباط با محیط‌های زمین‌ساختی، از نمودار Nb/Y در مقابل Rb/Y (Edwards et al., 1991) نیز استفاده شد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود تغییرات Rb و Nb در سنگ‌های منطقه مطالعاتی، حاصل غنی‌شدگی در پهنه فرورانش یا آرایش پوسته‌ای است (شکل ۶- ب). لازم به ذکر است که در محیط‌های درون صفحه‌ای، روند غنی‌شدگی متفاوت است و از روند خط  $Rb/Nb=1$  پیروی می‌کند. نمونه‌های منطقه زولسک مقادیر پایین Nb/Y را نشان می‌دهند (۰/۴ تا ۰/۸) که بیانگر تهی‌شدگی از HFSE و وابستگی آنها به فرورانش است. در محیط‌های فرورانش، عناصر HFS مانند Ta، Ti، و Nb در صفحه فرورونده باقی می‌مانند و عناصر LIL نظیر Sr، Rb، و Ba به راحتی به قسمت‌های بالای گوشته منتقل می‌شوند (Pearce, 1983).

به عقیده Pearce and Norry (1979) از نسبت عناصر کمیاب Zr/Y می‌توان برای شناسایی رژیم زمین‌ساختی استفاده کرد.  $Zr/Y > 3$  نشان‌دهنده کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای و مقدار  $Zr/Y < 3$  بیانگر کمان‌های آتشفشانی اقیانوسی است. سنگ‌های آتشفشانی منطقه زولسک دارای نسبت Zr/Y بیشتر از ۳ (۵ تا ۱۱) هستند و در گروه کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای قرار می‌گیرند. نسبت Ba/Nb نیز برای تفکیک ماگماتیسیم کمان مورد استفاده قرار می‌گیرد، به طوری که نسبت بالای آن بیانگر ماگماتیسیم کمان آتشفشانی قاره‌ای است (Pearce et al., 1984). میانگین این نسبت برای گدازه‌های زولسک ۳۲/۲ است که جایگاه کمان آتشفشانی قاره‌ای را تأیید می‌کند. ماگمای کمان آتشفشانی بر اساس نسبت Ce/Yb به دونوع غنی شده و اندکی غنی شده تقسیم می‌شود (Pearce and Norry, 1979). اگر نسبت مذکور بیشتر از ۱۵ باشد بیانگر کمان غنی شده و در صورتی که کمتر از ۱۵ باشد، معرف کمان کمی غنی شده است. میانگین این نسبت در گدازه‌های زولسک ۲۶/۴۸ است که با ماگمای کمان غنی شده مطابقت دارد. گدازه‌های بررسی شده در نمودار Nb/Y در مقابل Zr/Y در محدوده سازنده غنی شده (EN) قرار می‌گیرند (شکل ۵) که بیانگر غنی‌شدگی منشأ آنها طی فرایند فرورانش و یا آلودگی پوسته‌ای است (Condie, 2005).



شکل ۵- نمودار Nb/Y در مقابل Zr/Y (Condie, 2005) برای نمونه‌های منطقه زولسک، پیکان‌ها اثر ذوب (F) و فرورانش (SUB) را نشان می‌دهند. DM=گوشته تپی شده کم عمق، EN=بخش غنی شده، REC=بخش بازیافت (علامت مشابه شکل ۳).

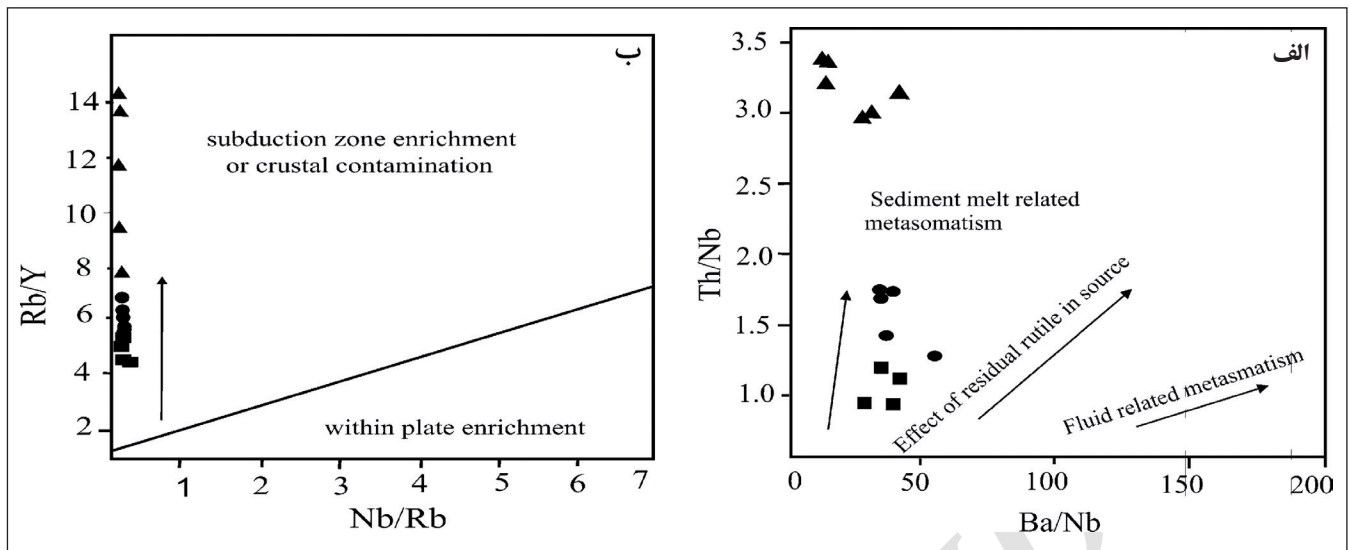


شکل ۶- الف) نمودار متمایز کننده گوشته غنی شده و تپی شده (Sun and McDonough, 1989)؛ ب) نمودار Rb/Y در مقابل Nb/Y (Edwards et al., 1991) برای تعیین روند غنی‌شدگی نمونه‌های منطقه زولسک (علامت مشابه شکل ۳).

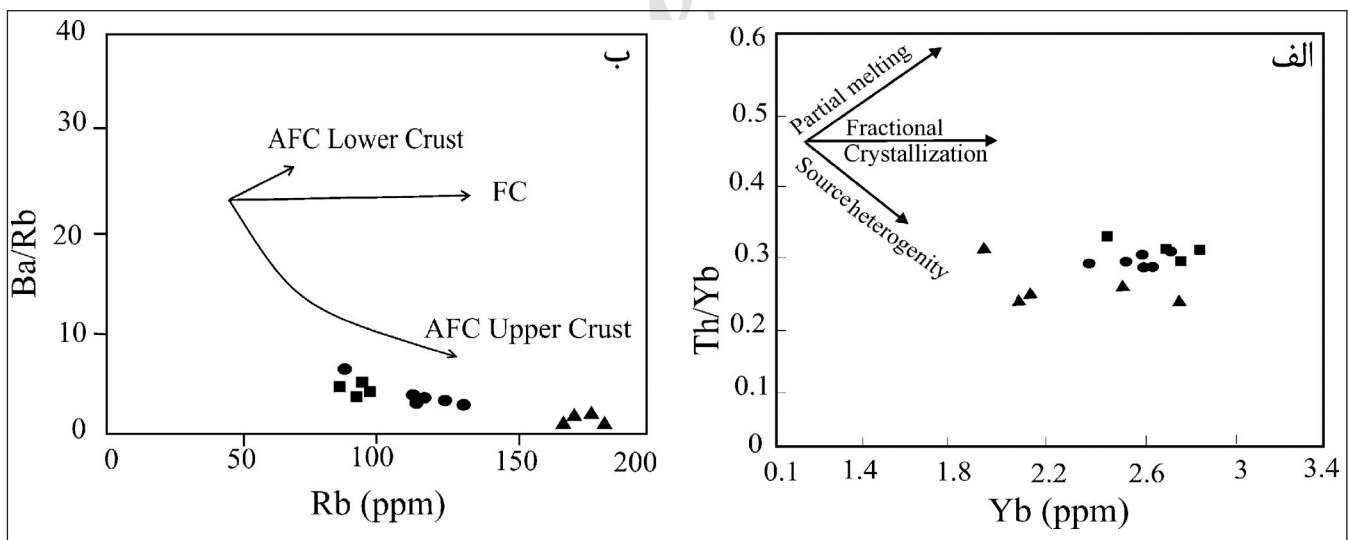
نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Boynnton, 1984) برای گدازه‌های زولسک (شکل ۳-ت) نشان‌دهنده روند تخت عناصر نادر خاکی سنگین ( $Er_N/Lu_N$  بین ۰/۸۵ تا ۱/۰۶) و تفریق یافتگی اندک عناصر نادر خاکی متوسط ( $Gd_N/Ho_N$  بین ۱/۲ تا ۱/۵) است. آنومالی منفی Eu ( $Eu^*=2Eu_N/Sm_N+Gd_N$ ) بین ۰/۲ تا ۰/۸) بیانگر نقش پلاژیوکلاز در حین تبلور و عناصر نادر خاکی سبک تفریق یافته ( $La_N/Sm_N$  بین ۴/۳ تا ۸/۱) مؤید فرایند تفریق در حین انجماد است (Mohammadi et al., 2016). برای مشخص کردن نقش آلودگی پوسته‌ای در سنگ‌های آتشفشانی زولسک از نمودار Ba/Rb در مقابل Rb (Askren et al., 1999) استفاده شد (شکل ۸-ب). در این نمودار، سنگ‌های منطقه مورد بررسی روند آلابش با پوسته بالایی را نشان می‌دهند. تبلور جز به جز، آلودگی با پوسته و اختلاط ماگما، فرایندهای مهم مؤثر در ایجاد سنگ‌های حدواسط و اسیدی هستند (Zheng et al., 2016).

نمودارهای Th/Nb در مقابل Ba/Nb (Ersoy and Helvacl, 2010) (شکل ۷- الف) و Rb/Y در مقابل Nb/Rb (Temel and Gondogdu, 1998) (شکل ۷- ب) نقش سیالات در فرایند غنی‌سازی گوه گوشته‌ای را نشان می‌دهند. با توجه به ویژگی‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های مطالعه شده و نمودارهای ترسیم شده، می‌توان چنین نتیجه گرفت که در خاستگاه نمونه‌های مورد بررسی، از بین اجزای فرورانشی، متاسوماتیسم مربوط به رسوبات فرورونده یا اضافه شدن سیالات حاصل از سنگ‌های آذرین فرورونده، نقش موثری در غنی‌شدگی گوه گوشته‌ای دارد و نمونه‌ها در راستای روند مربوطه قرار گرفته‌اند (Ersoy and Helvacl, 2010). نمودار Th/Yb در برابر Yb (Fan et al., 2004) نقش فرایندهای مختلف نظیر ذوب بخشی، تبلور جزء به جزء و منشأ هتروژن (اختلاط ماگمایی) را در تشکیل ماگمای والد سنگ‌های آتشفشانی نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر نقش فرایند تبلور جزء به جزء در تشکیل گدازه‌های منطقه زولسک است (شکل ۸- الف).





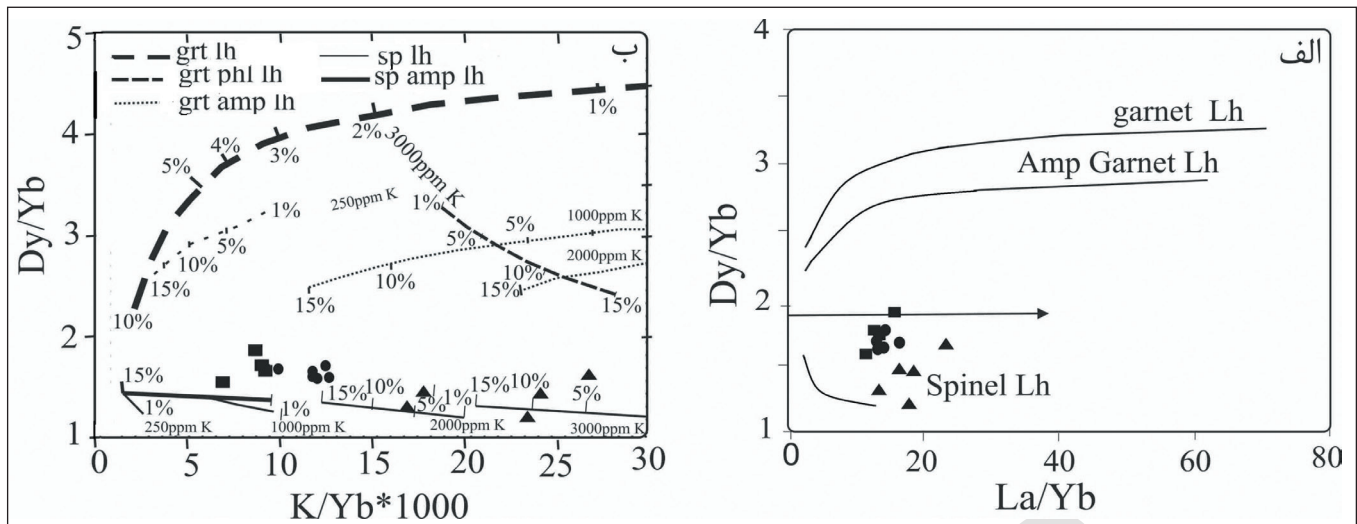
شکل ۷- الف) نمودار  $Th/Nb$  مقابل  $Ba/Nb$  (Ersoy and Helvacl, 2010)؛ ب) نمودار  $Rb/Y$  مقابل  $Nb/Rb$  (Temel and Gondogdu, 1998) برای سنگ‌های آتشفشانی زولسک (علائم مشابه شکل ۳).



شکل ۸- الف) نمودار  $Th/Yb$  در مقابل  $Yb$  (Fan et al., 2004)؛ ب) نسبت  $Ba/Rb$  در مقابل  $Rb$  (Askren et al., 1999) برای تعیین فرایندهای مؤثر در تشکیل گدازه‌های منطقه زولسک (علائم مشابه شکل ۳).

الگوی صاف و نسبتاً هموار HREE در نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Boynnton, 1984) بین عناصر  $Lu$  و  $Ho$  (شکل ۳-ت) می‌تواند نشان‌دهنده ذوب یک منبع لرزولیتی باشد (Lin et al., 1989). نسبت پایین  $Dy/Yb$  بیانگر منشأ گوشته اسپینل لرزولیتی برای ماگماست؛ در حالی که نسبت بالای  $Dy/Yb$  (>۲/۵) حاکی از یک منبع غنی از گارنت لرزولیت است. نمودار  $Dy/Yb$  در مقابل  $La/Yb$  (Barker et al., 1997) یک منشأ اسپینل لرزولیتی را برای گدازه‌های زولسک معرفی می‌کند (شکل ۹-الف). نمودار  $Dy/Yb$  در مقابل  $K/Yb * 1000$  (Duggen et al., 2005) نیز به نقش مؤثر یک منبع اسپینل لرزولیتی در تولید ماگمای سازنده گدازه‌های مورد بررسی دلالت دارد (شکل ۹-ب).

الگوی صاف و نسبتاً هموار HREE در نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Boynnton, 1984) بین عناصر  $Lu$  و  $Ho$  (شکل ۳-ت) می‌تواند نشان‌دهنده ذوب یک منبع لرزولیتی باشد (Lin et al., 1989). نسبت پایین  $Dy/Yb$  بیانگر منشأ گوشته اسپینل لرزولیتی برای ماگماست؛ در حالی که نسبت بالای  $Dy/Yb$  (>۲/۵) حاکی از یک منبع غنی از گارنت لرزولیت است. نمودار  $Dy/Yb$  در مقابل  $La/Yb$  (Barker et al., 1997) یک منشأ اسپینل لرزولیتی را برای گدازه‌های زولسک معرفی می‌کند (شکل ۹-الف). نمودار  $Dy/Yb$  در مقابل  $K/Yb * 1000$  (Duggen et al., 2005) نیز به نقش مؤثر یک منبع اسپینل لرزولیتی در تولید ماگمای سازنده گدازه‌های مورد بررسی دلالت دارد (شکل ۹-ب).



شکل ۹- الف) نمودار Dy/Yb در مقابل La/Yb (Barker et al., 1997)؛ ب) نمودار Dy/Yb در مقابل K/Yb\*1000 (Duggen et al., 2005). علائم مشابه شکل ۳ است.

## ۷- نتیجه‌گیری

کندریت، حاکی از غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل بزرگ‌یون و عناصر نادر خاکی سبک و تهی‌شدگی عناصر نادر خاکی سنگین بوده که از ویژگی‌های شاخص ماگماهای کالک‌آلکان حاشیه فعال قاره‌ای است. ویژگی‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های بررسی شده بیانگر این است که اجزای فرورانشی، نقش موثری در غنی‌شدگی گوه‌گوشته‌ای داشته‌اند. تبلور تفریقی و آرایش ماگما با پوسته بالایی، فرایندهای مؤثر در تکامل ماگمای سازنده گدازه‌های منطقه زولسک هستند. الگوی موازی عناصر کمیاب در سنگ‌های مورد مطالعه، بیانگر خاستگاه مشترک آنهاست.

سنگ‌های آتشفشانی ترشیری در منطقه زولسک شامل سنگ‌های آذرآواری (توف-برش) و گدازه‌های حدواسط-اسیدی (الیگوسن-میوسن) هستند. در برخی موارد، گدازه‌های ریولیتی و ویژگی‌های پرلیت نظیر بافت شیشه‌ای پرلینی را نشان می‌دهند که حائز اهمیت اقتصادی است. بافت غربالی، منطقه‌بندی شیمیایی و حاشیه‌های گرد شده و خلیجی در فنوکریست‌های گدازه‌های بررسی شده رایج است که می‌تواند بیانگر عدم تعادل در حین انجماد باشد. نمودارهای بهنجار شده عناصر کمیاب و نادر خاکی سنگ‌های منطقه زولسک نسبت به گوشته اولیه و

## کتابنگاری

- بهاروندی، آ.، ۱۳۹۵- پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی منطقه بشگر (شمال غرب سریشه، استان خراسان جنوبی)، با نگرشی بر پتانسیل اقتصادی آنها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، ۱۵۹ ص.
- بیانی، ر.، ۱۳۹۴- پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی ترشیری منطقه شوشک (شرق سریشه) با نگرشی بر پتانسیل اقتصادی آنها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، ۱۰۹ ص.
- پارسایی، م.، ۱۳۹۱- مطالعه زمین‌شناسی، دگرسانی و پترولوژی سنگ‌های آذرین شرق مود (جنوب شرق بیرجند)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، ۱۱۵ ص.
- چهکندی‌نژاد، م.، ۱۳۹۴- پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی ترشیری منطقه آسفنج (جنوب غرب سریشه) با نگرشی بر پتانسیل اقتصادی آنها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، ۸۴ ص.
- عرب، م.، ۱۳۹۵- پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیژان (شمال غرب سریشه)، خراسان جنوبی با نگرشی بر اهمیت اقتصادی آنها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، ۱۱۲ ص.
- گودرزی، م.، محمدی، س. س. و زرین‌کوب، م. ح.، ۱۳۹۳- سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی ترشیری سلم‌آباد (جنوب شرق سریشه)، شرق ایران، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۶، شماره ۲، صص. ۲۲۱۷ تا ۲۳۴.
- مکی‌پور، م.، ۱۳۹۱- مطالعه زمین‌شناسی و پترولوژی سنگ‌های آذرین منطقه گلاب سریشه (شرق ایران)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، ۱۱۷ ص.
- ملکیان دستجردی، م.، ۱۳۹۴- پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی منطقه کنگان (شمال شرق سریشه)، استان خراسان جنوبی، با نگرشی بر اهمیت اقتصادی آنها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، ۱۳۱ ص.
- نظری، ح. و سلامتی، ر.، ۱۳۷۸- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سریشه، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نظری، ز.، ۱۳۹۰- بررسی زمین‌شناسی و پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی شمال غرب سریشه (خاور ایران)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، ۱۲۳ ص.

## References

- Arslan, M. and Aslan, Z., 2006- Mineralogy, petrography and wholerock geochemistry of the Tertiary granitic intrusions in the Eastern Pontides, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences* 27: 177-193
- Asiabanha, A., Bardintzeff, J. M., Kananian, A. and Rahimi, G., 2012 - Post-Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences* 45: 79–94.
- Askren, D. R., Roden, M. F. and Whitney, J. A., 1999- Petrogenesis of Tertiary andesite lava flows interlayered with large-volume felsic ash-flow tuffs of the Western USA. *Journal of Petrology* 38: 1021-1046.
- Barker, A. J., Menzies, M. A., Thirlwall, M. F. and Macpherson, C. G., 1997- Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism, Sana'a, Yemen: Implications for plume-lithosphere interaction and polybaric melt hybridization. *Journal of petrology* 38: 1359-1390.
- Boynton, W. V., 1984- Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson, P. (Ed), *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam: 63-114.
- Caffe, P. j., Trumbull, R. B. and Siebel, W., 2012- Petrology of the Coyaguayma ignimbrite, northern Puna of Argentina: Origin and evolution of a peraluminous high-SiO<sub>2</sub> rhyolite magma. *Lithos* 134-135: 179-200.
- Castillo, P. R., 2006- An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin* 51: 257-268.
- Condie, K. C., 1989- Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean Proterozoic boundary: identification and significance. *Lithos* 23: 1-18.
- Condie, K. C., 2005- High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes?. *Lithos* 79: 491-504.
- Duggen, S., Hoernle, K., Bogaard, P. V. D. and Garbe-schonberg, D., 2005- Post-collisional transition from subduction to intraplate-type magmatism in the westernmost Mediterranean: evidence for continental-edge delamination of subcontinental lithosphere. *Journal of Petrology* 46: 1155–1201.
- Edwards, C., Menzies, M. and Thirlwall, M., 1991- Evidence from Muriah, Indonesia, for the interplay of supra- subduction zone and intraplate processes in the genesis of potassic alkaline magmas. *Journal of Petrology* 32: 555-592.
- Ersory, E. Y. and Helvacı, C., 2010- FC–AFC–FCA and mixing modeler: a Microsoft® Excel© spreadsheet program for modeling geochemical differentiation of magma by crystal fractionation, crustal assimilation and mixing. *Computers and Geosciences* 36: 383–390.
- Esperanca, S., Crisci, G. M., de Rosa, R. and Mazzuoli, R., 1992- The role of the crust in the magmatic evolution of the island Lipari (Aeolian Islands, Italy), *Contributions to Mineralogy and Petrology* 112: 450-462.
- Fan, W. M., Guo, F., Wang, Y. J. and Zhang, M., 2004- Late Mesozoic volcanism in the northern Huaiyang tectono-magmatic belt, central China: partial melts from a lithospheric mantle with subducted continental crust relicts beneath the Dabie orogen?. *Chemical Geology* 209: 27-48.
- Foley, S., 1992a- Petrological characterization of the source components of potassic magmas: geochemical and experimental constraints. *Lithos* 28: 187–204.
- Foley, S., 1992b- Vein-plus-wall-rock melting mechanisms in the lithosphere and the origin of potassic alkaline magmas. *Lithos* 28: 435–453.
- Gill, R., 2010- *Igneous rocks and processes*, Wiley-Blackwell, Malaysia, 428p.
- Girardi, J. D., Patchett, P. J., Ducea, M. N., Gehrels, G. E., Cecil, M. R., Rusmore, M. E., Woodsworth, G. J., Pearson, D. M., Manthei, C. and Wetmore, P., 2012- Elemental and isotopic evidence for granitoid genesis from deep-seated sources in the Coast mountains batholith, British Columbia. *Journal of Petrology* 53: 1505-1536.
- Green, N. L., 2006- Influence of slab thermal structure on basalt source regions and melting conditions: REE and HFSE constraints from the 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: 2261-2287.
- Helvacı, C., Ersory, E. Y., Sozbilir, H., Erkul, F., Sumer, O. and Uzel, B., 2009- Geochemistry and Ar<sup>40</sup>/Ar<sup>39</sup> Geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: Implication for amphibole-bearing lithospheric mantle source, Western Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 185: 181-202.
- 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.
- Jung, D., Keller, J., Khorasani, R., Marcks, C., Baumann, A. and Horn, P., 1983- petrology of the Tertiary magmatic activity in the northern Lut area, east of Iran. *Geological survey of Iran, Tehran, Geodynamic project (Geotraverse) in Iran* 51: 285-336.
- 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: 19–36.
- Kolb, M., Quadt, A. V., Peytcheva, I., Heinrich, C. A., Fowler, S. J. and Cvetković, V., 2013- Adakite-like and normal arc magmas: distinct fractionation paths in the east Serbian segment of the Balkan-Carpathian arc. *Journal of Petrology* 54: 421-451.

- Lin, P. N., Stern, R. and Bloomer, S. H., 1989- Shoshonitic volcanism in the northern Mariana arc2. Large-ion lithophile and rare earth element abundances: evidence for the source of incompatible element enrichments in intraoceanic arcs. *Journal of Geophysical Research*94: 4497-4514.
- Mohammadi, A., Burg, J. P., Bouilhol, P. and Ruh, J., 2016- U–Pb geochronology and geochemistry of Zahedan and Shah Kuh plutons, southeast Iran: Implication for closure of the South Sistan suture zone. *Lithos* 248–251: 293–308.
- 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.
- 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., 1983- Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: *Continental basalts and mantle xenoliths* (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.). Shiva, Nantwich: 230-249.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G., 1984- Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*25: 956–983.
- Peccerillo, A. 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.
- Price, R. C., Smith, L. E. M., Stewart, R. B., Gamble, J. A., Gruender, K. and Mass, R., 2016- High K andesite petrogenesis and crustal evolution: Evidence from mafic and ultramafic xenoliths, Egmont volcano (Mt. Taranaki) and comparisons with Ruapehu volcano, North Island, Newzaeland. *Geochemica et Cosmochimica Acta*185:328-357.
- Siddiqui, R. H., Asif Khan, M. and Qasim-Jan, M., 2007- Geochemistry and petrogenesis of the Miocene alkaline and sub-alkaline volcanic rocks from the Chagai arc, Baluchistan, Pakistan: Implications for porphyry Cu-Mo-Au deposits. *Journal of Himalayan Earth Sciences* 40: 1–23.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F., 1989- Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes In: Sanders A.D. and Norry M.J. (Eds), *Magmatism in Ocean basins*. Geological Society London Special Publications 42: 313-345.
- Tatsumi, Y., Hamilton, D. L. and Nesbitt, R. W., 1986- Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: Evidence from high-pressure experiments and natural rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*29: 293-309.
- Temel, A. and Gondogdu, M. N., 1998- Petrological and Geochemical Characteristics of Cenozoic High-k calcalkaline volcanism in Konga, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*85: 357-377.
- Tepper, J. H., Nelson, B. K., Bergantz, G. W. and Irving, A. J., 1993- Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington: generation of calc-alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. *Contributions to Mineralogy and Petrology*113:333-351.
- 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.
- Whitney, D. and Evans, B., 2010- Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American Mineralogist* 95: 185–187.
- Zheng, Y. F., Chen, R. X., Xu, Z. and Zhang, S. B., 2016- The transport of water in subduction zones. *Science China Earth Sciences*59: 651–682.

## Geochemistry, tectonic environment and origin of Oligo-Miocene lavas in Zoolesk area, northeast of Sarbisheh (Southern Khorasan)

M. Kouchi<sup>1</sup>, S. S. Mohammadi<sup>2\*</sup> and M. Nakhaei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M. Sc., Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

<sup>2</sup>Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

Received: 2018 January 22

Accepted: 2018 March 14

### Abstract

In northeast of Sarbisheh, southern Khorasan, outcrops of lava rocks exist that from view of geological subdivisions, located in eastern part of Lut block. Petrographic composition of studied rocks include of andesite (pyroxene andesite, andesite, trachy andesite), dacite and rhyolite. The main textures of these rocks are porphyry with microlitic-glass groundmass, glomeroporphyritic, poikilitic and vesicular. The constituent minerals of andesites are plagioclase, pyroxene and amphibole with small amounts of biotite and sanidine, in rhyolite and dacite include of quartz, sanidine, plagioclase, amphibole and biotite. Disequilibrium textures such as chemical zoning, sieve texture, rounded and gulf shape margins observed in phenocrysts of these rocks. Geochemical studies results show that these lavas belong to high to medium-K calc alkaline series. Enrichment in LREE and LILE, depletion in HREE and HFSE with negative anomaly of Ti, Nb and P in these rocks suggests active continental margin volcanic arc magmatism. Based on tectonic discrimination diagrams, Zoolesk area lavas are related to subduction zone and active continental margin. Low ratio of Dy/Yb(<2) in studied lavas, represents a spinel lherzolite mantle source for magma.

**Keywords:** Andesite, Oligo-Miocene, Active continental margin, Zoolesk, Lut block

For Persian Version see pages 255 to 266

\*Corresponding author: S. S. Mohammadi; E-mail: ssmohammadi@birjand.ac.ir

Archive of SID