



سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی و منشأ سنگهای آتشفشانی منطقه شمال غرب گناباد

صدیقه زیرجانی زاده¹، محمدحسن کریم‌پور^{1*}، خسرو ابراهیمی نصرآبادی¹ و ژوزه فرانسیسکو سانتوس²

(1) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(2) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آویرو، آویرو، پرتغال

دریافت: 1394/5/13، پذیرش: 1394/11/28

چکیده

محدوده مورد بررسی، در شرق ایران، شمال بلوک لوت و شمال غرب گناباد واقع شده است. این محدوده شامل برون‌زدهایی از سنگهای آتشفشانی ائوسن با ترکیب آندزیت تا ریولیتی است که واحدهای نیمه‌عمیق و عمیق گرانیتی تا دیوریتی در آنها نفوذ کرده است. در این بررسی پتروژنز واحدهای آتشفشانی که بیشترین گسترش را دارند، مورد بررسی قرار گرفت. واحدهای پیروکلاستیک و گدازه با دامنه، ریولیت، ریوداسیت، داسیت، آندزیت، تراکیت و تراکی‌آندزیت در منطقه شناسایی شدند. بافت غالب این واحدها پورفیری، هیالوپورفیری و میکروولیتی و شامل کانیه‌های پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار نوع سانیدین، هورنبلند، بیوتیت و کوارتز هستند. بررسیهای ژئوشیمیایی حاصل از این پژوهش، نشان می‌دهد که این سنگها، ماهیت کالک‌آلکان پتاسیم بالا دارد و در محدوده متآلومینوس و پرآلومینوس قرار می‌گیرند. سنگهای آتشفشانی غنی‌شدگی LREE/HREE (La_N/Yb_N) طیفی از 3/53 تا 15/47 و آنومالی منفی Eu (با متوسط Eu*/Eu_N= 0/54) نشان می‌دهند. پایین بودن نسبت Al₂O₃/CaO+Na₂O+K₂O و شواهد ژئوشیمی عناصر نادر خاکی و کمیاب، نشان می‌دهد که منشأ ماگمای اولیه از پوسته بوده که در طی فرورانش شکل گرفته است. بر اساس نسبت ایزوتوپ اولیه ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr، ماگمای شکل‌دهنده واحدهای آندزیتی و ریولیتی از ذوب‌بخشی پوسته زیرین نشأت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: ایزوتوپ اولیه ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr، ژئوشیمی، سنگهای آتشفشانی، بلوک لوت، شرق ایران

مقدمه

شده است (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983; Jung et al., 1983; Berberian et al., 1999; Verdel, 2007) سن ماگماتیزم مجموعه آذرین شرق ایران را ائوسن تا الیگومیوسن تعیین کرده است و منشأ ولکانیزم با ویژگیهای نوع حاشیه قاره را گوشته بالایی می‌داند که در اثر آب آزاد شده از فرورانش، اکسید و ذوب شده است. دوره ائوسن میانی - الیگوسن تحتانی به‌عنوان دوره متالوژنی بلوک لوت است (Karimpour et al., 2011; Karimpour et al., 2012). توده‌های نفوذی سرخ‌کوه، شاه‌کوه و نجم‌آباد، براساس پذیرفتاری مغناطیسی پایین و بالابودن نسبت اولیه ایزوتوپ‌های ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0/7073 متعلق به گرانیتوئیدهای

محدوده مورد بررسی در شرق ایران، در گستره‌ای بین 30° 58' تا 40° 58' طولهای شرقی و 25° 34' تا 30° 34' عرضهای شمالی قرار می‌گیرد (شکل A-1 و B) و در فاصله 270 کیلومتری جنوب مشهد و تا فاصله 15 کیلومتری شمال جاده بجستان - گناباد در استان خراسان رضوی واقع شده است. محدوده مورد بررسی از نظر تقسیمات ساختاری در شمال بلوک لوت واقع شده است (Jung et al., 1983).

ماگماتیزم گسترده در این بلوک، از ژوراسیک آغاز شده و در ترشیری به اوج خود رسیده است، به طوری که ضخامت واحدهای ترشیری به‌خصوص ائوسن، به 2000 متر می‌رسد و در اثر فرورانش، پیش از برخورد صفحات عربی و آسیا تشکیل

توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی مس در منطقه گزو، 65/9 و 65/1 میلیون سال تعیین شده است. در شمال غرب گناباد، رخنمون قابل توجهی از فعالیت‌های آتشفشانی ترشیری با ترکیب کلی حدواسط و اسیدی به همراه نهشته‌های آذرآواری و توده‌های نیمه‌عمیق مشاهده می‌شود. پژوهشهایی که توسط محققان در این منطقه انجام شده است، شامل بررسی‌های ژئوشیمی سنگهای آتشفشانی در شمال غرب و شرق محدوده مورد بررسی بوده است (Kolahdani, 2009; Salarimendi et al., 2013). در این پژوهش سعی شده تا با استفاده از شواهد ژئوشیمیایی و رادیوایزوتوپ‌ها خاستگاه و جایگاه زمین‌ساختی مجموعه آتشفشانی شمال غرب گناباد مورد بررسی قرار گیرد؛ که می‌تواند در رابطه با شناخت فعالیت‌های ماگمایی بلوک لوت مفید باشد.

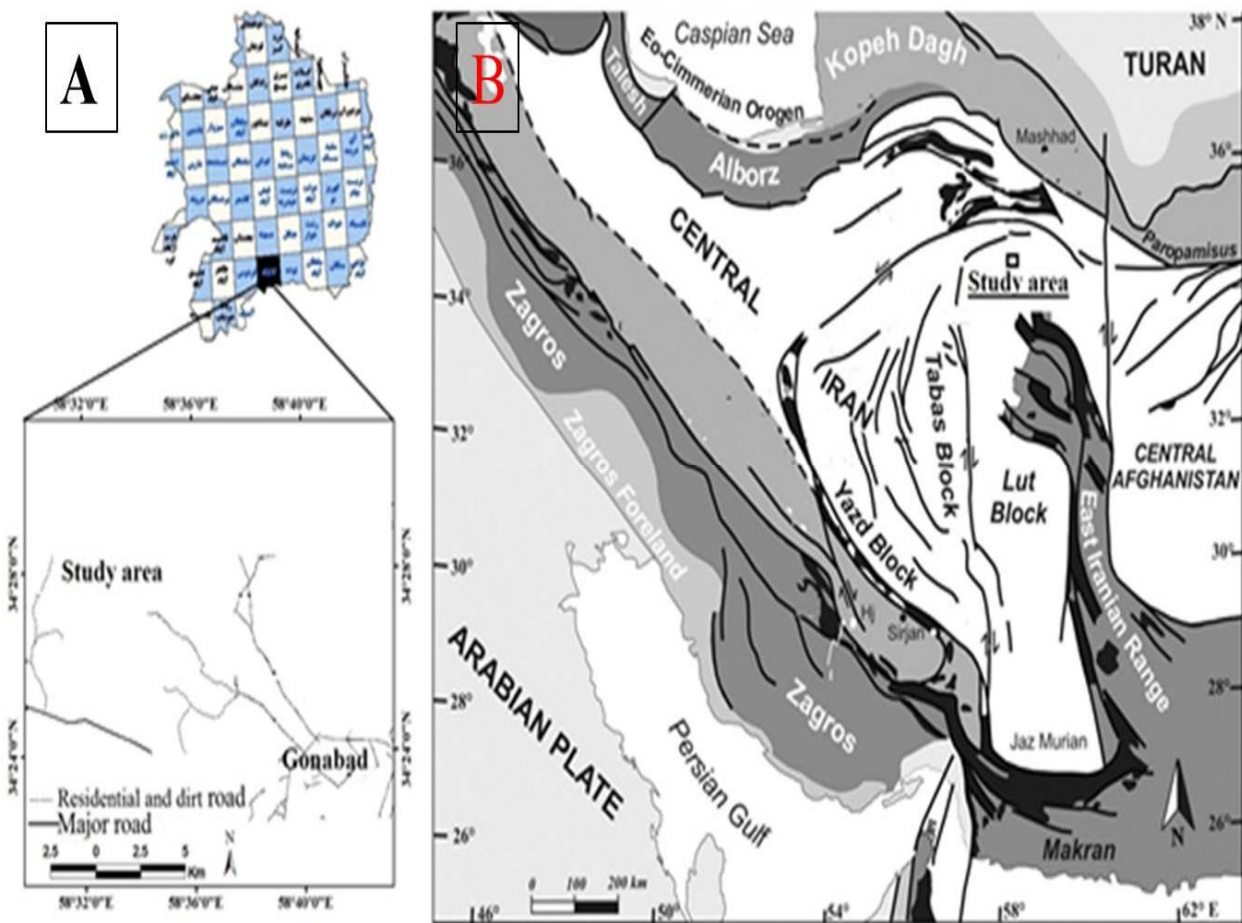
روش مطالعه

در راستای تهیه نقشه زمین‌شناسی از منطقه مورد بررسی، ابتدا برداشتهای صحرایی و نمونه‌برداری از واحدهای آتشفشانی در منطقه (با وسعت تقریبی 100 کیلومتر مربع) انجام شد. بیش از 200 نمونه از سطح منطقه جمع‌آوری شد و از این میان حدود 100 نمونه مقطع نازک از سنگهای آتشفشانی در منطقه تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. سپس نقشه زمین‌شناسی هر دو منطقه با نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. بعد از بررسی‌های پتروگرافی 6 نمونه با کمترین میزان دگرسانی و هوازدگی برای بررسی‌های پترولوژی انتخاب شدند. نمونه‌ها پس از خردایش و آماده سازی در شرکت طیف‌کنساران بینالود مشهد برای اکسیدهای اصلی به روش فلورسانس پرتو X (XRF) تجزیه شد. همچنین همین نمونه‌ها برای تجزیه عناصر فرعی و نادر خاکی به آزمایشگاه ACME کانادا ارسال و به روش پلاسما جفت شده القایی (ICP-MS)، روش محلول‌سازی ذوب قلیایی تجزیه شد (جدول 1). چهار نمونه جهت تجزیه ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd در دانشگاه آویرو، پرتغال، مورد تجزیه قرار گرفت (جدولهای 2 و 3). نمونه انتخابی پودر شده با اسید HF/HNO₃ در تفلون پار بمب در حرارت 200 درجه به مدت 3 روز حل شد. پس از تبخیر محلول نهایی، نمونه‌ها با HCl (6N) حل و خشک شد. عناصر با استفاده از روش کروماتوگرافی یونی معمولی در دو مرحله خالص شدند:

نوع احیایی و سری ایلمنیت هستند؛ که درون زون تصادم قاره تشکیل شده‌اند و منشأ پوسته قاره‌ای دارند (Moradi et al., 2011; Karimpour et al., 2010). بررسی‌های پترولوژیکی مختلفی در بلوک لوت بر روی توده‌های نفوذی، نیمه‌عمیق و آتشفشانی ترشیری انجام شده است که عمده توده‌ها از نوع نیمه‌عمیق با بافت پورفیری و ترکیب آنها از دیوریت تا گرانیت تشخیص داده شده است، ولی غالباً مونزونیتی بوده و به‌طور عمده از نوع متا آلومینوس هستند. این توده‌ها (به استثنای هیرد) متعلق به سری مگنتیت (نوع I) هستند (Malekzadeh Shafaroudi, 2009; Moradi et al., 2010; Karimpour et al., 2011; Arjmandzadeh et al., 2011; Abdi and Karimpour, 2013; Najafi et al., 2014; Malekzadeh Shafaroudi et al., 2015). بر اساس بررسی‌های نجفی و همکاران (Najafi et al., 2014) توده‌های گرانیتوئیدی منطقه کجه در شمال باختر فردوس، از نظر سنی متعلق به کرتاسه پسین هستند. سن توده‌های گرانیتوئیدی منطقه کوه‌شاه (جنوب‌غرب بیرجند) 39/7 میلیون سال، (Abdi and Karimpour, 2013)، سنگهای نیمه‌عمیق منطقه چاه‌شلغمی و ده‌سلم 33/3 و 33/6 میلیون سال قبل (Arjmandzadeh et al., 2011; Arjmandzadeh and Santos, 2013) و در منطقه بیشه (جنوب بیرجند)، برای توده دیوریتی سن 44/07 میلیون سال و برای توده گرانودیوریت پورفیری سن 38/75-39/45 میلیون سال، معرفی شده است (Nakhaei, 2015; Nakhaei et al., 2015). در منطقه ماهرآباد و خوییک (70 کیلومتری جنوب غرب بیرجند) سن 39 میلیون سال (اوسن میانی) برای توده‌های مونزونیتی مرتبط با کانی‌سازی مس - طلالی پورفیری معرفی شده است (Malekzadeh Shafaroudi, 2009; Malekzadeh Shafaroudi et al., 2015). سن توده‌های نیمه‌عمیق مرتبط با کانی‌سازی در منطقه خونیک، 38/4 میلیون سال (اوسن پایانی) و توده گرانودیوریتی آداکیتی در این منطقه 33/1 میلیون سال (اوایل الیگوسن) تعیین شده است (Samiee et al., 2016). برای توده‌های گرانیتوئیدی ماهر که مرتبط با کانی‌سازی مس - طلالی پورفیری معرفی شده، سن 31/9 میلیون سال معرفی شده است (Miri Beydokhti et al., 2015). براساس بررسی‌های مهدوی و همکاران (Mahdavi et al., 2016) سن

رشته تالیم با HCl در یک آرایش رشته سه‌گانه لود شده بود. نسبت ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ با استفاده از طیف‌سنج یونیزاسیون چند کلکتور حرارتی (TIMS) VG Sector 54 تعیین شد. داده‌ها در حالت دینامیک با اندازه‌گیری پیک 1-2V برای ^{88}Sr و 0.8-1.5 V برای ^{144}Nd حاصل شد.

جداسازی عناصر Sr و REE در ستون تبادل یونی با رزین‌های تبادل کاتیونی AG8 50W Bio-Rad و تصفیه نمودیمیم از سایر عناصر لانتانیدها در ستونها با رزین تبادل کاتیونی (LnElChrom Technologies). در تمام معرفهای مورد استفاده در آماده‌سازی نمونه‌ها از آب مقطر استفاده شد. آب به‌وسیله دستگاه Milli-QElement (Millipore) تولید شد. در یک رشته تالیم با H_3PO_4 و Nd در سمت بیرونی



شکل 1. موقعیت منطقه مورد بررسی در A: راههای دسترسی به محدوده اکتشافی شمال غرب گناباد و B: نقشه زمین ساخت ایران (Aghanabati, 2004)

Fig. 1. Location of study area at A: Access roads to the northwest of Gonabad and B: Tectonic map of Iran (Aghanabati, 2004)

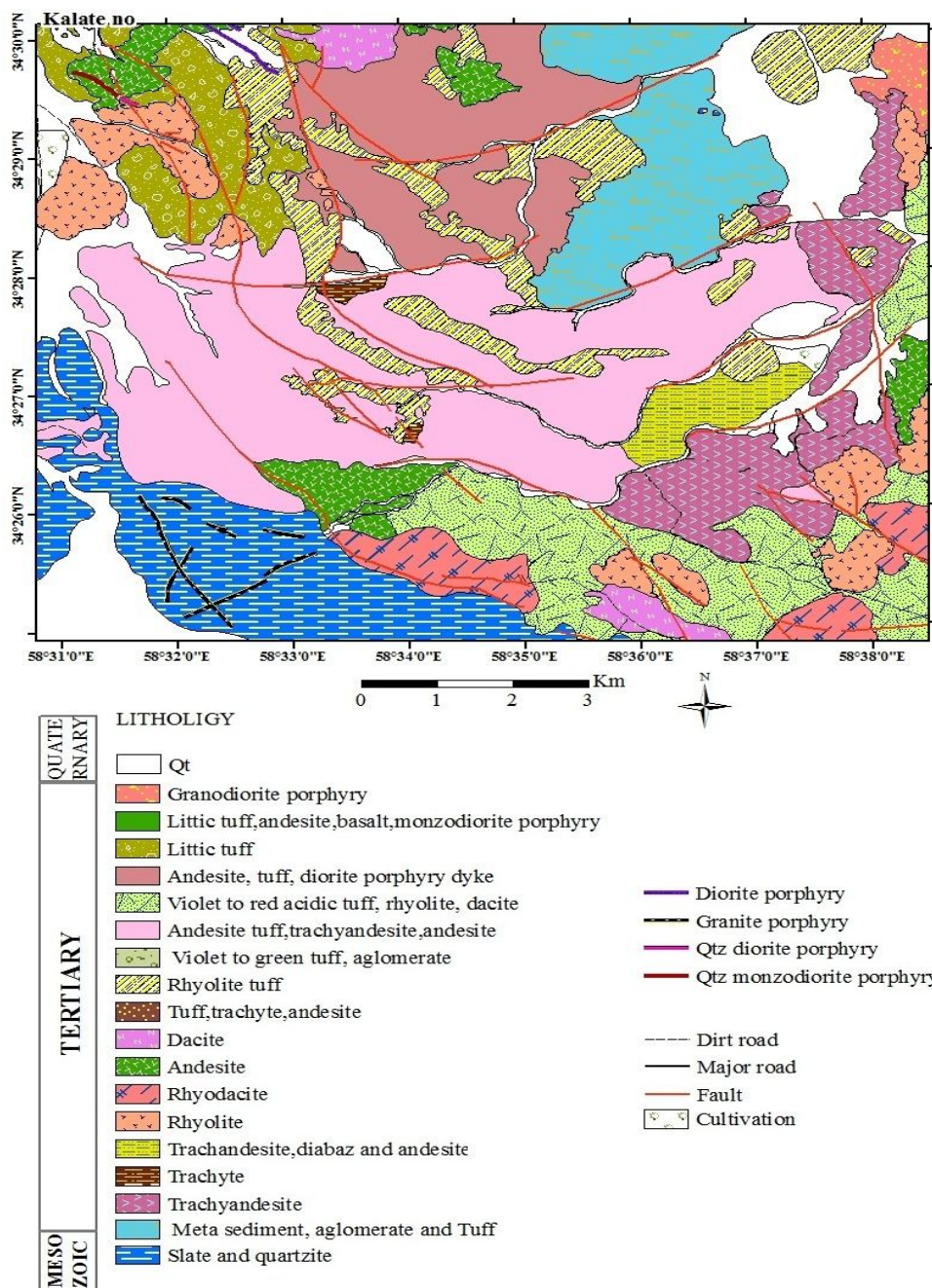
واحدهای سنگی که در منطقه رخنمون دارند شامل سنگهای اسلیت و کوارتزیت (ژوراسیک میانی)، سنگهای آتشفشانی و توده‌های آذرین نفوذی (اوسن) است. واحدهای سنگی رخنمون تپه‌ماهور و مرتفع دارند (شکل 2 و شکل 3-A, B).

زمین‌شناسی

منطقه مورد بررسی در غرب نقشه 1/250000 گناباد (BRGM, ORLEANS, 1983) و شمال غرب نقشه 1/100000 گناباد (Ghaemi, 2005) قرار می‌گیرد.

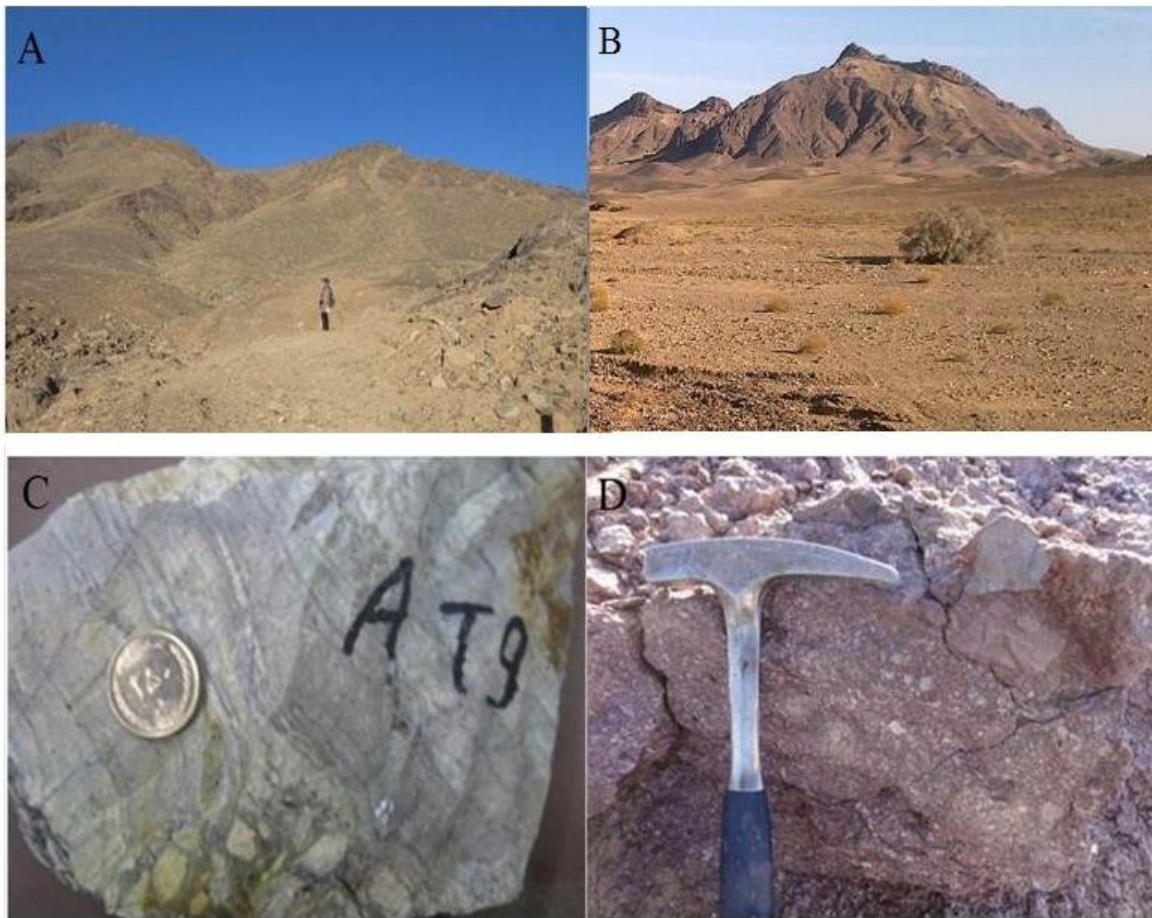
منطقه دارد (شکل 2). سنگهای آذرآواری آگلومرا با رنگ سبز تیره تا قرمز به همراه توف است. قطعات تشکیل دهنده آگلومرا شامل تراکی آندزیت و آندزیت است؛ که فرآورده فوران آتشفشانی با ترکیب حدواسط هستند.

C و D). قدیمی‌ترین واحد که در منطقه مورد بررسی رخنمون دارد، اسلیت و متاکوارتزیت است (شیل و ماسه سنگهای سازند شمشک در اواسط ژوراسیک به‌طور بخشی تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای به اسلیت و متاکوارتزیت تبدیل شده است. سازند شمشک گسترش زیادی را در جنوب غرب



شکل 2. نقشه زمین‌شناسی منطقه شمال غرب گناباد

Fig. 2. Geological map of northwest of Gonabad



شکل 3. A: نمایی از رخنمون واحد آندزیتی، شمال غرب گناباد، دید به سمت شمال شرق، B: نمایی از رخنمون واحد ریولیتی، دید به سمت جنوب شرق، C: ریولیت دارای حالت نواری، D: لیتیک توف

Fig. 3. A: View of andesitic unit outcrops, northwest of Gonabad, look toward northeast, B: View of rhyolite outcrops, look toward southeast, C: Lithic tuff, D: Rhyolite with band shape.

آندزیت - تراکی آندزیت: بافت این واحد پورفیری است. فنوکریستها شامل پلاژیوکلاز تا 25% (به ابعاد 0/1 mm)، هورنبلند با حاشیه اکسید آهنی شده 5% (به ابعاد 0/6 mm) و آلکالی فلدسپات سرسیتی شده، سانیدین، تا 1% دیده می‌شود (شکل 4- C و D). زمینه شامل میکرولیت‌های پلاژیوکلاز 30 تا 35% و کانیه‌های کدر 10 تا 15% است. کربنات کلسیم هم داخل پلاژیوکلاز و هم در زمینه تا 25% دیده می‌شود. کلریت به صورت پراکنده کمتر از 3% دیده می‌شود. آندزیت لاتیت: در شمال ناحیه دیده می‌شود و به علت کوچک بودن این واحد در نقشه شکل 2 تصور نمی‌شود. بافت این واحد پورفیری است، کانیه‌های درشت‌بلورها شامل پلاژیوکلاز 10 تا 15% (در ابعاد 0/4 تا 1 mm)، کوارتز 1 تا 2% (0/2 تا

پتروگرافی واحدهای آتشفشانی

کریستال، لیتیک-کریستال توف: بررسی توفها نشان می‌دهد که ترکیب آنها در جنوب منطقه ریولیتی-ریوداسیتی بوده و قسمت عمده آنها کریستال توف است (شکل 4-A). بافت این سنگها پیروکلاستیکی و ترکیب توفها در مرکز به سمت شمال ناحیه آندزیتی است. در قسمت شمال شرقی منطقه، لیتیک-کریستال توف نیز دیده می‌شود. قطعات سنگ یا بلور کربناتی و آرژیلیکی شده و در زمینه کاملاً سیلیسی-آرژیلیکی قرار دارند. قطعات سنگی (با ابعاد حداکثر 4 mm)، 20% درصد سنگ را تشکیل می‌دهند. بلورهای درشت و چند وجهی کانیه‌های کدر تا 0/5 mm، به صورت اولیه و پراکنده در متن، در این سنگها حضور دارند (شکل 4-B).

دایک گرانیته‌ای که رخنمون آن در داخل سازند شمشک دیده می‌شود، مربوط است. دو معدن مهم کائولن رخ سفید و باغ سیاه از جمله مهمترین آنهاست. نوع دگرسانی در این مناطق، زون آرژلیک و آرژلیک پیشرفته است. هیدرولیز شدید سیلیکات‌های آلومینیوم‌دار (محیط اسیدی) موجب تشکیل کانیه‌های رسی از جمله کائولینیت شده است. کانی‌شناسی این ذخایر به ترتیب فراوانی و بر اساس نتایج آنالیز XRD (جدول 1)، شامل کوارتز، کائولینیت، دیکیت، مونتموریلونیت، همتایت و آلونیت است (Zirjanizadeh et al., 2014). سیلیسی شدن صورت کپ‌های سیلیسی در بالای زون‌های آرژلیک رخ داده است. مقایسه ژئوشیمی مناطق معدنی در این ناحیه نشان می‌دهد؛ که میانگین SiO_2 در این مناطق 67/3% و متوسط میزان $21/7\text{Al}_2\text{O}_3$ است (جدول 2). به طور کلی بر اساس این پژوهش و پژوهش‌های قبلی (Miri Beydokhti, 2004; Gharibnavaz et al., 2008; Miranvari, 2008; Zirjanizadeh et al., 2014 میزان Al_2O_3 در معدن کلاته-نو (17/67%) (Zirjanizadeh et al., 2014) کمتر از مقدار آن در معادن یاسمینا (18/76%) (Miranvari, 2008)، رخ سفید (24/4%) (Gharibnavaz et al., 2008) و باغ سیاه (29/62%) (Miri Beydokhti, 2004) است. دلیل آن می‌تواند مربوط به دگرسانی کامل‌تر سنگ مادر در محدوده‌های یاسمینا، رخ سفید و باغ سیاه و یا انجام بررسی‌های بیشتر و دسترسی به نمونه‌هایی از عمق بیشتر باشد. دگرسانی پروپیلیتیک تقریباً تمام ناحیه را با شدت‌های متفاوت در بر گرفته است. کانیه‌های اصلی دگرسانی پروپیلیتیک شامل کلریت (1 تا 25%)، کلسیت (1 تا 3%)، در بعضی قالب پلاژیوکلاز به طور کامل با کربنات پر شده است، اپیدوت (1 تا 3%)، در بعضی نقاط رگه‌چه‌های اپیدوت شکل‌دار دیده می‌شود. این کانیه‌ها حاصل دگرسان شدن کانیه‌های آهن و منیزیم‌دار و پلاژیوکلاز است.

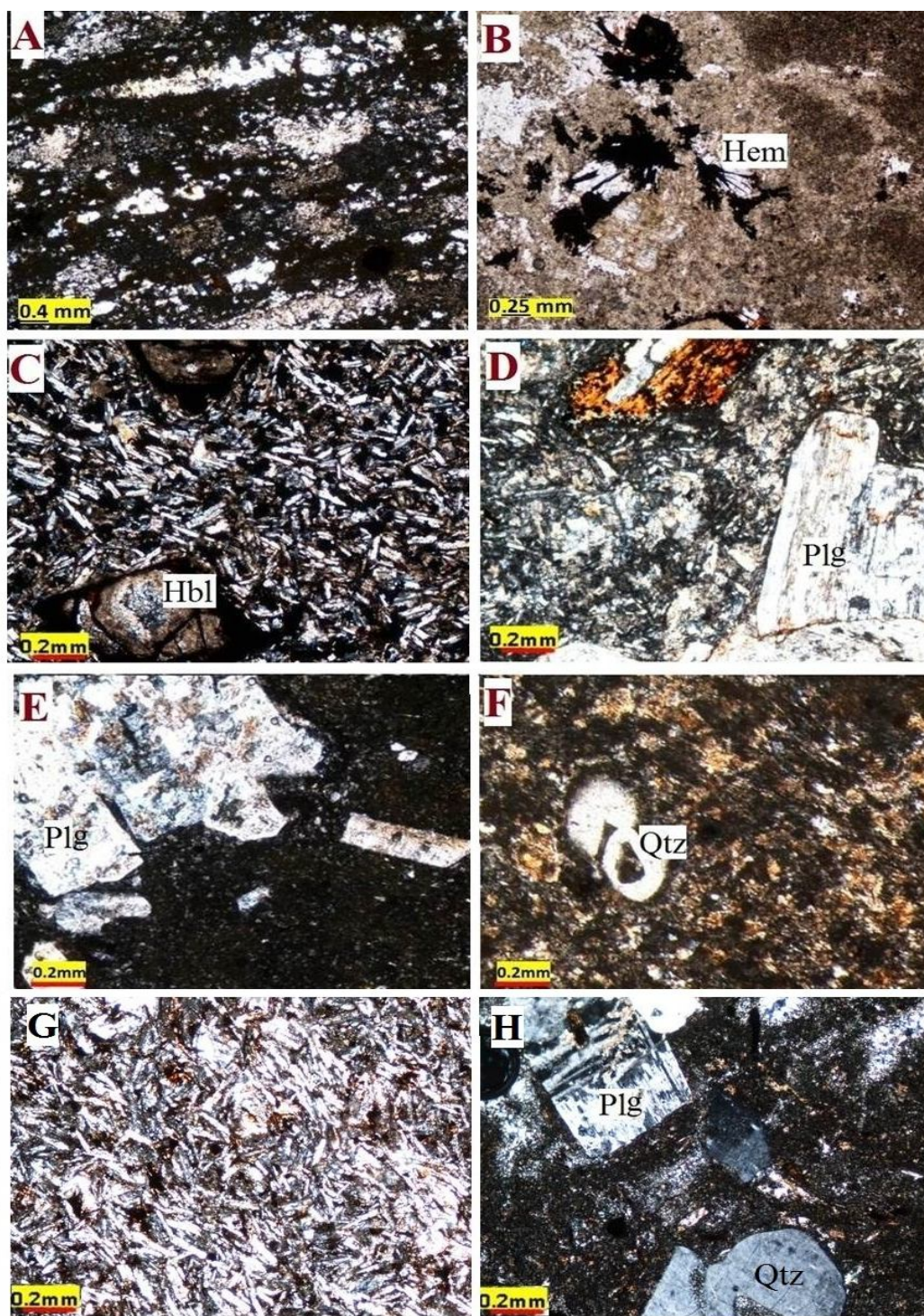
زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی

نتایج تجزیه اکسیدهای اصلی (درصد وزنی)، عناصر کمیاب (گرم در تن) سنگ‌های آتشفشانی منطقه در جدول 3 ارائه شده است.

0/4 mm و فلدسپار 2 تا 3% (در ابعاد 0/6 تا 0/8 mm) است (شکل 4-E). غالب کانیه‌های فرومنیزین (احتمالاً آمفیبول) به طور کامل کلریتی شده است و در بعضی مقاطع عرضی پلاژیوکلاز در حد 1 تا 2% سرسیت دیده می‌شود. ریولیت: بافت غالب ریولیت‌ها پورفیری و همچنین بافت سیو اطراف بعضی از بلورهای کوارتز و فلدسپات است (شکل 4-F). فنوکریست‌های موجود شامل 2 کوارتز خلیجی 3-5% (0/4-0/2mm) آلکالی فلدسپات نوع سانیدین 15-20% (0/2-1) ، پلاژیوکلاز 10% (0/2-1/2) است، همچنین بیوتیت که اکسید آهنی شده و کانیه‌های کدر نیز به صورت فنوکریست حضور دارند. در ریولیت‌های شرق و شمال غرب منطقه تا 30% کانیه‌های اوپک (پیریت) دیده می‌شود. زمینه در این سنگها دانه‌ریز و در برخی قسمت‌ها به شدت سیلیسی شده است. کوارتز ریزبلور در زمینه تا 70% (0/1-1) است، آلکالی فلدسپات‌ها نیز به شدت آلتزه (آرژلیکی) شده‌اند و تشخیص نوع آن بسیار دشوار است. تراکیت: ویژگی این واحد وجود بافت تراکیتی آن است (شکل 4-G). میکروولیت‌های پلاژیوکلاز نوع سانیدین تا 90% سنگ را شامل می‌شوند. هورنبلند با حاشیه سوخته که قالب آنها توسط کربنات کلسیم پر شده بین 3 تا 5% (به ابعاد 0/3 mm) دیده می‌شود، ضمن این‌که کوارتز کمتر از 1% قابل مشاهده است. در این توده کربنات کلسیم به صورت رگه‌چه‌های بسیار ظریف (به ابعاد کمتر از 0/1 mm) و در زمینه تا 2% دیده می‌شود. ریوداسیت: بافت گلومروپورفیری بافت اصلی ریوداسیت‌های این منطقه است. فنوکریست‌ها شامل بلورهای ایدئومورف و هیپایدئومورف کوارتز 2 تا 3% (در ابعاد 0/1-0/5)، پلاژیوکلاز 7 تا 10% (در ابعاد 0/2-0/8)، بیوتیت 1% و هورنبلند 5% است. قسمت عمده سانیدین آلتزه شده و تا 15% به کانیه‌های رسی تبدیل شده‌اند (شکل 4-H).

کانی‌سازی و دگرسانی

حضور کانی‌سازی‌های رگه‌ای نوع سرب و روی (در محدوده کانی‌سازی فلورین جویمند) در نتیجه نفوذ دایک‌های متعدد، مس (محدوده اکتشافی کلاته‌نو) و کائولن (معدن رخ سفید، باغ‌سیاه، یاسمینا و کلاته‌نو) در این منطقه حایز اهمیت است. جنوب محدوده مورد بررسی، منطقه‌ای غنی به لحاظ خاک رس کائولینیتی است. منشأ این خاک رسی گسترده به نفوذ



شکل 4. تصاویر پتروگرافی از واحدهای آتشفشانی رخنمون در شمال غرب گناباد A و B: واحدهای کریستال توف (A در نور XPL و B در نور PPL)، C: تراکی‌اندزیت در نور XPL، D: آندزیت در نور XPL، E: آندزیت-لاتیت در نور XPL، F: ریولیت و بافت خلیجی در کوارتز در نور XPL، G: تراکیتدر نور XPL، H: ریوداسیت در نور XPL، (Plg = پلاژیوکلاز، Hem = هماتیت، Hbl = هورنبلند، Qtz = کوارتز) (Kretz, 1983).

Fig 4. Petrographic images from extrusive exposed at northwest of Gonabad. A and B: Crystal tuff unit (A in XPL light and B in PPL light), C: Trachyandesite, in XPL light, D: Andesite, in XPL light, E: Andesite-latite, in XPL light, F: Rhyolite and embayed texture in quartz, in XPL light, G: Trachyte in XPL light, H: Rhyodacite in XPL light. Abbreviations: Qtz: quartz, Hbl: Hornblende, Plg: plagioclase, Hem: hematite, (Kretz, 1983).

جدول 1. ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های رس از منطقه شمال غرب گناباد (داده‌های * از Gharibnavaz et al., 2008)

Table 1. Mineralogical composition of clay samples from northwest of Gonabad, (*data from Gharibnavaz et al., 2008)

	Sample	Major Phase	Minor Phase
Rokhsefid	R33*	Quartz- Alunite	Kaolinite- hematite
	R22*	Quartz- Alunite	Kaolinite- hematite
	A22	Quartz	Hematite, Kaolinite-montmorillonite, alunite
Baghsia	BK51-2	Quartz	Clinocllore, Dickite
	BK53-3	Quartz	Kaolinite-montmorillonite
Yasmina	Yass1	Quartz	Montmorillonite-kaolinite
Kalateno	Geo1	Quartz	Kaolinite-Pyrophyllite-montmorillonite
	AE5	Quartz	Illite, muscovite

جدول 2. ترکیب عناصر اصلی نمونه‌های رس منطقه شمال غرب گناباد

Table 2. Major element compositions of clay samples from northwest of Gonabad

	Sample	Y	X	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I
Rokhsefid	R33	3810324	645130	63.03	18.41	0.32	0.16	0.11	0.05	2.15	0.31	5.46
	R22	3810366	645118	94	3.5	1.45	0.09	0.1	0	0	0.15	0.71
	A22	3810185	645193	61.37	29.12	0.46	0.1	0.16	0.05	0.1	0.01	8.25
Baghsia	BK51-2	3810433	649609	61.86	28.31	0.69	0.1	0.41	0.07	0.01	0.3	7.71
	BK53-3	3810331	649693	59.01	28.79	0.71	0.1	0.15	0.06	0.01	0.6	9.94
Yasmina	Yass1	3808237	648925	70.85	20.21	0.62	0.15	1.79		0.01	0.31	6
Kalateno	Geo1	3813139	643882	61.66	23.92	1.96	0.56	0.05		6.14	0.11	4.09

زمین‌شیمی اکسیدهای اصلی و عناصر جزئی

سنگهای آتشفشانی که تجزیه شده‌اند دارای محتوی SiO₂ بین 76/33-57/76، TiO₂ بین 0/07 تا 1/17 و میانگین MgO، 2 درصد وزنی (متوسط عدد منیزیومی 38/4) هستند. با توجه به این که اغلب سنگهای آذرین منطقه، آتشفشانی هستند و تشخیص نوع و مقدار کانیها موجود در خمیره آنها با مشکل روبه‌روست. بنابراین، رده‌بندی شیمیایی و نورماتیو این

سنگها می‌تواند راهنمایی مناسب در کنار بررسیهای میکروسکوپی جهت نام‌گذاری آنها باشند. نمونه‌های تجزیه‌شده برای این بررسی با استفاده از نسبت Zr/TiO₂ و Nb/Y نام‌گذاری شدند. براساس نمودار، سنگهای آتشفشانی منطقه در محدوده ریولیت، داسیت و بازالت ساب‌آلکان قرار می‌گیرند (شکل 5-A). مقداری تفاوت در نام بعضی از سنگها دیده می‌شود که مربوط به کمی دگرسانی در این

بررسی نمودارهای عنکبوتی و REE

از نمودارهای چندعنصری جهت شناخت منشأ مجموعه‌های سنگی و فرآیندهای مؤثر بر آن استفاده می‌شود (Siddiquiet al, 2007). فراوانی عناصر کمیاب نمونه‌های آتشفشانی بر روی نمودار به‌هنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) بررسی شد (شکل 6-A). در نمودار عناصر نادر خاکی (REE) واحدهای آتشفشانی که نسبت به کندریت به‌هنجار شده (Nakamura, 1974)، عناصر کمیاب خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر کمیاب خاکی سنگین (HREE) غنی‌شدگی نشان می‌دهند (La_N/Yb_N طیفی از 3/5 تا 15/3 (شکل 6-A). این غنی‌شدگی نشان‌دهنده ماگمای مرتبط با مناطق فرورانش است (Pearce, 1983; Gill, 1987; Wilson, 1989; Rollinson, 1993).

نمونه‌هاست که اجتناب‌ناپذیر بوده و با وجود دقت در انتخاب نمونه‌ها، نمونه کاملاً بدون دگرسانی در منطقه وجود نداشت. از آن‌جا که K₂O و SiO₂ نسبت به دگرسانی حساسند، از نمودار مشابهی که در آن Th به‌عنوان نماینده K₂O و Co به عنوان جای‌گزین SiO₂ است می‌توان استفاده کرد (Hastie et al, 2007) که در آن نمونه‌ها در محدوده آلومینیم بالا و شوشونیتی قرار می‌گیرند و همچنین از جنس ریولیت، داسیت و آندزیت-بازالت هستند (شکل 5-B). سنگهای آتشفشانی کالک‌آلکال محصولات عمده محیطهای زمین‌ساختی مرزهای صفحات هم‌گرا هستند (Harangi et al., 2007). مقدار عناصر لیتوفیل با شعاع یونی بالا (LILE) در نمونه‌ها در مجموع بالاست. نسبت Rb/Sr بین 0/1 تا 11/7 متغیر است. مقدار Ba بین 174 تا 973 متغیر است.

جدول 3. تجزیه شیمیایی عناصر اصلی (برحسب درصد)، جزئی و نادر خاکی (برحسب گرم در تن) سنگهای آتشفشانی شمال غرب گناباد

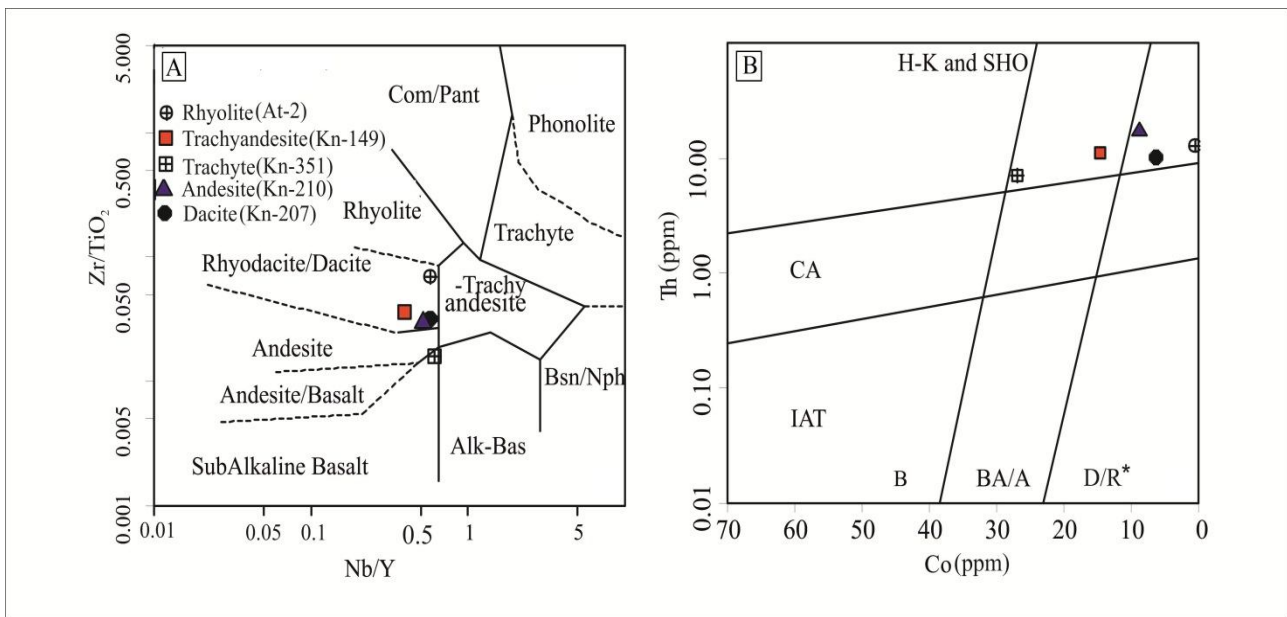
Table 3. Whole-rock major (wt. %) and trace element (ppm) compositions of the rocks from northwest of Gonabad.

Sample	KN-149		KN-207		KN-210		kn351		At2		At2-1	
Sample location	642984	3812810	643157	3818468	642627	3818630	640434	3816754	650101	3812179	650110	3812185
Petrography	Trachyandesite		Latite		Andesit -latite		Trachyte		Rhyolite		Rhyolite	
SiO ₂	61.79		70.65		61.33		57.76		76.33			
TiO ₂	0.8		0.37		0.72		1.17		0.07			
Al ₂ O ₃	14.05		10.8		15.26		12.98		10.98			
TFeO	6.18		3.8		5.6		8.18		1.11			
MnO	0.09		0.08		0.1		0.15		0.02			
MgO	2.65		1.79		2.64		5.13		0.03			
CaO	5.21		4.74		3.57		7.09		0.93			
Na ₂ O	3.14		2.34		4.75		2.47		0.47			
K ₂ O	2.16		2.6		2.39		1.71		5.18			
P ₂ O ₅	0.19		0.1		0.2		0.34		0.04			
LOI	3.56		2.57		2.88		2.81		3.38			
Total	98.82		98.84		99.44		99.79		98.54			
A/CNK	0.8276		0.7067		0.9034		0.6902		1.3605			

ادامه جدول 3. تجزیه شیمیایی عناصر اصلی (برحسب درصد)، جزئی و نادر خاکی (برحسب گرم در تن) سنگهای آتشفشانی شمال غرب گناباد

Table 3 (Continued). Whole-rock major (wt. %) and trace element (ppm) compositions of the rocks from northwest of Gonabad.

Sample	KN-149	KN-207	KN-210	kn351	At2	At2-1
Petrography	Trachyandesite	Latite	Andesit -latite	Trachyte	Rhyolite	Rhyolite
Ba	400	590	973	327	180	174
Be	<1	2	4	2	<1	3
Co	14.6	6.3	8.8	26.9	0.5	<0.2
Cs	3.4	5.5	5.8	5.8	19.8	19.4
Ga	17.5	9.8	18.8	16.9	14.5	17
Hf	6.4	3.3	5.6	3.7	1.8	1.8
Nb	13.8	8.8	17.6	14.6	9.5	11.3
Rb	81.5	111.2	64.5	56.5	333.2	328.5
Sn	4	3	4	2	8	10
Sr	298.6	271.3	542.4	502.1	39.3	28.1
Ta	0.9	0.6	1.1	0.9	1.5	1.3
Th	11.1	10.1	17.1	7.1	12.6	12.4
U	2.5	2.3	3.7	1.4	3.8	3
V	91	57	62	140	13	21
W	1.1	1	1.4	<0.5	2.2	2.5
Zr	286.9	116.7	214.8	188	48.5	47.8
Y	34.9	15.3	33.8	23.7	16.5	16.4
La	32.9	28	46.5	28.3	9.8	8.2
Ce	74.7	54.3	101.7	60.8	18.9	18
Pr	7.94	5.47	10.26	6.66	1.93	1.8
Nd	28.3	21.7	38.2	23.5	6.7	5.7
Sm	6.31	3.74	7.65	5.06	1.74	1.4
Eu	1.32	0.78	1.46	1.38	0.14	0.2
Gd	6.09	3.49	6.99	4.88	1.94	2.1
Dy	5.84	3.08	5.64	4.58	2.87	2.6
Er	3.72	1.53	3.46	2.59	1.95	0.5
Tm	0.55	0.23	0.51	0.42	0.30	1.9
Yb	3.25	1.22	2.93	2.55	1.95	0.2
Lu	0.56	0.26	0.5	0.4	1.08	1.8
Eu/Eu*	0.65	0.66	0.61	0.85	0.23	0.3
La_N/Yb_N	6.75	15.3	10.58	7.4	3.49	0.3
La_N/Sm_N	3.21	4.61	3.74	3.44	3.46	3
Ce_N/Yb_N	5.85	11.32	8.83	6.06	2.57	2.5
Ce_N/Sm_N	2.78	3.41	3.12	2.82	2.55	2.92
Eu_N/Yb_N	1.16	1.83	1.42	1.55	0.21	3.5
Sum REE	173.91	124.93	228.23	142.93	49.46	45



شکل 5. موقعیت نمونه‌های مورد بررسی، شمال غرب گناباد، در A: نمودار Zr/TiO_2 در مقابل Nb/Y (Winchester and Floyd, 1977). B: نمودار Th در مقابل Co (Hastie et al. 2007). H-K and SHO = پتاسیم بالا و شوشونیتی؛ CA = کالکوالکانل؛ IAT = تولیت جزایر قوسی؛ B = بازالت؛ BA/A = آندزیت بازالت / آندزیت؛ D/R* = داسیت - ریولیت - لاتیت - تراکیت.

Fig. 5. Study area samples, northwest of Gonabad, in A: Zr/TiO_2 versus Nb/Y diagram (Winchester, and Floyd, 1977), B: Th versus Co diagram (Hastie et al. 2007). H-K and SHO = High potassium and Shoshonitic; CA = alkaline; IAT = Tholeiitic island arc; B = Basalt; BA / A = Andesite basalt / andesite; D / R* = Dacite- rhyolite- latite- trachyte.

بالایی در فرآیندهای ماگمایی باشد (Gencalioglu Kuscü and Geneli, 2010).

ریولیت‌های منطقه تفریق بیشتر نشان می‌دهند و تهی‌شدگی بیشتری در Ti و Ba, P, Sr دارند به همین دلیل در نمودار جدا تصویر شدند (شکل 6-A و B). تهی‌شدگی بارز Ti و P در ریولیت‌ها به تفریق آپاتیت و تیتانومگنتیت و غنی‌شدگی Th و U در این سنگها (شکل 6-B) احتمالاً به آلودگی پوسته‌ای یا ویژگیهای منشأ وابسته است (Gencalioglu Kuscü and Geneli, 2010).

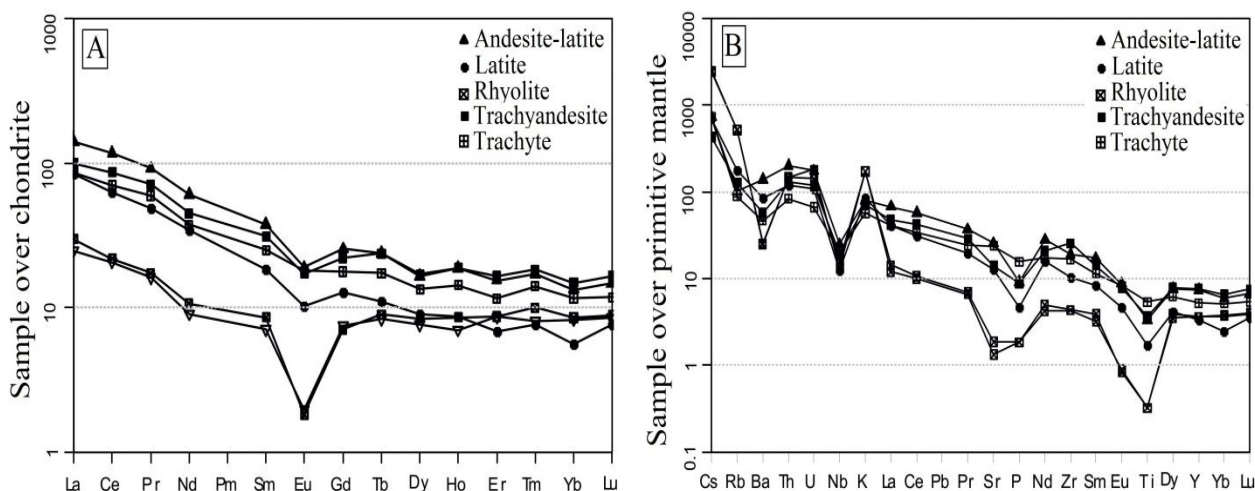
ایزوتوپ‌های $Sm-Nd$ و $Rb-Sr$

تجزیه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک $Rb-Sr$ و $Sm-Nd$ بر روی کل سنگ نمونه‌های انتخاب شده انجام شد و نتیجه نسبت به $^{88}Sr/^{86}Sr = 0.1194$ و $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.7219$ اصلاح شد. نسبتهای $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه براساس سن سنگهای آتشفشانی منطقه (60 میلیون سال) محاسبه شده است. نتایج تجزیه ایزوتوبی نمونه‌ها در جدولهای 4 و 5 گزارش

هرگاه مقدار Eu/Eu^* بیش از یک باشد، ناهنجاری مثبت و هرگاه کمتر از یک باشد، ناهنجاری منفی است (Taylor and Mclennan, 1985). به‌طور کلی سنگهای گدازه‌ای منطقه دارای ناهنجاری منفی (0/2 تا 0/85) است. Eu عنصری سازگار در فلدسپارهاست و بی‌هنجاری منفی آن بر اثر تفریق فلدسپار در حین تبلور ماگما یا بر اثر باقی‌ماندن فلدسپار در منشأ در حین ذوب‌بخشی در شرایطی که اکتیویته H_2O پایین است، ایجاد می‌شود (Tepper et al., 1993). همچنین شرایط احیایی محیط می‌تواند باعث ناهنجاری منفی Eu شود. مجموع مقدار عناصر نادر خاکی بین 45 تا 228/23 گرم در تن متغیر است. در نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب به‌هنگار شده با گوشته اولیه، عناصر کمیاب (LREE) نسبت به عناصر کمیاب خاکی سنگین (HREE) غنی‌شدگی نشان می‌دهند. در این توده‌ها تهی‌شدگی Ti و Ba, Sr, Nb دیده می‌شود. آنومالی منفی Ba در فازهای اسیدی، می‌تواند بیانگر تفریق فلدسپارها (Arsalan and Aslan, 2006) و یا نقش پوسته قاره‌ای

نسبت $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ اولیه برای واحدهای تراکیت، تراکی آندزیتی و آندزیت-لاتیت به ترتیب 0/5124، 0/5125 و 0/5121 است. مقادیر ایزوتوپ اولیه ϵNd برای این گدازه‌ها به ترتیب -1/4، -2/3 و -9/1 است. نسبت $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ و ϵNd برای واحد ریولیتی به ترتیب 0/710658 و -5/1 است. نسبت ایزوتوپ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه و ϵNd مربوط به نمونه‌های مورد بررسی در شکل 7 مورد مقایسه قرار گرفت. داده‌های ایزوتوپی به دست آمده در رابطه با ماگماتیسم منطقه مورد بررسی نشان‌دهنده منشأ پوسته قاره‌ای ماگماست.

شده است. نتایج تجزیه ایزوتوپی سنگهای آتشفشانی (آندزیت، تراکی آندزیت، داسیت و ریولیت) به شرح زیر است: داده‌های ایزوتوپی به دست آمده (بر اساس سن 60 میلیون سال) در رابطه با ماگماتیسم در منطقه مورد مطالعه حاکی از تغییرات میزان ایزوتوپ اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ برای توده‌های آتشفشانی بین 0/70699 تا 0/71014 است. نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه برای واحدهای با ترکیب تراکیت، تراکی آندزیتی و آندزیت-لاتیت به ترتیب 0/706700، 0/706802 و 0/709855 است. این مقدار برای واحد ریولیتی 0/710658 است. با توجه به این که مقدار ایزوتوپ اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ از 0/706 بیشتر است، بنابراین منشأ ماگما پوسته قاره‌ای است.



شکل 6. A: نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Sun and McDonough, 1989) و B: نمودار عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Taylor and McLennan, 1985) برای سنگهای آتشفشانی منطقه شمال غرب گناباد

Fig. 6. A: Chondrite normalized REE diagram (Sun and McDonough, 1989) and B: Primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (Taylor and McLennan, 1985), for volcanic rocks in northwest of Gonabad.

جدول 4. نتایج آنالیز ایزوتوپی مربوط به ایزوتوپ‌های Rb-Sr مربوط به توده‌های آتشفشانی شمال غرب گناباد

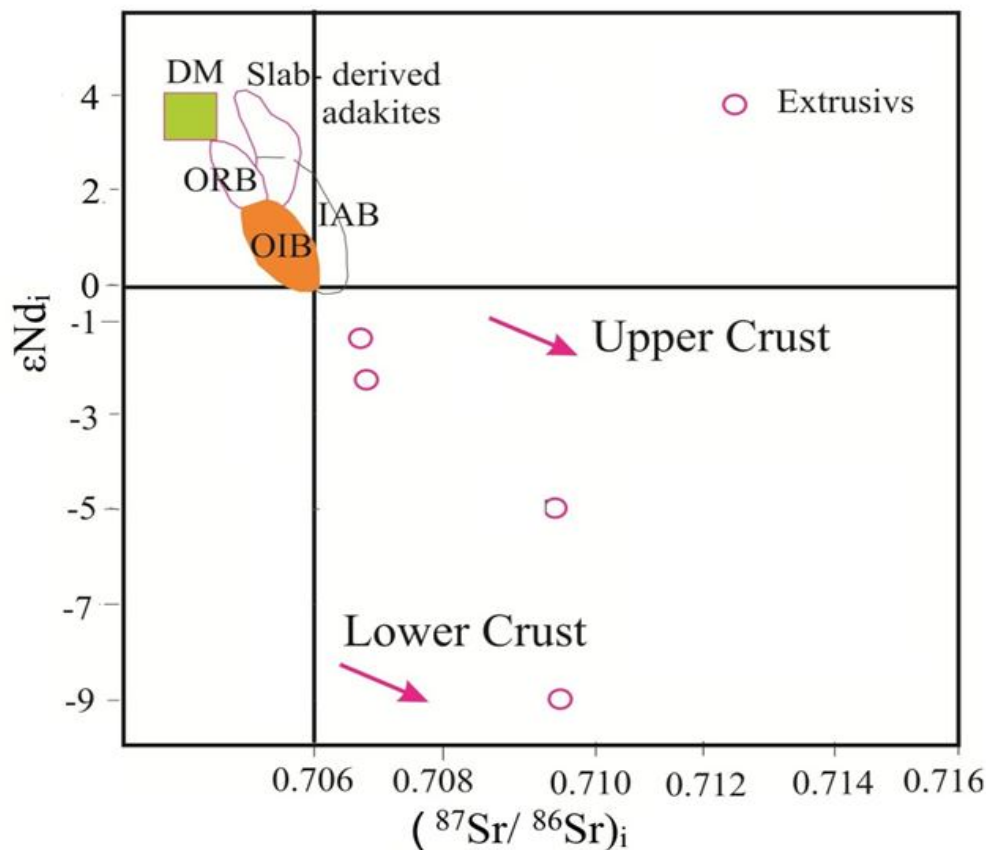
Table 4. Rb-Sr isotopic analyses of volcanic samples from northwest of Gonabad

Sample	Petrography	Sr (ppm)	Rb (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ Measured	Error (2s)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Measured	Error (2s)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Initial
KN-210	Andesite -latite	542.4	64.5	0.344	0.01	0.710138	0.000023	0.709855
KN-149	Trachy andesite	298.6	84.5	0.790	0.022	0.707453	0.000017	0.706802
AT2-1	Rhyolite	28.9	328.7	32.95	0.93	0.736873	0.000034	0.710658
KN-351	trachyte	502.1	56.5	0.326	0.009	0.706987	0.000021	0.706700

جدول 5. داده‌های ایزوتوپی مربوط به ایزوتوپ‌های Sm-Nd مربوط به توده‌های آتشفشانی شمال غرب گناباد

Table 5. Sm-Nd isotopic analyses of volcanic samples from northwest of Gonabad

Sample	Petrography	Nd (ppm)	Sm (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	Error (2s)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	Error (2s)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_i$	ϵNd_i
KN-351	trachyte	23.5	5.06	0.130	0.007014	0.512539	0.000016	0.5125	-1.4
KN-210	Andesite-latite	38.2	7.65	0.121	0.006523	0.512144	0.000014	0.5121	-9.1
KN-149	Trachyandesite	28.3	6.31	0.135	0.007263	0.512495	0.000016	0.5124	-2.3
AT2-1	Rhyolite	5.7	1.43	0.152	0.011	0.512359	0.000011	0.5123	-5.1



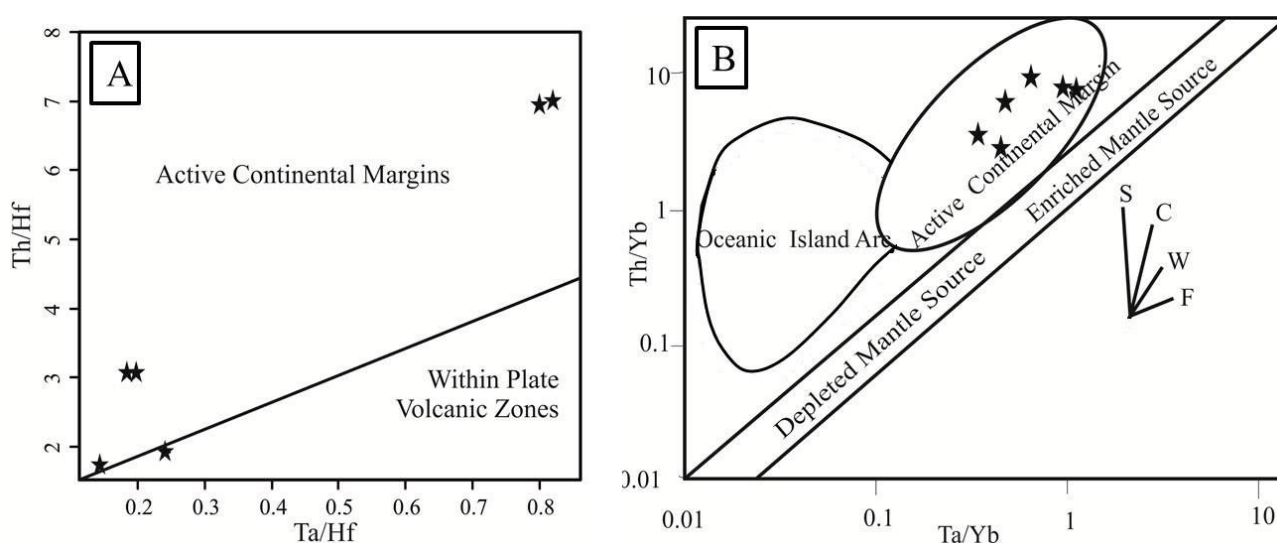
شکل 7. نمودار ϵNd_i - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ برای سنگهای آتشفشانی رخنمون در شمال غرب گناباد. میزان $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ برای 60 Ma محاسبه شده است. داده‌ها برای سنگهای آداکیت گرفته شده از پوسته ضخیم شده تحتانی از Atherton and Petford, 1993; Muir et al., 1995; Petford and Atherton, 1996). MORB، بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی، DM: گوشته شده، OIB: بازالت‌های جزایر اقیانوسی، IAB: بازالت‌های جزایر قوسی

Fig. 7. ϵNd_i - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram for the extrusive rocks exposed in northwest of Gonabad. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ values were calculated using 60 Ma age. The data for adakitic rocks directly derived from a thick lower crust are after Atherton and Petford, 1993; Muir et al., 1995; Petford and Atherton, 1996). MORB mid-ocean ridge basalts, DM depleted mantle, OIB ocean island basalts and IAB island-arc basalts. Initial ratios calculated for 57-58±1 Ma.

نتیجه‌گیری

قاره قرار می‌گیرند. از نمودار Th/Yb نیز در مقابل Ta/Yb (Siddiqui et al., 2007, Helvacı et al., 2009) و برای تشخیص جایگاه زمین‌ساختی سنگهای آتشفشانی منطقه استفاده شد (شکل 8-B). بر اساس این نمودار مشخص شد که این سنگها متعلق به حاشیه قاره‌ای فعال است و با توجه به نسبت اولیه $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ این سنگها از ذوب پوسته قاره‌ای فرورانش شده به وجود آمده‌اند.

آندزیت، داسیت و ریولیت‌ها در محیطهای مختلف زمین‌ساختی یافت می‌شوند، اما عمدتاً در مناطق فرورانش (قوس جزیره و حاشیه قاره‌ای فعال) وجود دارند و ترکیب آنها در این گونه محیطها به فرآیندهای داخلی در مرزهای هم‌گرا بستگی دارد (Gill, 2010). برای تشخیص محیط زمین‌ساختی سنگهای آتشفشانی منطقه، از نمودار Th/Hf در برابر Ta/Hf (Schandl and Gorton, 2000) (شکل 8-A) استفاده شد که سنگهای آتشفشانی در محدوده حاشیه فعال



شکل 8. نمودارهای تمایز تکتونوماگمایی برای سنگهای آتشفشانی منطقه شمال غرب گناباد، A: نمودار Th/Hf در برابر Ta/Hf (Schandl and Gorton, 2000)، B: نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb و موقعیت سنگهای منطقه (Siddiqui, et al., 2007; Helvacı et al., 2009). علائم اختصاری: S: تأثیر فرآیندهای فرورانش، C: آلودگی پوسته‌ای، W: ماگماتیسیم درون ورقه‌ای، F: فرآیند تفریق بلوری

Fig. 8. Tectonomagmatic discrimination diagrams for volcanic rocks in northwest of Gonabad, A: Th/Hf versus Ta/Hf (Schandl and Gorton, 2000), B: Th/Yb versus Ta/Yb (Siddiqui et al., 2007; Helvacı et al., 2009). Abbreviations, S: Subduction zone enrichment; C: Crustal contamination; W: Within plate enrichment; F: Fractional crystallization.

متاسوماتیسیم مرتبط با فرورانش و آغشتگی پوسته‌ای می‌تواند باعث غنی‌شدگی عناصر LILE و LREE و تهی‌شدگی عناصر HFSE (Pearce and Cann, 1993; Green et al., 2000) شود. هر دو مورد ماگما با مواد پوسته‌ای آغشته می‌شود و ممکن است تفاوتی در این که کدام فرآیند رخ داده است، وجود داشته باشد (مثلاً در گوشته یا در طی مهاجرت مذاب) (Smithies et al., 2004). صعود ماگما از میان پوسته قاره‌ای ضخم شده باعث آلودگی پوسته‌ای و در نتیجه افزایش محتوای Rb/Sr و LILE/HFSE می‌شود و افزایش در K_2O و

الگوی پراکندگی فراوانی عناصر نادر خاکی نمونه‌های سنگی آتشفشانی منطقه با هم موازی است. واحد ریولیتی نیز این روند را نشان می‌دهد، ولی تفریق بیشتری حاصل کرده است. عناصر کمیاب با ناسازگاری متفاوت، می‌توانند برای پی‌بردن به غنی‌شدگی یا تهی‌شدگی منشأ ماگما مورد استفاده قرار گیرند. HFSE و HREE به دلیل تحرک کمتر در سیال در مقایسه با سایر عناصر کمیاب، برای این منظور مناسب هستند (Pang et al., 2013).

جنوب شرق و شمال شرق دارند. این واحد از نوع سنگهای فلسیک کالکوالکالن است. غنی‌شدگی LREE و تهی‌شدگی HREE، غنی‌شدگی $(La/Yb)_N = 3/49, Y = 16/45$ و $0/933$ $[Sm/Yb]_N =$ از ویژگیهای این توده آتشفشانی است. این واحد غنی‌شدگی منفی Nb نشان می‌دهد که نشان‌دهنده وابستگی آن به محیط فرورانش است (Marchev et al., 2004). بررسی رادیوایزوتوپ که بر روی همین واحد انجام شده است، محتوی بالای ایزوتوپ رادیوژن $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0/710658$ را نشان داد. محتوی ϵNd_i در واحد آندزیت - لاتیت (KN-210) خیلی پایین است ($-9/1$).

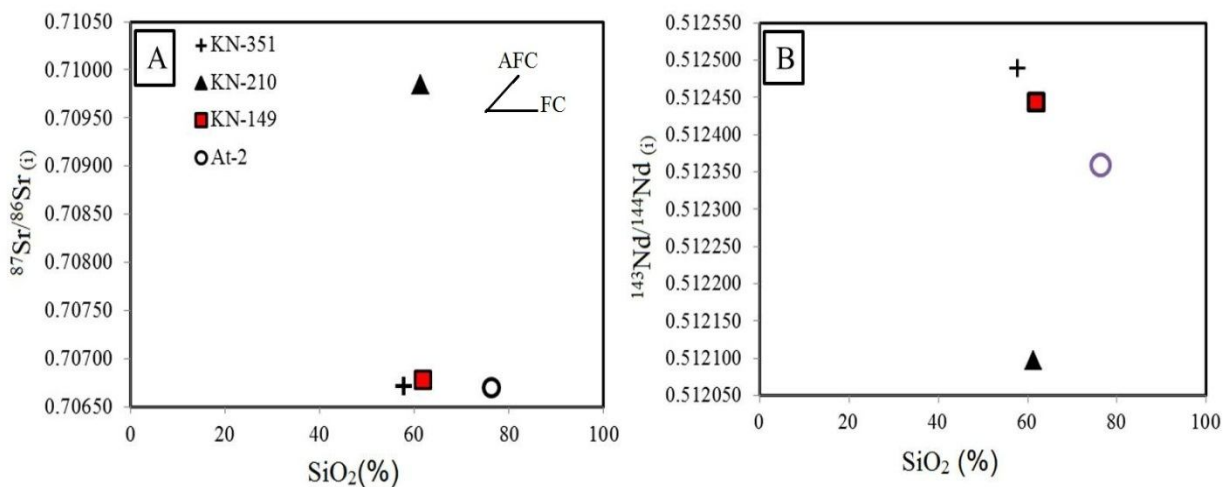
به نظر می‌رسد منشأ این واحد پوسته زیرین باشد. در شکل (9-A و B) نسبتهای $^{87}Sr/^{86}Sr_{(i)}$ و $^{143}Nd/^{144}Nd_{(i)}$ در مقابل SiO_2 ترسیم شده است تا نقش فرآیندهای تبلور تفریقی (FC) و تفریقی-آلایش (AFC) بررسی شود. روندهای مثبت یا منفی نشان‌دهنده فرآیند AFC است؛ در حالی که روندهای تقریباً ثابت نشان‌دهنده فرآیند FC است. محتوی $^{87}Sr/^{86}Sr_{(i)}$ در مقابل SiO_2 روند تقریباً ثابت و $^{143}Nd/^{144}Nd_{(i)}$ در مقابل SiO_2 روند تقریباً منفی را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که سنگهای کالکوالکالن منطقه از منابع مشابهی منشأ نگرفته‌اند.

به‌طور کلی محتوی بالای La/Nb (متوسط $2/23$) و Th/Nb (متوسط $0/94$) و مقادیر منفی $\epsilon Nd(t)$ نشان‌دهنده منشأ پوسته‌ای و تبلور تفریقی به‌همراه آغشتگی پوسته‌ای است.

Th در نتیجه هضم و تبلور تفریقی (AFC) است (Esperanca et al., 1992). میزان پایین‌تر TiO_2 و بالاتر Al_2O_3 در توده‌های آتشفشانی منطقه مورد بررسی، نشان‌دهنده درگیری بالای ترکیب پوسته‌ای است. محتوی نسبتاً بالای Ce ($54/3$ تا $101/7$ گرم در تن) و محتوی متوسط La (28 تا $46/5$ گرم در تن) در سنگهای آندزیت، تراکیت، داسیت و اندزیت - لاتیت تجزیه‌شده، نشان‌دهنده حد بالای واکنش ماگما با مواد پوسته است.

میزان Zr/Nb در بازالت‌های اقیانوسی، تغییرات قابل توجهی را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که نسبت یادشده در OIB کمتر از 10 ، در E-MORB حدود 10 و در N-MORB حدود 40 است (Pearce and Norry, 1979). به دلیل این‌که Nb از Zr ناسازگارتر است، نسبت Zr/Nb ماگما با افزایش در جهت تفریق، کاهش می‌یابد. میزان Zr/Nb در نمونه‌های مورد بررسی، به‌طور متوسط $12/8$ بوده است که قابل مقایسه با E-MORB است. مقدار Zr/Nb در واحد تراکی‌اندزیت بیشترین مقدار ($20/8$) و در ریولیت‌ها کمترین مقدار ($4/2$) است. بنابراین بیشترین تفریق در سنگهای ریولیتی اتفاق افتاده است.

محتوی پایین La ($4/1$ تا $8/2$ گرم در تن)، La ($10/8$ تا $17/8$ گرم در تن) و Zr/Nb ($4/2$) در واحد ریولیتی نشان می‌دهد که فعل و انفعال کمتر این ماگما با مواد پوسته‌ای رخ داده است. ریولیت‌های منطقه، رخنمونهای متفاوت در شمال غرب،



شکل 9. به ترتیب A: نمودار $^{87}Sr/^{86}Sr_{(i)}$ و B: $^{143}Nd/^{144}Nd_{(i)}$ در مقابل SiO_2 برای سنگهای آتشفشانی منطقه شمال غرب گناباد

Fig. 9. A: $^{87}Sr/^{86}Sr_{(i)}$ ratio and B: $^{143}Nd/^{144}Nd_{(i)}$ value vs. SiO_2 , respectively for volcanic rocks in northwest of Gonabad

References

- Abdi, M. and Karimpour, M.H., 2013. Petrochemical characteristics and timing of Middle Eocene granitic magmatism in Kooh-Shah, Lute Block, Eastern Iran. *Acta Geologica Sinica*, 84(4) 1032–1044.
- Aghanabati, A., 2004. *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran, Tehran, 586 pp (in Persian).
- Arjmandzadeh R. and Santos J.F., 2013. Sr–Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu–Mo porphyry mineralizing intrusives from Lut Block, eastern Iran. *International Journal of Earth Science*, 103(1): 123–140.
- Arjmandzadeh R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M. and Homam, S.M., 2011. Sr–Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, Eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 283–296.
- 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.
- Atherton, M.P. and Petford, N., 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362:144–146.
- Berberian, M., Jackson, J.A., Qorashi, M., Khatib, M.M., Priestley, K., Talebian, M. and Ghafuri-Ashtiani, M., 1999. The 1997 may 10 Zirkuh (Qaenat) earthquake (Mw 7.2): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran. *Geophysical Journal International*, 136(3), 671–694.
- BRGM, ORLEANS, 1983. *Geological Map of Gonabad*, scale 1:250000. Geological Survey of Iran.
- Camp, V. E. and Griffis, R. J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*, 15(3): 221–239.
- Esperanca, S., Crisci M., de Rosa, R. and Mazzuli R., 1992. The role of the crust in the magmatic evolution of the island Lipari (Aeolian Islands, Italy). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 112(4): 450–462.
- Gencalioglu Kuscü, 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.
- Ghaemi, F., 2005. *Geological Map of Gonabad*, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Gharibnavaz, A., Ebrahimi, KH., Mazaheri, S.A., Yoosefi, A. and Mahmoudi Gharaee, M.H., 2008. The industrial mineralogy and geochemistry of REE Gonabad Ahoee & Rhokh-sefid kaolinite deposits. Fifteenth Congress of Crystallography and Mineralogy of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (in Persian with English abstract).
- Gill, J., 1987. Early geochemical evolution of an oceanic island arc and backarc: Fiji. *The Journal of Geology*, 95(5): 589–615.
- Gill, R., 2010. *Igneous rocks and processes*. Wiley-Blackwell, New Jersey, 428 pp.
- Green, M.G., Sylvester, P.J. and Buick, R., 2000. Growth and recycling of early Archaean continental crust: geochemical evidence from the Coonterunah and Warrawoona Groups, Pilbara Craton, Australia. *Tectonophysics*, 322(1-2): 269–288.
- Harangi, S., Downes, H., Thirlwall, M. and Gmeling, K., 2007. Geochemistry, Petrogenesis and Geodynamic Relationships of Miocene Calc-alkaline Volcanic Rocks in the Western Carpathian arc, Eastern Central Europe. *Journal of Petrology*, 48(12): 2261–2287.
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A. and Mitchell, S.F., 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48(12): 2341–2357.
- Helvacı, C., Ersoy, E.Y., Sözbilir, H., Erkül, F., Sümer, Ö. and Uzel, B., 2009. Geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: Implications for amphibole-bearing lithospheric mantle source, western Anatolia. *Volcanology and Geothermal Research*, 185(3): 181–202.
- Jung, D., Keller, J., Khorasani, R., Marcks, Chr., Baumann, A. and Horn, P., 1983. Petrology of the Tertiary magmatic activity the northern Lut area, East of Iran, Ministry of mines and metals. Geological Survey of Iran, Tehran. Report 51: 285–336.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Farmer, L. and Stern, C.R., 2012. Petrogenesis of Granitoids, U-Pb zircon geochronology, Sr–Nd 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. *Geoprospecting*, 1(1): 19–36.
- Kolahdani, S., 2009. Remote sensing, tectonomagmatism, petrology, alteration and epithermal mineralization based on electron microscopy (SEM) and fluid inclusion evidences. M.Sc. thesis. Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran, 283 pp (in Persian with English abstract).
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68(1-2): 277-279.
- Mahdavi, A., Karimpour, M.H., Mao, J., Haidariani, Shahri, M.R., Malekzadeh Shafaroudi, A. and H. Li, 2016. Zircon U–Pb geochronology, Hf isotopes and geochemistry of intrusive rocks in the Gazu copper deposit, Iran: Petrogenesis and geological implications. *Ore Geology Reviews*, 72(1): 818–837.
- Malekzadeh Shafaroudi A., 2009. Geology, mineralization, alteration, geochemistry, Microthermometry, radioisotope and Petrogenesis of intrusive rocks copper-gold porphyry Maherabad and Khopik. Ph.D thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 535 pp (in Persian with English abstract).
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Stern, C.R., 2015. The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran: Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 522–544.
- Marchev, P., Raicheva, R., Downes, H., Vaselli, O., Chiaradia, M. and Moritz, R., 2004. Compositional diversity of Eocene–Oligocene basaltic magmatism in the Eastern Rhodopes, SE Bulgaria: implications for genesis and tectonic setting. *Tectonophysics*, 393(1-4): 301-328.
- Miranvari, A., 2008. Industrial mineralogy of Yasmina Kaolin deposit, Gonabad. M.Sc. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 128 pp (in Persian with English abstract).
- Miri Beydokhti, R., 2004. Mineralogical and geochemical study of kaolin deposits of Baghsiah, Rokhsefid and Kabutarkuh. M.Sc thesis, University of Shiraz, Shiraz, Iran, 256 pp (in Persian with English abstract).
- Miri Beydokhti, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F. and Koetzli, U., 2015. U-Pb Zircon Geochronology, Sr-Nd Geochemistry, Petrogenesis and Tectonic Setting of Mahoor Granitoid rocks (Lut Block, Eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 192-205.
- Moradi, M., Karimpour, M.H. and Salati, E., 2010. Geology and Petrology of intrusive rocks Eastern Najmabad. *Journal of Advanced Applied Geology*, 1(1): 1-10.
- Muir, R.J., Weaver, S.D., Bradshaw, J.D., Eby, G.N. and Evans, J.A., 1995. Geochemistry of the Cretaceous Separation Point batholith, New Zealand: granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere. *Geological Society of London*, 152(4): 689–701.
- Najafi, A., Karimpour, M.H., Ghaderi, M., Stern, Ch. and Farmer, L., 2014. U-Pb zircon geochronology, Rb-Sr and Sm-Nd isotope geochemistry, and petrogenesis of granitoid rocks at Kaje prospecting area, northwest Ferdows: Evidence for upper Cretaceous magmatism in Lut block. *Journal of Economic Geology*, 6(4): 107-135 (in Persian with English abstract).
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na, and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim, Cosmochim, Acta*, 38(5): 757–775.
- Nakhaei, M., 2015. Skarn, mineralogy, geochemical exploration magnetometry, dating, sm-nd and Rb- Sr isotopic studies of intrusive bodies in Bishe iron mineralization area, Birjand. Ph.D. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 388 pp (in Persian with English abstract).
- Nakhaei, M., Mazaheri, S.A., Karimpour, M.H., Stern, C.R., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S. and Heydariani, M.R. 2015. Geochronologic, geochemical, and isotopic constraints on petrogenesis of the dioritic rocks associated with Fe skarn in the Bisheh area, Eastern Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10): 8481-8495.
- 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. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: C.J. Hawkesworth, and M.J. Norry (Editors), *Continental basalts and mantle xenoliths*, Nantwich, Shiva, Cheshire, pp. 230-249.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1993. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290-300.
- Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33-47.
- Petford, N. and Atherton, M., 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37(6):1491-1521.
- Rollinson, H., 1993. Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, London, 248 pp.
- Salari mendi, M., Homam, S.M. and Ebrahimi nasrabadi, Kh., 2013. Petrography and geochemistry of the volcanic rocks, Atabaki and Bagh asia area, Khorasan Razavi Province, as a host rock of kaoline deposit. Fifteenth Congress of economic geology of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (in Persian with English abstract).
- Samiee, S., Karimpour, M.H., Ghaderi, M., Haidarian Shahri, M.R., Kloetzli, U. and Santos, J.F., 2016. Petrogenesis of subvolcanic rocks from the Khunik prospecting area, south of Birjand, Iran: Geochemical, Sr-Nd isotopic and U-Pb zircon constraints. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 170-182.
- Schandl, E.S. and Gorton, M.P., 2000. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *The Canadian Mineralogist*, 38(5): 1065-1073.
- 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. *Himalayan Earth Sciences*, 40: 1-23.
- Smithies, R.H., Champion, D.C. and Sun, S.S., 2004. Evidence for early LREE-enriched mantle source Regions: diverse magmas from the c.3.0 Ga Mallina Basin, Pilbara Craton, NW Australia. *Journal of Petrology*, 45(8): 1515-1537.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition processes. In: A.D. Saunders, M.J. Norry (Editors), *Geological Society of London, London* 42: 313-345.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. The continental crust, its composition and evolution, an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell, Oxford, 312 pp.
- 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(3): 333-351.
- Tirrul, R., Bell, I.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.
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Ramezani, J., Hassanzadeh, J., Renne, P.R. and Spell, T.L., 2007. Geology and thermochronology of Tertiary Cordilleran-style metamorphic core complexes in the Saghand region of central Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 119(8): 961-977.
- Wilson, M., 1989. *igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466 pp.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20(4): 325-343.
- Zirjanizadeh, S., Karimpour, M.H. and Ebrahimi, Kh., 2014. geological, mineralogical and geochemical studies of Kalateno kaolin deposits (northwest Gonabad). *Crystallography and Mineralogy of Iran*, 22 (1): 125-138 (in Persian with English abstract).



Petrography, Geochemistry and Petrogenesis of Volcanic Rocks, NW Ghonabad, Iran

Sedigheh Zirjanizadeh¹, Mohammad Hassan Karimpour^{1*}, Khosrow Ebrahimi Nasrabadi¹ and Jose Francisco Santos²

1) Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2) Department of Geosciences, University of Aveiro, Aveiro, Portugal

Submitted: Aug. 4, 2015

Accepted: Feb. 17, 2016

Key words: ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, geochemistry, volcanic rocks, Lut block, Eastern Iran

Introduction

The study area is located in NW Gonabad, Razavi Khorasan Province, northern Lut block and eastern Iran north of the Lut Block. Magmatism in NW Gonabad produced plutonic and volcanic rock associations with varying geochemical compositions. These rocks are related to the Cenozoic magmatic rocks in Iran and belong to the Lut Block volcanic-plutonic belt. In this study, petrogenesis of volcanic units in northwest Gonabad was investigated.

The volcanic rocks are andesites/trachyandesites, rhyolites, dacites/ rhyodacites and pyroclastics. These rocks show porphyritic, trachytic and embayed textures in phenocrysts with plagioclase, sanidine and quartz (most notably in dacite and rhyolite), hornblende and rare biotite. The most important alteration zones are propylitic, silicification and argillic. Four kaolinite-bearing clay deposits have been located in areas affected by hydrothermal alteration of Eocene rhyolite, dacite and rhyodacite.

Analytical techniques

Five samples were analyzed for major elements by wavelength dispersive X-ray fluorescence (XRF) and six samples were analyzed for trace elements using inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) in the Acme Laboratories, Vancouver (Canada). Sr and Nd isotopic compositions were determined for four whole-rock samples at the Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade de Aveiro, Portugal.

Results

Petrography. The rocks in this area are consist of trachyte, andesite/ trachyandesite, dacite/ rhyodacite, principally as ignimbrites and soft tuff. The textures of phenocrysts are mainly porphyritic, glomerophytic, trachytic and embayed textures in plagioclase, hornblende and biotite. The groundmasses consist of plagioclase and fine-grained crystals of hornblende. Plagioclase phenocrysts and microlites are by far the most abundant textures in andesite - trachyandesites (>25% and in size from 0.01 to 0.1mm). Euhedral to subhedral hornblende phenocrysts are abundant (3-5%) and 0.1 to 0.6mm in size.

Trachyte is characterized by trachytic texture. Ninety percent of the rock consists of sanidine. In trachytes, 3 to 5% hornblende (0.3 mm) is replaced by carbonates. Rhyolites contain quartz, plagioclase, sanidine, and biotite phenocrysts in a microcrystalline to glassy groundmass. Rhyodacite has phenocrysts, some glomerophytic, consisting of quartz, 2 to 3% (0.1-0.5 mm), plagioclase 7 to 10% (0.2- 0.8 mm), hornblende 5% and biotite 1%. Up to 15% of sanidine is altered to clay minerals. Crystal tuff and lithic-crystal tuff are distributed over a large area.

Using the Zr/TiO₂ and Nb/Y diagram of Winchester and Fold (1977), samples are designated as rhyolite, dacite and sub-alkaline basalt. In the Co vs. Th diagram of Hastie et al. (2007), samples plot in the shoshonitic and high calc-alkaline, rhyolite, dacite and andesite-basalt fields.

The REE patterns and trace element contents of the volcanic samples show: (1) LREE/HREE

enrichment ($(La/Yb)_N = 0.3$ to 15.27), (2) Low negative Eu anomaly ($ave.Eu^*/Eu=0.2-0.85$), (3) depletion in Ba, Sr, K_2O , Zr and Ti (Lower continental crust-normalized spider diagram from Taylor and McLennan, 1985 and Chondrite-normalized diagram from Nakamura, 1974. Rhyolites show the most extreme negative Eu anomaly ($Eu/Eu^* = 0.2-0.3$) compared with $0.65-0.85$ for volcanic elsewhere and also show considerably differences in the contents of Rb, Sr, K, Ti, Zr, Hf, Ce. These differences are related to greater magmatic differentiation or derivation from the other sources. The Sr and Nd isotopic ratios of these volcanic rocks are: $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70699$ to 0.71014 and $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512144$ to 0.512539 . Assuming an age of 60 Ma, the initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios vary from 0.70671 to 0.71066 and initial $^{143}Nd/^{144}Nd$ values vary from 0.512098 to 0.51249 ($\epsilon Nd_i = -9.1$) to 0.51249 ($\epsilon Nd_i = -1.4$). In the ϵNd_i versus ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i diagram, the samples plot in the field typical of magmas that are of crustal origin or, at least, that underwent important processes of crustal assimilation/contamination.

Andesitic rocks displays lightly lower ranges of $^{87}Sr/^{86}Sr$ ($0.7067-0.7068$) and ϵNd_i values from -1.44 to -2.34 , than rhyolite. Distinct Sr and Nd isotopic compositions are seen between rhyolitic rocks and andesitic rocks. The geochemical data suggest that the rhyolitic magmas probably represent the final differentiates

of parental magmas, resulting from partial melting of mafic lower crust. Generally, the magmas from this area have low Sr (less than 400 ppm), high K_2O/Na_2O and negative Eu anomalies.

References

- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A. and Mitchell, S.F., 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48(12): 2341- 2357.
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na, and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim, Cosmochim, Acta*, 38(5): 757-775.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. The continental crust, its composition and evolution, an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell, Oxford, 312 pp.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20(4): 325-343.