



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

## Petrology of rhyolite-trachytes from the Rizu Formation in the Zarand area (NW Kerman)

Faeze Ghodrati Shah Mohammadi<sup>1</sup>, Mohsen Nasrabady<sup>2</sup>, Akbar Ahmadvand<sup>3\*</sup>, Kazem Gholizadeh<sup>4</sup>, Parviz Armani<sup>5</sup>

1. MSc student, Geology Department, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin
2. Associate Professor, Geology Department, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin
3. PhD student, Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Karaj
4. PhD, Mineral Holding of Copper Star, Ahang-e-Tejarat-e-Niko Company
5. Associate Professor, Geology Department, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin

### Article info

#### Article history

Received: 03 May 2022

Accepted: 21 August 2022

#### Keywords:

Anorogenic rhyolite, continental rift, Rizu formation, Zarand



### Abstract

The Rizu Formation of the Zarand area consists of felsic (rhyolite-trachyte) and mafic (microgabbro-dolerite) magmatic suites, overlain by dolomites of the Desu Formation. Felsic magmatic units are investigated in this research. The rhyolite-trachytes of the Rizu Formation are composed of alkali feldspar microphenocrysts that have been enclosed by fine grained and micro granular groundmass consisting of quartz, alkali feldspar and plagioclase. Whole rock geochemical data indicate that the samples are metaluminous with high FeO/MgO ratio, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O and HFSE, and low CaO, Ba and Eu contents that are in line with geochemical characteristics of anorogenic granites. According to the tectonic discrimination diagrams, the felsic rocks of the Rizu Formation were formed in within plate to continental rift settings. They show the same geochemical signatures as those of anorogenic rhyolites of the East African rift and Basin and Range province of the west coast of North America. In addition, the rhyolite-trachytes of the Rizu Formation suggest an A1 subtype on the basis of anorogenic granite discrimination diagrams, derived from fractional crystallization of an OIB-type mantle melt in a within plate (failed rift) environment. Their association with microgabbros is also reminiscent of bimodal magmatism in a continental back arc rift formed by the subduction of Prototethys beneath the Iranian plate during the Late Neoproterozoic-Cambrian.

\*Corresponding author: Akbar Ahmadvand; E-mail: [ahmadvand.akbar1984@gmail.com](mailto:ahmadvand.akbar1984@gmail.com)

How to cite this article: Ghodrati Shah Mohammadi, F., Nasrabady, M., Ahmadvand, A., Gholizadeh, K., Armani, P., 2022. Petrology of rhyolite-trachytes from the Rizu formation in the Zarand area (NW Kerman). Kharazmi Journal of Earth Sciences 8(1), 144- 167.



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Rhyolites occur in almost all types of tectonic settings, although their proportion varies greatly from one setting to another. Combination of two end-member mechanisms is commonly invoked to explain the generation of rhyolites: 1) anatectic melting of crustal materials (Riley et al., 2001) and remelting of solidified basalt underplated to the lower crust (Miller and Harris, 2007). 2) Fractional crystallization of a more mafic magma with or without crustal contamination (Hutchison et al., 2018).

There are relatively extensive outcrops of felsic (rhyolite-trachyte) and mafic (microgabbro) magmatic rocks in the Rizu Formation of Zarand area (NW Kerman), where they are overlain by dolomites of the Desu Formation.

In order to define the petrogenesis and tectonic setting of felsic magmatism of the Rizu Formation, this study focuses on the petrochemistry of rhyolite-trachyte suites. Our data suggest their formation in a continental back-arc rift during the Late Neoproterozoic-Cambrian subduction of Prototethys beneath the Iranian plate.

### Material and methods

In this contribution, we investigate the geochemistry of felsic magmatic rocks (rhyolite-trachyte) of the Rizu Formation as a tool to constrain their petrogenesis and paleotectonic setting. We integrate field investigations and microscopic observations with laboratory work through whole-rock chemistry of 10 samples. Whole rock geochemical data were obtained from ICP-OES and ICP-MS analyses performed at Zar Azma Company, Thran.

### Results and discussion

The investigated volcanic rocks show porphyritic and amygdaloidal textures. Alkali feldspar microphenocrysts set in a fine-grained and felsitic matrix that composed of quartz + alkali feldspar + plagioclase assemblage. Amygdaloidal texture is characterized by the vesicles filled with quartz, calcite and tourmaline.

In the studied rhyolite-trachytes, the  $\text{SiO}_2$  content ranges from 67.26 to 70.15 wt. %.  $\text{K}_2\text{O}$  (0.85–6.92 wt.%) and  $\text{Na}_2\text{O}$  (3.63–7.09 wt.%), and total alkaline ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.94\text{--}10.63$  wt.%) display high ranges associated with relatively high content of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14.73–15.72 wt.%), and, except for two samples, very low Mg# (9–13). They show metaluminous character and most of them fall in the alkaline to shoshonitic fields.

The chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns exhibit negatively sloped trends with light (L) REE enrichment relative to heavy (H) REE and, a pronounced negative Eu anomaly. The primitive mantle-normalized trace element spider diagrams indicate relative enrichment in large ion lithophile elements (except for Ba) and depletion in high field strength elements, such as Sr, P, Ti, and Zr. The REE and spider diagram patterns of the investigated samples display considerable compositional overlap with those of felsic volcanics of the East African rift, Basin and Rang rhyolites from the western North America and Alamdar rhyolites of NW Iran.

As shown in the tectonic discriminating diagrams, most of the samples have within plate and continental rift geochemical signatures. According to granitoid discrimination diagrams, the samples mainly

fall into A-type field. They also correspond mainly to the A1 subgroup and overlap with the OIB field, which is compatible with an intraplate setting. Numerous case studies have documented that fractional crystallization of basaltic parental melts produces ferroan, metaluminous peralkalic, alkalic to alkali-calcic granites with OIB-like trace element characteristics of A1-subgroup (Frost and Frost, 2011).

Vesali et al., (2018) and Sepidbar et al., (2020) pointed out mafic magmatism of the Rizu Formation in the Zarand region (like those cropped out in the Badiz area) characterized by geochemical signatures similar to alkali basalt with enriched character of OIB sources in a failed continental rift setting.

Finally, we propose that the rhyolite-trachytes associated with microgabbros in the Rizu Formation are reminiscent of bimodal magmatism in a continental back-arc rift formed by Prototethys subduction beneath the Iranian plate during the Late Neoproterozoic-Cambrian.

## References

Frost, C.D., and Frost, B.R., 2011. On ferroan (A-type) granitoids: Their compositional variability and modes of origin. *Journal of Petrology* 52, 39–55.

- Hutchison, W., Mather, T.M., Pyle, D.M., Boyce, A.J., Gleeson, M.L.M., Yirgu, G., Blundy, J.D., et al., 2018. The evolution of magma during continental rifting: New constraints from the isotopic and trace element signatures of silicic magmas from Ethiopian volcanoes. *Earth and Planetary Science Letters* 489, 203–218.
- Medlin, C.C., Jowitt, S.M., Cas, R.A.F., Howard, H.M., Wingate, M.T.D., 2014. Petrogenesis of the A-type, Mesoproterozoic intra-caldera rheomorphic Kathleen ignimbrite and comagmatic Rowland suite intrusions, west Musgrave province, central Australia: Products of extreme fractional crystallization in a failed rift setting. *Journal of Petrology* 56, 493-525.
- Miller, J.A., and Harris, C., 2007. Petrogenesis of the Swaziland and northern Natal rhyolites of the Lebombo marginal graben, south east Africa. *Journal of Petrology* 48, 185-218.
- Sepidbar, F., Moghadam, H.S., Li, C, Stern, R.J., Jiantang, P., Vesali, Y., 2020. Cadomian magmatic rocks from Zarand (SE Iran) formed in a Retro-Arc Basin. *Lithos* 366–367, 105569.
- Vesali, Y., Esmaili, D., Sepidbar, F., Shibi, M., Niromand, Sh., 2018. Petrology, geochemistry and geo-structural origin of alkaline rocks in Jalal-Abad region of Zarand. (Kerman Province) Signs of Paleotethys Coffin Formation in Central Iran. *Petrology* 1, 1-20 (in Persian).



## پترولوژی ریولیت-تراکیت‌های سازند ریزو در ناحیه زرنند (شمال باختری کرمان)

فائزه قدرتی شاه‌محمدی<sup>۱</sup>، محسن نصرآبادی<sup>۲</sup>، اکبر احمدوند<sup>۳\*</sup>، کاظم قلی زاده<sup>۴</sup> و پرویز آرمانی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، دانشکده علوم پایه، گروه زمین‌شناسی، قزوین
۲. دانشیار، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، دانشکده علوم پایه، گروه زمین‌شناسی، قزوین
۳. دانشجوی دکتری، دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین، گروه ژئوشیمی، کرج
۴. دکتر، هلدینگ معدنی کاپر استار، شرکت آهنگ تجارت نیکو، تهران
۵. دانشیار، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، دانشکده علوم پایه، گروه زمین‌شناسی، قزوین

### چکیده

سازند ریزو در منطقه شمال باختری زرنند متشکل از واحدهای ماگمایی فلسیک (ریولیت-تراکیت) و مافیک (میکروگابرو-دلریت) است که در زیر دولومیت سازند دزو قرار دارند. در این پژوهش واحدهای ماگمایی فلسیک مورد بررسی قرار گرفته است. ریولیت-تراکیت‌های سازند ریزو متشکل از درشت‌بلورهای فلدسپار آلکان است که توسط خمیره ریزبلور و میکروگرانولار متشکل از کوارتز، فلدسپار آلکان و پلاژیوکلاز احاطه شده‌اند. داده‌های ژئوشیمیایی سنگ کل نشان‌دهنده آن است که نمونه‌های فلسیک متآلومین مورد مطالعه دارای مقادیر بالایی از نسبت  $FeO/MgO$ ،  $Na_2O+K_2O$ ، HFSE، و مقادیر کم  $CaO$ ،  $Ba$  و  $Eu$  هستند که با ویژگی‌های ژئوشیمیایی گرانیت‌های غیرکوهزائی مطابقت دارد. بر اساس نمودارهای متمایزکننده جایگاه تکتونیکی، نمونه‌های فلسیک سازند ریزو جایگاه تکتونیکی درون صفحه‌ای و ریفت قاره‌ای دارند. این نمونه‌ها با ریولیت‌های غیرکوهزائی ریفت شرق آفریقا و ایالت بیسین و رشته‌کوه‌های ساحل غرب آمریکای شمالی شاخصه‌های ژئوشیمیایی یکسان نشان می‌دهند. مطابق نمودارهای متمایزکننده گرانیت-های غیرکوهزائی، ریولیت-تراکیت غیر کوهزائی سازند ریزو از نوع  $A_1$  هستند که در نتیجه تبلور تفریقی ماگمای گوشته‌ای غنی شده نوع OIB در جایگاه درون صفحه‌ای (ریفت عمیق) ایجاد شده‌اند. همراهی ریولیت-تراکیت‌های درون صفحه‌ای سازند ریزو با میکروگابرو، بیانگر ماگماتیسم دوگانه در یک ریفت پشت قوس قاره‌ای است که از فرورانش اقیانوس پروتوتتیس به زیر ورقه ایران در نوپروتروزویک پسین-کامبرین نشأت گرفته است.

### اطلاعات مقاله

#### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰

#### واژه‌های کلیدی

ریولیت غیرکوهزائی، ریفت قاره‌ای، سازند ریزو، زرنند.



\*نویسنده مسئول: اکبر احمدوند [ahmadvand.akbar1984@gmail.com](mailto:ahmadvand.akbar1984@gmail.com)

استناد به این مقاله: قدرتی شاه‌محمدی، ف.، نصرآبادی، م.، احمدوند، ا.، قلی زاده، ک.، آرمانی، پ. (۱۴۰۱) پترولوژی ریولیت-تراکیت‌های سازند ریزو در ناحیه زرنند (شمال باختری کرمان). مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۸، شماره ۱، صفحه ۱۴۴ تا ۱۶۷.

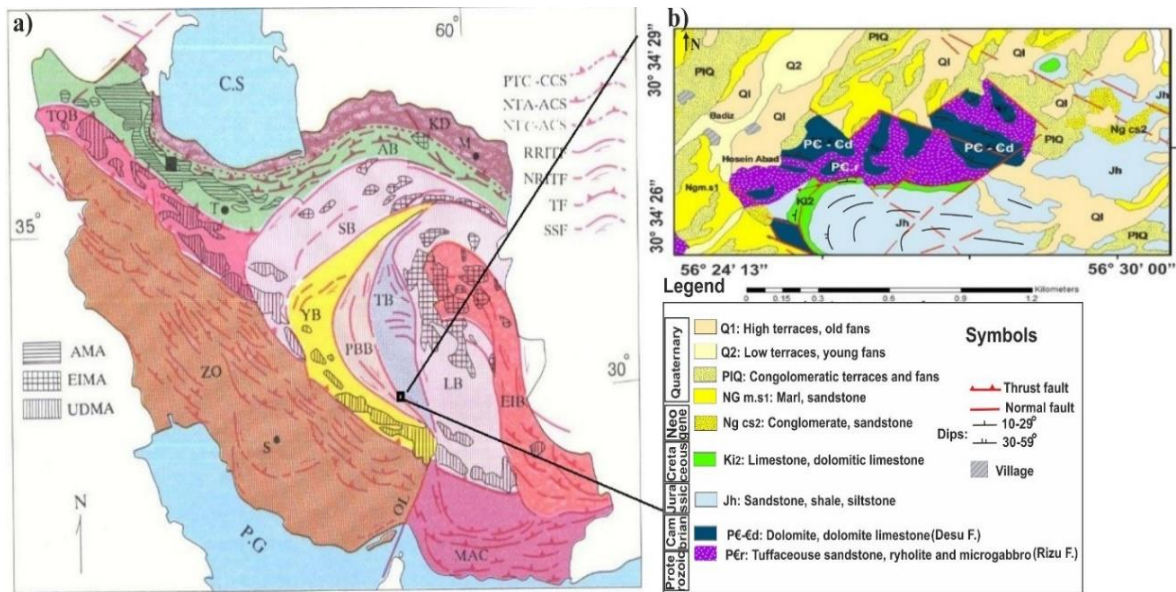


## مقدمه

فهم سازوکار تقابل گوشته-پوسته، به شناخت تحول و تاریخچه تکتونیکی پوسته قاره‌ای کمک خواهد کرد. از دیرباز سنگ‌های آتشفشانی فلسیک همراه سازندهای پرکامبرین ایران نظیر قره‌داش، هرمز، اسفوردی و ریزو و معادل‌های درونی آنها همچون گرانیتوئیدهای زیرگان، دوران و برنورد، به عنوان ماگماتیسیم آلکالن پس از کوهزائی پان‌آفریکن یاد شده که در جایگاه تکتونیکی ریفت قاره‌ای رخ داده‌اند (Berberian and King, 1981).

در پیرامون شهر زرنند (شمال باختری کرمان) واقع در محدوده بادیز، سازند ریزو متشکل از رخنمون‌های گسترده‌ای از رخداد‌های ماگمایی فلسیک به شکل عمدتاً ریولیت و تا اندازه‌ای تراکیت و مافیک (میکروگابرو-دلریت) است که در زیر دولومیت‌های منتسب به سازند دزو قرار دارند. در این پژوهش سعی شده است که با بررسی شیمی سنگ کل سنگ‌های آتشفشانی فلسیک منطقه بادیز، سازوکار تشکیل و جایگاه تکتونیکی آنها در ارتباط با موقعیت پالئوژئوگرافی ورقه ایران روشن گردد.

سنگ‌های آتشفشانی فلسیک در مقایسه با دیگر سنگ‌های خروجی از گسترش کمتری در سطح زمین برخوردارند. با این وجود بررسی این گونه واحدهای سنگی ابزاری مفید برای شناخت پوسته قاره‌ای و فهم تحولات آن می‌باشند. سنگ‌های آتشفشانی فلسیک در جایگاه‌های تکتونیکی متنوع متشکل از درون ورقه‌ای قاره‌ای و اقیانوسی تا قوس‌های ماگمایی و پهنه‌های ریفت قاره‌ای یافت می‌شوند (Ayalew and Ishiwatri, 2011). دو مدل پتروژنتیکی اصلی برای تشکیل آنها پیشنهاد شده که عبارتند از: تفریق پیشرفته مذاب‌های مافیک گوشته‌ای (Medlin et al., 2014; Shao et al., 2015; Hutchison et al., 2018; Yan et al., 2023) و ذوب بخشی پوسته قاره‌ای هم‌جوار با مذاب‌های داغ گوشته‌ای (Riley et al., 2001; Miller and Harris, 2007; Takanashi et al., 2011; Lu et al., 2022). بنابراین، در بسیاری از موارد شاهد هم‌زیستی مکانی و زمانی ماگماتیسیم فلسیک و مافیک در ایالت‌های ماگمایی دوگانه نظیر ریفت قاره‌ای، قوس قاره‌ای و نقاط داغ هستیم. از این-رو، بررسی ژنز سنگ‌های آتشفشانی فلسیک، علاوه بر



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ساده از محدوده بادیز با تغییرات از وحدتی دانشمند (Vahdati Daneshmand, 1996).

Fig. 1. Simplified geological map of the Badiz district. Modified after Vahdati Daneshmand (1996).

### زمین‌شناسی ناحیه‌ای و روابط صحرائی

به علت پیچیدگی زمین‌شناسی، پهنه ایران مرکزی توسط علوی (Alavi, 1991)، به پنج بلوک با عناوین لوت، طبس، یزد، پشت بادام و سبزواری تقسیم شده است (شکل ۱-ا). منطقه زرنند در بخش انتهایی بلوک پشت بادام واقع است. در این منطقه واحدهای سنگی آذرین و رسوبی با قدمت نئوپروتروزوئیک پسین تا عهد حاضر برونزد دارند (شکل ۱-ب). سازند مراد کهن‌ترین واحد سنگی با قدمت نئوپروتروزوئیک پسین در پهنه زرنند است که در ناحیه بادیز برونزد ندارد. قدیمی‌ترین واحد سنگی رخنمون یافته در منطقه بادیز منسوب به نئوپروتروزوئیک پسین و متعلق به سری ریزو با لیتولوژی غالب کربناته است که با ماگماتیسیم فلسیک همراهی می‌شود و بر روی سنگ‌های آواری منسوب به ژوراسیک بالایی رانده شده است. سازند ریزو، هم ارز زمانی سازندهای

منطقه مورد مطالعه به عنوان بخشی از پهنه ایران مرکزی در مرز شهرستان‌های زرنند و رفسنجان (محدوده بادیز) و در گستره طول‌های جغرافیایی  $56^{\circ}24'13''$  تا  $56^{\circ}30'00''$  خاوری و عرض‌های جغرافیایی  $30^{\circ}34'26''$  تا  $30^{\circ}34'29''$  شمالی قرار گرفته است.

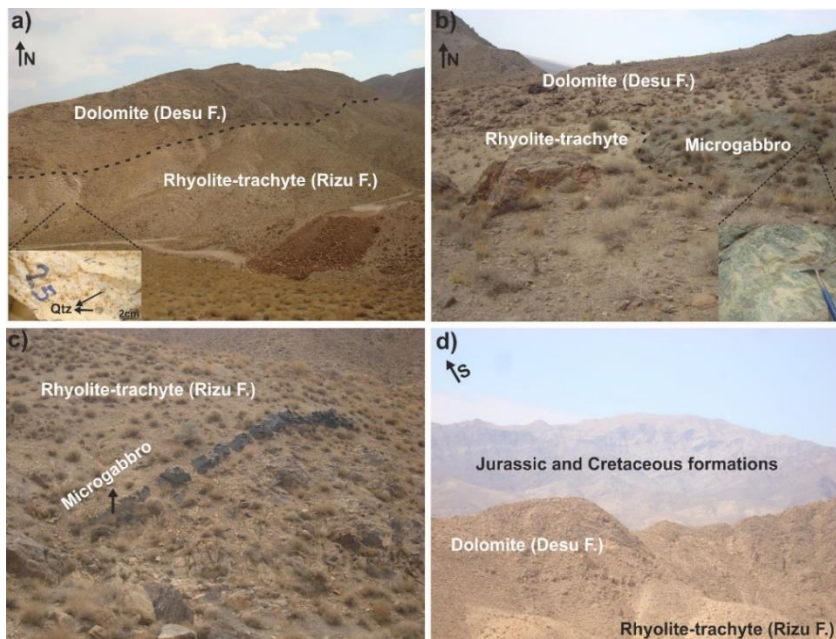
ورقه ایران در دوره زمانی فانروزوئیک دستخوش رخدادهای متوالی ریفتینگ، فرورانش و برخورد شده است. خرده قاره ایران مرکزی تشکیل‌دهنده بزرگترین پهنه پی‌سنگی قلمرو ایران است که شواهدی از رویدادهای ماگماتیسیم، تکتونیسیم و دگرگونی با قدمت نئوپروتروزوئیک پسین تا عهد حاضر را نشان می‌دهد (Berberian, and King, 1981; Bagheri and Stampfli, 2008).



پیروکلاستیک نظیر توف و ایگنمبریت است. ماگماتیسم مافیک نیز به صورت میکروگابرو و دلریت، دیگر واحد سنگی منطقه بادیز است که به صورت توده‌های کوچک (شکل ۲-ب) یا دایک (شکل ۲-ج) درون واحدهای ماگمایی فلسیک دیده می‌شوند. میکروگابروها بر اثر دگرسانی و تشکیل اپیدوت و آمفیبول در صحرا به رنگ سبز دیده می‌شوند (شکل ۲-ب). در بخش جنوبی بادیز، توالی‌های ژوراسیک و کرتاسه با روند شرقی-غربی مشاهده می‌شوند که شیئی رو به جنوب دارند (شکل ۲-د) و اثری از ماگماتیسم مافیک و فلسیک یاد شده در آنها وجود ندارد.

بایندور، سلطانیه و باروت در البرز بوده و با توجه به اینکه بخشی از سازند سلطانیه قدمت کامبرین پیشین دارد بنابراین بخش بالایی سازند ریزو دارای سن کامبرین پیشین است. مرز زیرین سازند ریزو در منطقه زرنده گسسته شده و در بالا نیز با ناپیوستگی فرسایشی توسط سازند دزو متشکل از شیل، ماسه سنگ، سیلت، آهک و دولومیت گچ‌دار پوشیده می‌شود (Stöcklin, 1961).

ماگماتیسم فلسیک مورد مطالعه به صورت ریولیت و تراکیت با ساخت بادامی متشکل از حفرات پر شده با کوارتز و کلسیت، در زیر دولومیت‌های سازند دزو برونزد دارد (شکل ۲-ا). ماگماتیسم فلسیک سازند ریزو در منطقه بادیز، عاری از واحدهای سنگی



شکل ۲-ا) قرارگیری واحد دولومیتی سازند دزو بر روی ریولیت-تراکیت ریزو در ارتفاعات منطقه بادیز. (ب) برونزدی از ماگماتیسم مافیک به صورت توده میکروگابرویی همجوار با ریولیت-تراکیت. (ج) تزریق دایک میکروگابرویی به داخل واحد ریولیت-تراکیت سازند ریزو. (د) توالی‌های ژوراسیک و کرتاسه جنوب بادیز با روند شرقی-غربی که شیئی رو به جنوب دارند.

Fig. 2. a) Dolomite unit of the Desu formation overlying the Rizo rhyolite-trachyte in the Badiz Mountains. The enlarged view of rhyolite-trachyte shows the vesicles filled with quartz. b) An outcrop of microgabbro body adjacent to rhyolite-trachyte unit. A close-up of microgabbro is shown on the lower- right part of the figure. c) Microgabbroic dyke intruded into rhyolite-trachyte unit of the Rizu Formation. d) Jurassic and Cretaceous sequences, E-W trending, dip to the south.

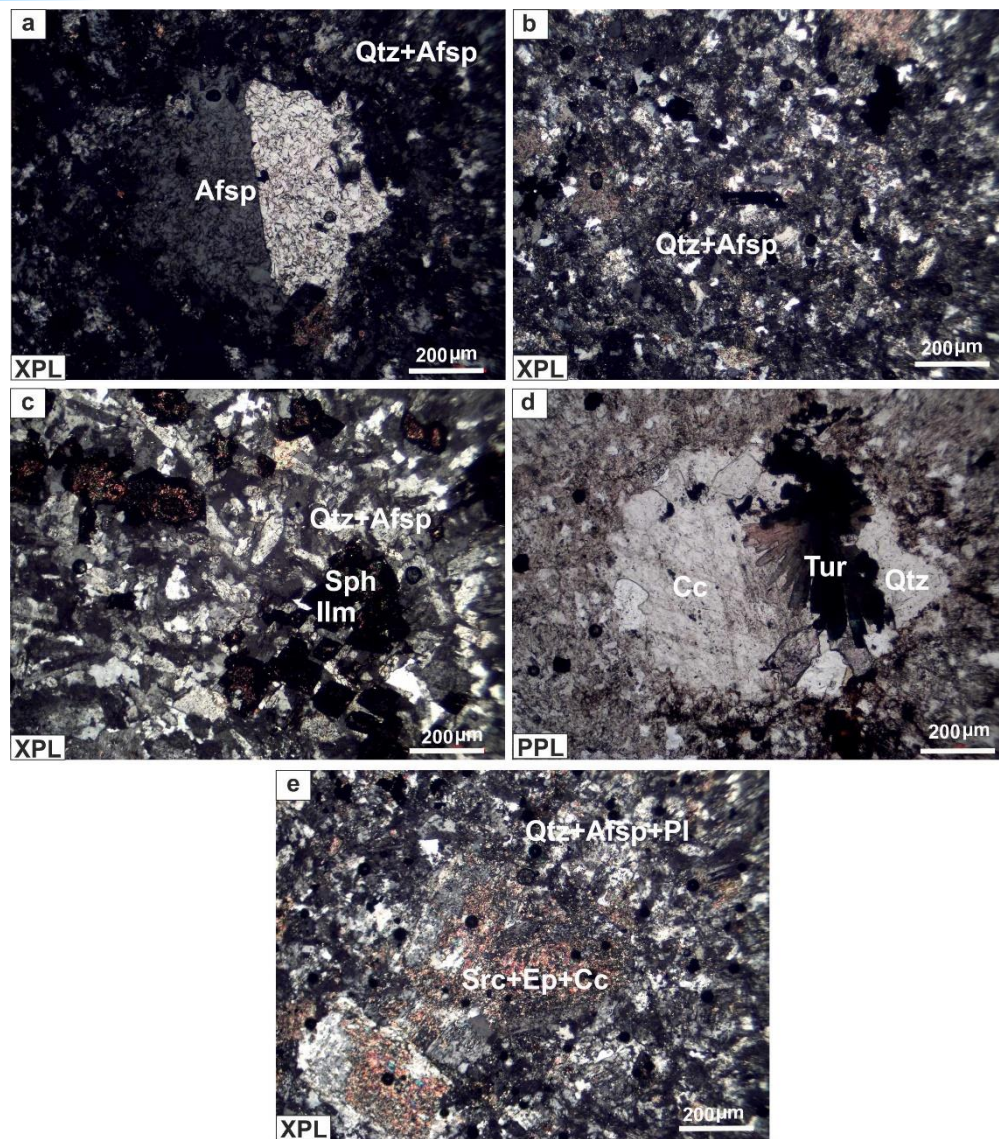
## مواد و روش‌ها

پس از نمونه‌برداری، تهیه مقاطع نازک و انجام مطالعات پتروگرافی، ۱۰ نمونه سنگ آتشفشانی فلسیک کمتر دگرسان شده و عاری از بافت بادامی انتخاب و برای انجام آنالیز ژئوشیمی به آزمایشگاه شرکت دانش‌بنیان مطالعات مواد معدنی زرآرما ارسال شد. تجزیه عناصر اصلی به روش ICP-OES و عناصر کمیاب به روش ICP-MS صورت گرفته است. اکسیدهای اصلی پس از ذوب به کمک لیتیم‌متابورات، در اسید نیتریک رقیق حل شده و سپس محلول نهایی با استفاده از دستگاه ICP-OES مورد آنالیز شیمیایی قرار می‌گیرد. در مورد عناصر کمیاب، پس از انحلال نمونه مورد مطالعه در اسیدهای هیدروفلوئوریک، پرکلریک، نیتریک و هیدروکلریک، غلظت هر عنصر توسط دستگاه ICP-MS سنجیده می‌شود. حد آشکارسازی عناصر اصلی ۰/۰۱، عناصر کمیاب خاکی (غیر از لانتانیم) ۰/۰۱ تا ۰/۱ و بقیه عناصر کمیاب ۰/۱ تا ۱ می‌باشد. نتایج آنالیزها، در جدول ۱ ارائه شده است. بعد از ترسیم نمودارهای رده‌بندی، عنکبوتی و جایگاه تکتونیکی به کمک نرم‌افزارهای Excle و IgPet، به تحلیل و تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی اقدام شده است.

## سنگ‌نگاری

بافت واحدهای ماگمایی فلسیک مورد مطالعه، میکروگرانولار و پورفیری با میکروفونوکریست‌های فلدسپار آلکالن دارای شواهد خوردگی خلیجی (شکل ۳-۱) و ندرتاً پلاژیوکلاز است که در خمیره ریزبلور نوع میکروگرانولار و فلسیتیک (شکل ۳-۲) قرار دارند. ایلمنیت از جمله کانی‌های فرعی است که از اطراف در حال تبدیل به اسفن می‌باشد (شکل ۳-۳). بافت آمیگدال یا بادامی از دیگر بافت‌های موجود می‌باشد که در آن حفرات خروج گاز توسط کوارتز، کلسیت، موسکویت و تورمالین پر شده است (شکل ۳-۴) که معرف تزریق و جایگزینی سطحی آنهاست. از این‌رو با وجود بافت میکروگرانولار و فلسیتیک خمیره، بر اساس شواهد بافتی یاد شده، استفاده از واژه ریولیت-تراکیت به جای میکروگرانیت-میکروسینیت برای توصیف ماگماتیسیم فلسیک سازند ریزو در محدوده بادیز ترجیح داده شده است. بر اساس مطالعات میکروسکوپی سه فرایند دگرسانی در نمونه‌های مورد مطالعه شناسایی شده که عبارتند از: کلسیتی شدن، سریسیتی شدن و تورمالینی شدن. شواهد کلسیتی و سریسیتی شدن در بعضی از نمونه‌های مورد مطالعه دیده می‌شود (شکل ۳-۵).





شکل ۳- (a) میکروفنوکریست فلدسپار آلکالن با بافت خلیجی. (b) بافت میکروگرانولار خمیره نمونه‌های ماگمایی فلسیک. (c) بافت آمیگدال یا بادامی که در آن حفرات خروج گاز توسط کوارتز، تورمالین و کلسیت پر شده است. (d) کانی فرعی ایلمنیت که در حال تبدیل به اسفن می‌باشد. (e) سریسیتی و سوسوریتی شدن میکروفنوکریست‌های پلاژیوکلاز.

Fig. 3. a) Alkali feldspar microphenocryst showing embayed texture. b) Microgranular texture of the matrix in the felsic magmatic samples. c) Accessory mineral of ilmenite that replaced by sphene. d) Amygdaloidal texture consisting of vesicles filled with quartz, calcite and tourmaline. e) Sericitization and Saussuritization of plagioclase microphenocrysts.

هستند. عدد منیزیم کمتر از ۱۵ بیشتر نمونه‌ها،

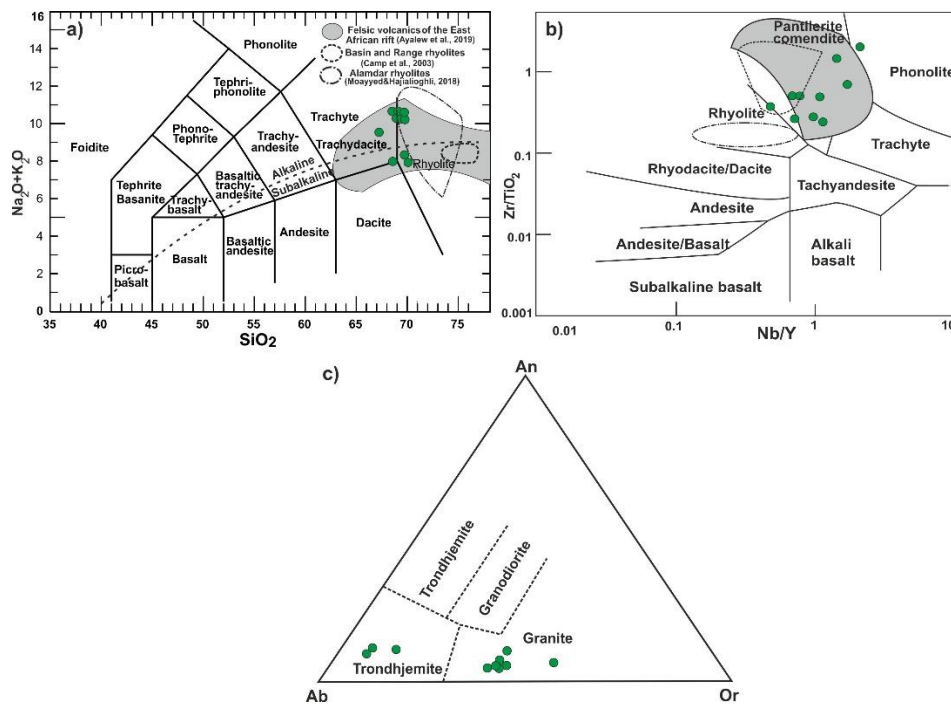
بیانگر ماهیت غنی از آهن آنهاست (جدول ۱). در نمودار رده‌بندی سنگ‌های آذرین (LeBas et al., 1986)، نمونه‌های فلسیک مورد مطالعه عمدتاً از نوع

### ژئوشیمی

نمونه‌های مورد مطالعه دارای مقادیر  $\text{SiO}_2$  ۶۷/۲۶ تا ۷۰/۱۵ درصد وزنی،  $\text{K}_2\text{O}$  ۰/۸۵ تا ۶/۹۲ درصد وزنی و  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ۷//۹۴ تا ۱۰/۶۳ درصد وزنی

برای مقایسه در این شکل و شکل ۳ (شکل‌های ۵، ۶ و ۷) نشان داده شده‌اند. سنگ‌های آتشفشانی فلسیک سازند ریزو همپوشانی ترکیبی قابل توجهی با انواع موجود در ریفت شرق آفریقا نشان می‌دهند.

ریولیت تا تراکیت هستند (شکل ۴-ا). محدوده سنگ‌های آتشفشانی فلسیک اتیوپی در ریفت شرق آفریقا (Ayalew et al., 2019)، ریولیت‌های ایالت بیسین و رشته کوه‌های غرب آمریکای شمالی در اروگان (Camp et al., 2003) و ریولیت‌های علمدار در شمال غرب ایران (Moayyed and Hajialioghli, )



شکل ۴- نمودارهای رده‌بندی و نام‌گذاری نمونه‌های ماگمایی فلسیک سازند ریزو در محدوده بادیز. (a) نمودار  $\text{SiO}_2$  در مقابل  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (LeBas et al., 1986). منحنی متمایزکننده سری ماگمایی آلکان و ساب آلکان (Irvine and Baragar, 1971) نیز نمایش داده شده است. (b) نمودار نسبت  $\text{Nb}/\text{Y}$  در مقابل نسبت  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  (Winchester and Floyd, 1977). (c) نمودار طبقه‌بندی نورماتیو آلبیت-ارتوز-آنورتیت (Barker, 1979). محدوده سنگ‌های آتشفشانی فلسیک ریفت شرق آفریقا (Ayalew et al., 2019)، ریولیت‌های ایالت بیسین و رشته کوه‌های آمریکای شمالی (Camp et al., 2003) و ریولیت‌های علمدار در شمال غرب ایران (after Moayyed and Hajialioghli, 2018) برای مقایسه نشان داده شده‌اند.

Fig. 4. Classification and nomenclature diagrams of the felsic magmatic samples from the Rizu Formation in the Badiz district. a) Total alkali versus  $\text{SiO}_2$  diagram (LeBas et al., 1986). The alkaline-subalkaline dividing line of Irvine and Baragar (1971) is shown as well. b)  $\text{Nb}/\text{Y}$  versus  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  diagram (Winchester and Floyd., 1977). c) Normative Ab–An–Or classification diagram (Barker, 1979). The fields of felsic volcanics of the East African rift (Ayalew et al., 2019), rhyolites of the Basin and Rang province from the North America (Camp et al., 2003) and Alamdar rhyolites of NW Iran (Moayyed and Hajialioghli, 2018) are shown for comparison.

سنگ‌های آتشفشانی سازند ریزو عمدتاً از نوع ریولیت آلکالن (پانتلریت-کومندیت) هستند (شکل ۴-ب) و با محدوده ترکیبی سنگ‌های آتشفشانی فلسیک ریفت شرق آفریقا مطابقت نشان می‌دهند. سنگ‌های ماگمایی فلسیک با استفاده از نمودار مقادیر نورماتیو Ab-An-Or (Barker, 1979) نیز نام‌گذاری می‌شوند. بر اساس این نمودار، نمونه‌های ریولیتی و تراکیتی سازند ریزو عمدتاً از نوع گرانیت و سه نمونه در محدوده ترونجمیت هستند (شکل ۴-ج).

مطابق منحنی متمایز کننده سری آلکالن از ساب آلکالن (Irvine and Baragare, 1971)، بیشتر نمونه‌ها از نوع آلکالن هستند. نظر به ماهیت کم و بیش دگرسان شده نمونه‌ها و تحرک‌پذیری اکسیدهای سیلیس و آلکالن در طی دگرسانی، به‌منظور ارزیابی شیمی سنگ و نام‌گذاری آن، از نمودار دوتایی وینچستر و فلویید (Winchester and Floyd, 1977) نیز استفاده شده است. زیرا این نمودار، بر اساس عناصر نامتحرک نسبت به دگرسانی تعریف شده و بنابراین معیار معتبرتری را برای طبقه‌بندی سنگ‌های دگرسان شده فراهم می‌آورد. مطابق این نمودار،

جدول ۱- شیمی سنگ کل عناصر اصلی (درصد وزنی) و کمیاب (قسمت در میلیون) نمونه‌های آتشفشانی فلسیک سازند ریزو.

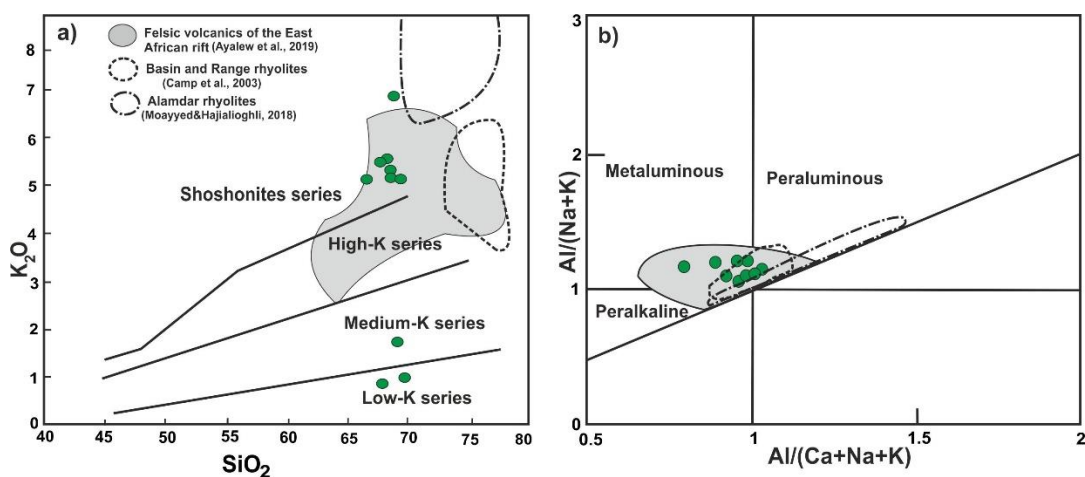
Table 1. Whole rock chemistry of Major (wt. %) and trace (ppm) elements for the felsic volcanic samples from the Rizu Formation.

Sample	Gr1	Gr2	Gr17	Gr20	Gr25	Gr26	Gr28	Gr44	Gr46	Gr54
Rock type	trachyte	rhyolite	trachyte	trachyte	rhyolite	rhyolite	rhyolite	rhyolite	rhyolite	rhyolite
SiO <sub>2</sub>	68.42	70.15	67.26	68.86	68.51	69.19	69.23	69.72	69.37	69.81
TiO <sub>2</sub>	<0.01	0.08	0.07	0.06	0.08	0.07	0.05	<0.01	0.07	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.73	15.39	15.39	15.07	15.65	15.72	15.23	15.23	15.34	15.21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>(t)</sup>	1.19	0.40	1.80	1.66	1.05	1.13	1.28	0.8	1.85	1.33
MnO	0.13	0.13	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
MgO	0.16	0.37	0.23	0.16	0.10	0.10	0.19	0.29	0.15	0.20
CaO	3.21	2.56	1.58	0.71	1.50	0.90	0.96	1.83	0.78	0.93
Na <sub>2</sub> O	7.09	7.04	4.37	4.71	5.10	5.43	4.78	6.55	3.68	5.03
K <sub>2</sub> O	0.85	0.92	5.13	5.54	5.53	5.18	5.32	1.67	6.92	5.14
LoI.	2.86	2.42	2.18	1.41	1.28	0.89	1.34	2.71	1.15	0.84
Sum	98.64	99.38	98.02	98.19	98.80	98.63	98.38	98.84	98.65	98.45
Mg#	12	47	13	9	9	8	13	77	11	13
<b>Trace element(ppm)</b>										
Sc	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
V	8	12	6	7	7	7	7	7	9	9
Cr	10	3	8	3	6	9	16	2	1	11
Co	1	1.50	1.20	1	1	1.30	1.40	1	1.50	1.20
Ni	8	10	7	5	8	8	14	8	5	9
Cu	1	28	1	5	9	5	9	2	2	4
Zn	13	9	21	77	34	71	21	13	25	34
Rb	33	38	186	249	209	229	207	82	316	203
Sr	25.50	37.10	28.60	22.70	24.50	23.70	30.90	26.50	21.90	47
Y	35.70	54.90	37.10	105	82.30	95.80	80.30	49.60	82.40	66.80
Zr	94	75	87	71	52	55	67	164	48	159
Nb	63.30	26.90	26	82.30	90.70	96.30	89.10	108	96.90	99.20
Mo	1.90	0.90	2.20	7.40	5.90	3.20	2.80	1.40	4.10	2.30
Cs	0.50	0.60	0.80	1.20	1	1	0.80	0.50	1.10	1.10
Ba	20	17	27	70	107	86	148	20	100	39
La	68	63	96	130	142	133	85	53	55	92

Ce	161	155	209	256	286	149	181	131	125	191
Pr	12.11	11.30	17.68	20.62	24	23	15.32	10.88	10.60	16.92
Nd	56.20	41	64.90	52.40	79.40	79.40	31.90	19.80	50	32
Sm	11.40	12	13.40	18	19.80	15.60	10.90	9.70	9.70	11.40
Eu	0.34	0.54	0.55	1.10	0.90	0.68	0.61	0.28	0.38	0.46
Gd	9.91	10.34	13.07	14.47	16.39	13.47	11.37	9.34	10.78	11.32
Tb	1.50	2.40	2.70	4.60	4.20	4.40	3.50	2.20	3.40	3.40
Dy	7.60	11.40	10.20	19.80	15.70	18.10	15.80	10.80	16.50	13.80
Er	4.30	6.10	4.50	10.10	8.90	8.30	8.10	5.70	8.50	7.10
Tm	0.40	0.50	0.60	10	0.90	0.80	0.80	0.60	0.90	0.80
Yb	3.98	4.21	2.92	7.63	5.92	5.57	6.17	4.45	6.58	5.37
Lu	0.80	0.80	0.50	1.20	10	0.80	0.90	0.70	0.90	0.70
Hf	3.40	2.60	3.20	2.30	1.90	2.10	2.10	5.10	1.80	4.30
Ta	1	0.50	0.60	4.20	1.30	2.60	2	3.50	2.60	2.50
Pb	1	1	17	11	8	15	10	3	2	1
Th	24.40	24.40	31.60	29.90	31.80	29.70	30.50	29.40	28.80	31
U	3.90	1.70	3.80	2.10	2.40	3.10	7.40	5.60	4.80	4.30

نمونه‌های آتشفشانی فلسیک سازند ریزو عمدتاً از نوع متاآلومین هستند و با محدوده ترکیبی سنگ‌های آتشفشانی فلسیک ریفت شرق آفریقا و ریولیت‌های ایالت بیسین و رشته کوه‌های غرب آمریکای شمالی در اروگان شباهت دارند (شکل ۵-b).

در نمودار  $K_2O$  در برابر  $SiO_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976)، سری ماگمایی نمونه‌های مورد مطالعه عمدتاً شوشونیتی است و با قلمرو سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی فلسیک ریفت شرق آفریقا هم‌پوشانی نشان می‌دهند (شکل ۵-a). با توجه به نمودار نسبت  $Al/(Na+K)$  در مقابل نسبت



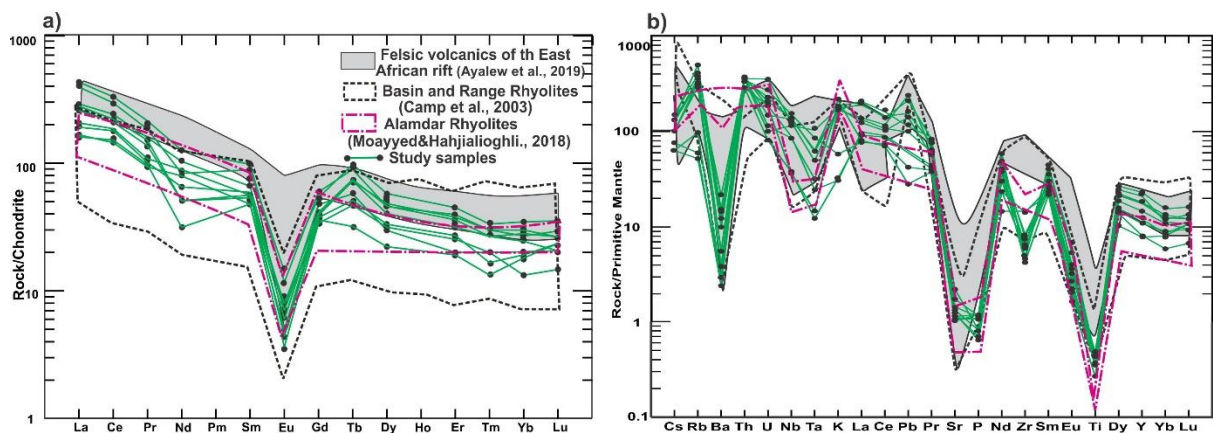
شکل ۵-a) نمودار  $K_2O$  در مقابل  $SiO_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976)، که بر اساس آن نمونه‌های آتشفشانی فلسیک سازند ریزو عمدتاً از نوع شوشونیتی هستند. (b) نمودار نسبت  $Al/(Na+K)$  در برابر نسبت  $Al/(Ca+Na+K)$  (Shand, 1943) که نشان می‌دهد نمونه‌های مورد مطالعه عمدتاً ماهیت متاآلومین دارند.

Fig. 5. a)  $K_2O$  versus  $SiO_2$  diagram (Peccerillo and Taylor 1976), showing shoshonite affinity of felsic volcanics of the Rizu Formation. b)  $A/NK$  versus  $A/CNK$  diagram (Shand, 1943) showing that the investigated samples have largely metaluminous nature.



تبلور تفریقی و یا باقی ماندن آن در فاز تفاله سنگ منشأ طی ذوب بخشی نسبت داده می‌شود (Rollinson, 1993). الگوی عناصر نادر خاکی سنگ-های آتشفشانی فلسیک سازند ریزو، هم‌پوشانی ترکیبی شایان ذکری با ریولیت‌های ایالت بیسین و رشته کوه‌های اروگان در غرب آمریکای شمالی و ریولیت‌های علمدار شمال غرب ایران نشان می‌دهد.

در نمودار الگوی عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت (Sun and McDonough, 1989) نمونه-های ریولیتی و تراکیتی بادیز، از عناصر نادر خاکی کمیاب سبک نسبت به عناصر خاکی کمیاب سنگین غنی‌شدگی نشان می‌دهند و بی‌هنجاری شاخص منفی Eu را دارا هستند (شکل ۶-ا). عناصر خاکی کمیاب سنگین الگوی نسبتاً مسطح دارند. بی-هنجاری منفی یوروپیم به جدایش پلاژیوکلاز حین



شکل ۶-ا) نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Sun and McDonough, 1989) برای نمونه‌های آتشفشانی فلسیک سازند ریزو. b) نمودار عنکبوتی چندعنصری بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) برای نمونه‌های آتشفشانی فلسیک سازند ریزو. محدوده سنگ‌های آتشفشانی فلسیک ریفت شرق آفریقا (Ayalew et al., 2019)، ریولیت‌های ایالت بیسین و رشته کوه‌های غرب آمریکای شمالی (Camp et al., 2003) و ریولیت‌های علمدار در شمال غرب ایران (Moayyed and Hajjialioghli, 2018) برای مقایسه نشان داده شده‌اند.

Fig. 6. Chondrite normalized REE spider diagram (Normalization values after Sun and McDonough, 1989) for felsic volcanic samples of the Rizu formation. b) Primitive mantle normalized multielement spider diagram (Normalization values after Sun and McDonough, 1989) for felsic volcanic samples of the Rizu formation. The fields of felsic volcanic of the East African rift (Ayalew et al., 2019), Basin and Rang rhyolites from the western North America (Camp et al., 2003) and Alamdar rhyolites in the NW Iran (Moayyed and Hajjialioghli, 2018) are shown for comparison.

الگوی نمونه‌های آتشفشانی فلسیک ریفت شرق آفریقا، ریولیت‌های ایالت بیسین و رشته کوه‌های اروگان در غرب آمریکای شمالی و ریولیت‌های علمدار شمال غرب ایران است.

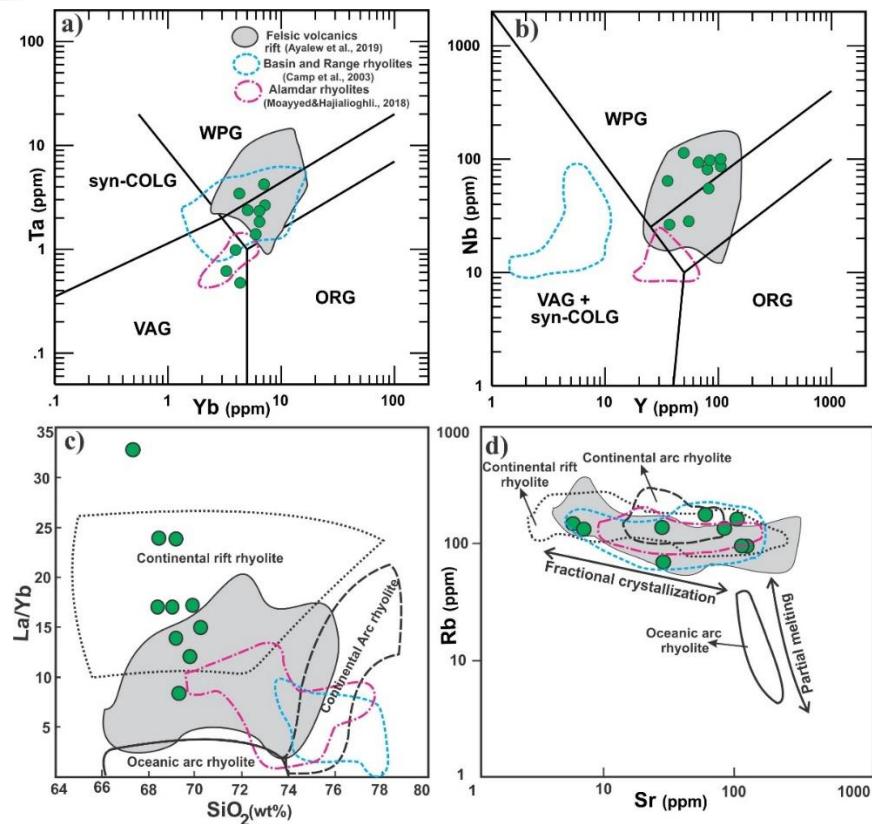
در نمودار عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، بی-هنجاری منفی Ba، Sr، P، Ti و Zr دیده می‌شود (شکل ۶-ب). الگوی نمودار عنکبوتی بهنجار شده با گوشته اولیه نمونه‌های ریولیتی و تراکیتی بادیز شبیه



ایالت بیسین و رشته کوه‌های اروگان و شمال غرب ایران نشان نمی‌دهند. بر اساس نمودار دوتایی Sr-Rb (Ayalew and Ishiwatari, 2011)، نمونه‌های آتشفشانی فلسیک سازند ریزو بیشتر با جایگاه ریفت قاره‌ای مطابقت دارند و مشابه ریولیت‌های ریفت شرق آفریقا، ایالت بیسین و رشته کوه‌های اروگان و شمال غرب ایران هستند (شکل ۷-d). در این نمودار روند فرایندهای تبلور تفریقی و ذوب بخشی نیز نشان داده شده است. روند ترکیبی نمونه‌های فلسیک مورد مطالعه، بیانگر نقش تبلور تفریقی در پیدایش آنهاست. مطابق نمودارهای دوتایی  $Zr+Ce+Y+Nb$  در مقابل نسبت  $(Na_2O+K_2O)/CaO$  (شکل ۸-a) و  $Zr+Ce+Y+Nb$  در مقابل نسبت  $FeO/MgO$  (شکل ۸-b) که متمایزکننده گرانیتهای نوع A از نوع S و I (Whalen et al., 1987) هستند، نمونه‌های آتشفشانی فلسیک سازند ریزو عمدتاً از نوع غیرکوهزائی می‌باشند. نبود کانی‌های دگرگونی سرشار از آلومینیم نظیر گارنت و کردیریت و سرشت ژئوشیمیایی مت‌آلومین، با منشأ غیررسوبی این نمونه‌ها مطابقت دارد. در نمودارهای دوتایی (Frost et al., 2001)، نمونه‌های ریولیتی و تراکیتی سازند ریزو در منطقه بادیز عمدتاً در محدوده آلکالن و آهنی واقعند و با محدوده گرانیتهای غیرکوهزائی (Vander Auwera et al., 2003) هم‌پوشانی نشان می‌دهند (شکل ۹).

بی‌هنجاری منفی Ba و Sr حاکی از تبلور تفریقی فلدسپارهاست (Blundy and Wood, 2003) در حالی که بی‌هنجاری منفی P و Ti نشان دهنده تفریق آپاتیت (Picoli and Candela, 2002; Ding et al., 2015) و اکسید تیتانیم (Xiong et al., 2011) است. غنی‌شدگی از عناصر Nb, Ti, Rb, Th, U, K و تهی‌شدگی از عناصر Ta, Sr, P, Ta به ژنز مرتبط با مناطق فرورانشی (Wilson, 1989; Klemme et al., 2005; Guice et al., 2018) و یا آغشتگی با مواد پوسته‌ای (Wang et al., 2015) نسبت داده می‌شود.

در نمودارهای متمایز کننده جایگاه تکتونیکی (Pearce et al., 1984) نمونه‌های ریولیتی و تراکیتی مورد مطالعه عمدتاً در قلمرو WPG یا درون صفحه‌ای قرار دارند و با محدوده ترکیبی سنگ‌های آتشفشانی فلسیک ریفت شرق آفریقا و ریولیت‌های ایالت بیسین و رشته کوه‌های غرب آمریکای شمالی در اروگان مشابهت نشان می‌دهند (شکل ۷-a,b). مطابق نمودار متمایزکننده ریولیت‌های ریفت قاره‌ای از قوس ماگمایی (Ayalew and Ishiwatari, 2011)، نمونه‌های ریولیتی و تراکیتی سازند ریزو، با دارا بودن نسبت بالای La/Yb، در جایگاه ریفت قاره‌ای واقعند (شکل ۷-c). بر خلاف دو نمودار پیشین، نمونه‌های مورد مطالعه همپوشانی ترکیبی چندانی با نمونه‌های آتشفشانی فلسیک و ریولیت‌های ریفت شرق آفریقا،



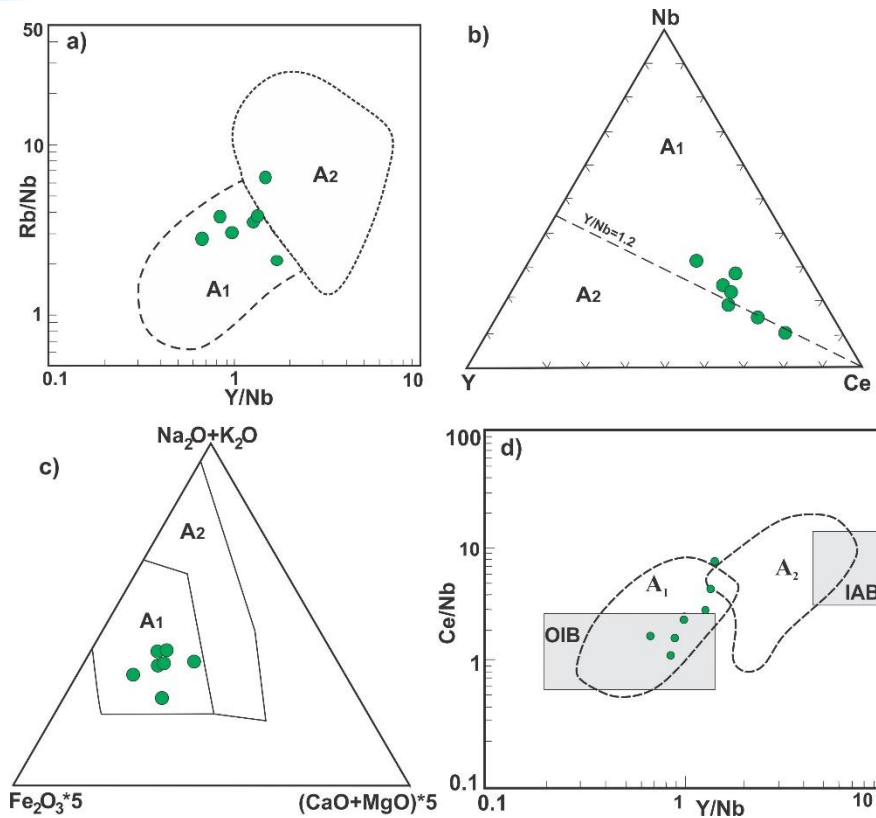
شکل ۷- نمودارهای متمایزکننده جایگاه تکتونیکی. (a) نمودار Ta در مقابل Yb (Pearce et al., 1984). (b) نمودار Nb در مقابل Y (Pearce et al., 1984). (c) نمودار نسبت La/Yb در مقابل SiO<sub>2</sub> (Ayalew and Ishiwatari, 2011). (d) نمودار نسبت Sr در مقابل Rb (Ayalew and Ishiwatari, 2011). ORG: گرانیت‌های پشته میان اقیانوسی. WPG: گرانیت‌های درون صفحه‌ای. VAG: گرانیت‌های قوس آتشفشانی. syn-COLG: گرانیت‌های همزمان با برخورد.

Fig. 8. Tectonic discrimination diagrams. a) Ta versus Yb diagram (Pearce et al., 1984). b) Nb versus Y diagram (Pearce et al., 1984). c) La/Yb ratio versus SiO<sub>2</sub> diagram (Ayalew and Ishiwatari, 2011). d) Sr versus Rb diagram (Ayalew and Ishiwatari, 2011). ORG: mid-ocean ridges granites, WPG: within plate granites, VAG: volcanic arc granites, Syn-COLG: syn-collision granites.

از نوع A<sub>1</sub> هستند (شکل ۱۰- a,b,d). گربنیکوف (Grebennikov, 2014)، به کمک ترکیب عناصر اصلی نمودار سه تایی Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\*5-Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O- (CaO+MgO)\*5 را برای رده‌بندی گرانیت‌های غیرکوهزائی معرفی کرده است. مطابق این نمودار نیز، نمونه‌های غیرکوهزائی مورد مطالعه از نوع A<sub>1</sub> هستند (شکل ۱۰- c).

ایی (Eby, 1992) گرانیت‌های غیرکوهزائی را به دو زیرگروه A<sub>1</sub> و A<sub>2</sub> متمایز کرده است که از نظر جایگاه زمین‌ساختی و ساز و کار تشکیل متفاوت هستند. در هفت نمونه مورد مطالعه که مطابق شکل-های شکل ۷- a و ۸، ویژگی‌های داخل صفحه‌ای محرز می‌دهند اقدام به رده‌بندی آنها شده است. مطابق نمودارهای متمایز کننده (Eby, 1992)، نمونه‌های ریولیت و تراکیت غیرکوهزائی سازند ریزو





شکل ۱۰- نمودار متمایزکننده گرانیت‌های A1 و A2. (a) نمودار نسبت Rb/Nb در برابر نسبت Y/Nb (Eby, 1992). (b) نمودار سه تایی Y-Nb-Ce (Eby, 1992). (c) نمودار سه تایی  $(CaO+MgO)*5 - (Na_2O+K_2O) - Fe_2O_3*5$  (Grebennikov, 2014). (d) نمودار نسبت Ce/Nb در برابر نسبت Y/Nb (Eby, 1992).

Fig. 10. Discriminating diagrams of A1 and A2 -type granites. a) Rb/Nb ratio versus Y/Nb ratio diagram (Eby, 1992). b) Y-Nb-Ce ternary diagram (Eby, 1992). c)  $Fe_2O_3*5 - (Na_2O+K_2O) - (CaO+MgO)*5$  ternary diagram (Grebennikov, 2014). d) Ce/Nb ratio versus Y/Nb ratio diagram (Eby, 1992).

### پتروژنز و خاستگاه زمین‌ساختی

گرانیت غیر کوهزائی (A) شامل مذاب‌های اسیدی کمی آلکالن تا پرآلکالن و متآلومین تا نیمه پرآلومین هستند (King et al., 1997; Rajesh, 1999; Jahn et al., 2009). این گرانیت‌ها دارای مقادیر بالای  $Na_2O+K_2O$ ،  $FeO/MgO$  و HFSE بالا و مقادیر کم Al، CaO و Eu هستند (Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987; Eby, 1992; Frost, 1997; Bonin, 2007). ماگماتیسم فلسیک سازند ریزو در

منطقه بادیز دارای چنین ویژگی‌های ژئوشیمیایی است.

مدل‌های پتروژنتیکی رایج که برای تشکیل گرانیت نوع A پیشنهاد شده عبارتند از: (۱) تبلور بخشی بازالت‌های آلکالن مشتق از گوشته همراه با آلاینش پوسته‌ای یا بدون آن (Eby, 1992; Bonin, 2007; Shellnutt et al., 2009; Weissman et al., 2013; Dostal and Shellnutt, 2015; Huchison et al., 2018). (۲) ذوب درجه پایین سنگ‌های گوشته یا پوسته در دماهای بالا (Whalen et al., 1987; )

مذاب از عناصر آلکالن، سیلیس و تهی‌شدگی از یوروپیوم می‌شود (Blundy and Wood, 2003).

ویژگی‌های ژئوشیمیایی ماگماتیسم فلسیک سازند ریزو معرف مذاب تفریق یافته جایگاه غیرکوهزائی هستند که با انواع موجود در ایالت‌های ماگمایی دو گانه نظیر ریفت شرق آفریقا و تا اندازه‌ای ایالت بیسین و رشته کوه‌های باختر آمریکای شمالی مشابهت نشان می‌دهند. ایالات‌های ماگمایی دو گانه ریفت قاره‌ای با ماگماتیسم فلسیک دارای قرابت غیرکوهزائی همانند منطقه بادیز، عمدتاً متآلومین تا کمی پرآلکالن هستند و می‌توان در نتیجه تفریق پیشرفته بازالت، شاهد تشکیل ریولیت‌های آلکالن نظیر پانتلریت و کومندیت نیز بود (Eby, 1990; Frost et al., 2001).

هم‌زیستی مکانی نزدیک سنگ‌های آتشفشانی فلسیک سازند ریزو در منطقه بادیز و مناطق هم‌جوار (جلال آباد) با ماگماتیسم مافیک نیز، جایگاه ریفت قاره‌ای و نقش تبلور بخشی را برای تحولات ماگمایی در ذهن متبادر می‌سازد. در این رابطه، به عقیده وصالی و همکاران (Vesali et al., 2018)، ماگماتیسم مافیک (میکروگابرو و دلریت) سازند ریزو در منطقه جلال‌آباد (شمال‌باختری زرنند) دارای ویژگی‌های ژئوشیمیایی مشابه بازالت‌های آلکالن با سرشت غنی شده نوع OIB هستند که در جایگاه ریفت قاره‌ای تشکیل شده‌اند. سپیدبر و همکاران (Sepidbar et al., 2020) نیز خاطرنشان کرده‌اند که ماگماتیسم فلسیک آلکالن سازند ریزو از نوع غیر کوهزائی زیرگروه A<sub>1</sub> بوده که از تفریق ماگمای مافیک نشأت

Landenberger and Collins, 1996; King et al., 1997; Wang et al., 2018; Ji et al., 2023) اختلاف ماگماهای گوشته و پوسته (Griffin et al., 2002; Wu et al., 2002; Kemp et al., 2005) بر اساس نمودارهای متمایزکننده گرانیتهای غیرکوهزائی، ریولیت و تراکیت‌های غیرکوهزائی سازند ریزو از نوع A<sub>1</sub> رده‌بندی شده‌اند. این نوع گرانیتهای، با دارا بودن نسبت Y/Nb کمتر ( $> 1/2$ )، معمولاً از تفریق ماگماهای آلکالن مافیک مشتق شده از سنگ منشأ گوشته‌ای عمیق (OIB) در محیط درون صفحه‌ای یا ریفت قاره‌ای منشأ می‌گیرند (Shellnutt and Zhou, 2007; Frost and Frost, 2011). اما، نوع A<sub>2</sub> نسبت Y/Nb بالاتری دارد ( $< 1/2$ )، که معمولاً با محیط پس از برخورد یا پس از کوهزایی همراه است و عمدتاً از ذوب مواد پوسته‌ای به وجود می‌آیند (Eby, 1992; Martin, 2006; Shao et al., 2015).

تکامل ماگمای مافیک جایگاه ریفت توسط تفریق پلی باریک کنترل می‌شود (Hole, 2018). این فرایند با کاهش شدید MgO، CaO و TiO<sub>2</sub> همراه است که با تفریق کانی‌های حاوی منیزیم، کلسیم و تیتانیم مانند الیوین، پیروکسن، فلدسپارها و اکسیدهای تیتانیم مطابقت دارد. تفریق ماگمای گوشته‌ای و زایش ماگمای گرانیتهی نوع A<sub>1</sub> معمولاً در فشار کم نزدیک به مرزهای میانی پوسته بالایی رخ می‌دهد (Siegel et al., 2018). در این شرایط، به دلیل تفریق الیوین و اکسید تیتانیم، مذاب از سیلیس غنی می‌شود، در حالی که تفریق پلاژیوکلاز سبب غنی شدن



و عقب‌گرد آن، پیدایش قوس قاره‌ای متشکل از توده-های نفوذی نئوپروتروزوئیک پسین ایران و ریفتینگ پشت قوس با ماگماتیسم دوگانه ریولیت-تراکیت و میکروگابرو در توالی‌های رسوبی سازند ریزو در نئوپروتروزوئیک پسین-کامبرین را در پی داشته است. ریفتینگ و نازک‌شدگی جایگاه پشت قوس قاره-ای، ناشی از عقب‌گرد ورقه اقیانوسی فرورو در پهنه فرورانش است. رخداد کشش و نازک‌شدگی منجر به بالآمدگی گوشته لیتوسفری زیر قاره‌ای و آستونسفر زیرین می‌شود. ذوب با نرخ کم چنین منابع گوشته‌ای غنی‌شده، تشکیل ماگمای با شاخصه‌های ژئوشیمیایی مشابه OIB را در پی دارد. مذاب‌های فلسیک نوع A<sub>1</sub> نظیر انواع موجود در سازند ریزو، می‌تواند از تفریق پیشرفته ماگمای غنی شده مافیک آلکالن هم‌جوار، حاصل شده باشد. با وجود این، نقش فرایندهای ذوب بخشی، هضم و اختلاط ماگمایی را نیز نمی‌توان در روند تحولی ماگماتیسم سازند ریزو نادیده گرفت به-طوری که فهم جامع سهم مشارکت سازنده‌های پوسته‌ای و گوشته‌ای در پیدایش ماگماتیسم مورد مطالعه، مستلزم در اختیار داشتن داده‌های ایزوتوپی و شاخصه‌های ژئوشیمیایی بیشتر از نمونه‌های آذرین فلسیک و مافیک در شمال باختری زرنند است.

### نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات صحرائی، میکروسکوپی و ژئوشیمیایی در رابطه با ریولیت-تراکیت‌های سازند ریزو در محدوده بادیز، نتایج زیر حاصل شده است:

گرفته از سنگ منشأ عمیق گوشته‌ای نوع OIB در طی رخداد ریفت‌زایی تشکیل شده‌اند. به عقیده این محققین، ماگماتیسم فلسیک و مافیک سازند ریزو در شمال زرنند با سرشت آلکالن و ماهیت غنی‌شده نوع OIB، معرف ماگماتیسم دوگانه ریفت قاره‌ای حاکم در جایگاه پشت قوس ناشی از فرورانش پروتوتتیس در طی دوره زمانی نئوپروتروزوئیک پسین-کامبرین هستند.

بعد از تشکیل سرزمین‌های پیرامون ابرقاره گندوانا از جمله ایران، این سرزمین‌ها در نئوپروتروزوئیک بالایی تا کامبرین جایگاه قوس قاره-ای را دارا بوده و با وفور ماگماتیسم گرانیتوئیدی کالک‌آلکالن منتج از فرورانش حوضه اقیانوسی پروتوتتیس به زیر پی‌سنگ جوان نئوپروتروزوئیک مشخص می‌شوند (Keppie et al., 1985; Nance et al., 1991; Von and Raummre., 2002; Hassanzade et al., 2008; Jamshidi Badr et al., 2013; Rossetii et al., 2014; Shafaeii Moghadam et al., 2015; Honarmand et al., 2016). رخساره‌های رسوبی سازنده‌های کهر، سلطانیه، ریزو، دزو، باروت، زایگون و لالون نیز بیانگر حاکم بودن حوضه دریایی کم عمق پشت قوس ناشی از فرورانش پروتوتتیس به زیر ایران در بازه زمانی نئوپروتروزوئیک پسین-کامبرین است (Alavi, 1996; Jafari et al., 2007; Horton et al., 2008).

بنابراین مشابه با رویداد فرورانش نئوتتیس که منجر به پیدایش قوس قاره‌ای ارومیه-دختر و حوضه پشت قوس البرز در سنوزوئیک گردید، فرورانش پروتوتتیس

پشت قوس در حال فرونشست بوده که در نتیجه فرورانش پروتوتتیس به زیر قوس کادومین ایران در نئوپروتروزوئیک پسین-کامبرین ایجاد شده است.

### قدردانی

از شرکت آهنگ تجارت نیکو، که امکانات صحرائی و هزینه انجام آنالیز شیمیایی را برای پیشبرد این تحقیق فراهم نموده‌اند، از داوران محترم مجله علوم زمین خوارزمی و همچنین دکتر مرتضی دلاوری‌کوشان سردبیر محترم مجله، که با ارائه پیشنهادات سازنده، سبب ارتقاء کیفیت علمی مقاله شده‌اند، قدردانی می‌شود.

الف) شواهد بافتی ماگماتیسیم فلسیک منطقه بادیز همچون بافت آمیگدالی، ریزبلور بودن و نبود کانی‌های آبدار موسکویت و بیوتیت با جایگزینی سطحی آنها هم‌خوانی دارد.

ب) با توجه به شواهد ژئوشیمیایی و بر اساس نمودارهای متمایزکننده جایگاه تکتونیکی، ریولیت و تراکیت‌های سازند ریزو در منطقه بادیز از نوع ماگماتیسیم غیرکوهزائی زیرگروه A<sub>1</sub> بوده که در جایگاه ریفت قاره‌ای از تفریق ماگمای مافیک غنی شده نوع OIB تشکیل شده‌اند.

پ) هم‌زیستی مکانی نزدیک ریولیت و تراکیت-های سازند ریزو در منطقه بادیز با میکروگابرو، احتمالاً معرف ماگماتیسیم حاکم در یک حوضه ریفتی

### References

- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin 103, 983-992
- Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic Synthesis and Structural Style of the Alborz Mountain System in Iran. Journal of Geodynamics 21, 1-33.
- Ayalew, D., and Ishiwatri, A., 2011. Comparison of rhyolites from continental rift, continental arc and oceanic island arc: Implication for the mechanism of silicic magma generation. Island Arc 20, 78-93.
- Ayalew, D., Pik, R., Bellahsen, N., France, L., Yirgu, G., 2019. Differential fractionation of rhyolites during the course of crustal extension, Western Afar (Ethiopian rift). Geochemistry, Geophysics, Geosystems 20, 571-593.
- Bagheri, S., and Stampfli, G.M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complex Tectonophysics 451, 123-155.
- Barker, F., 1979. Trondhjemite: definition, environment and hypotheses of origin. In: Barker, F. (Ed.), Trondhjemites, Dacites and Related Rocks. Elsevier Amsterdam, pp. 1-12.
- Berberian, M., and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Contributions to Journal of Earth Science 18(11), 210-265.
- Blundy, J., Wood, B., 2003. Partitioning of trace elements between crystals and melts. Earth and Planetary Science Letters 210, 383-397.
- Bonin, B., 2007. A-type granites and related rocks; evolution of a concept, problems and prospects. Lithos 97, 1-29.
- Camp, V.E., Ross, M.E., Hanson, W.E., 2003. Genesis of flood basalts and Basin and Range volcanic rocks from Steens Mountain to the Malheur River Gorge, Oregon. Geological Society of American Bulletin 115 (1), 105-128.

- Collins, C.M., Beams, S.D., White, A.J.R., Chappell, B.W., 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 80, 189-200.
- Ding, T., Ma, D., Lu, J., Zhang, R., 2015. Apatite in granitoids related to polymetallic mineral deposits in southeastern Hunan Province, Shi-Hang zone, China: Implications for petrogenesis and metallogenesis. *Ore Geology Reviews* 69, 104-117.
- Dostal, J., Shellnutt, J.G., 2015. Origin of peralkaline granites of the Jurassic Bokan Mountain complex (southeastern Alaska) hosting rare metal mineralization. *International Geology Review* 58(1), 1-13.
- Eby, G.N., 1990. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos* 26, 115-134.
- Eby, G.N., 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology* 20(7), 641-644.
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J., Frost, C.D., 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology* 42(11), 2033-2048.
- Frost, C.D., Frost, B.R., 1997. Reduced rapakivi-type granites: The tholeiite connection. *Geology* 25: 647-650.
- Frost, C.D., Frost, B.R., 2011. On ferroan (A-type) granitoids: Their compositional variability and modes of origin. *Journal of Petrology* 52, 39-55.
- Grebennikov, A.V., 2014. A-type granites and related rocks: petrogenesis and classification. *Russian Geology and Geophysics* 55, 1074-1086.
- Griffin, W.L., Wang, X., Jackson, S.E., Pearson, N.J., O'Reilly, S.Y., Xu, X., Zhou, X., 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes of Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos* 61, 237-269.
- Guice, G.L., McDonald, I., Hughes, H.S.R., Schlatter, D.M., Goodenough, K.M., MacDonald, J.M., Faithfull, J.W., 2018. Assessing the Validity of Negative High Field Strength-Element Anomalies as a Proxy for Archaean Subduction: Evidence from the Ben Strome Complex, NW Scotland. *Geosciences* 8, 338.
- Hassanzadeh, J., Stockli, D.F., Horton, B.K., Axen, G.J., Stockli, L.D., Grove, M., Schmitt, A., Walker, J.D., 2008. U-Pb zircon geochronology of upper Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for paleogeography, metallogeny, and exhumation history of Iranian basement. *Tectonophysics* 451, 71-96.
- Hole, M.J., 2018. Mineralogical and geochemical evidence for polybaric fractional crystallization of continental flood basalts and implications for identification of peridotite and pyroxenite source lithologies. *Earth-Science Reviews* 176, 51-67.
- Honarmand, M., Li, X.H., Nabatian, Gh., Rezaeian, M., Etemad-Saeed, N., 2016. Neoproterozoic-early Cambrian tectono-magmatic evolution of the central Iranian terrane, northern margin of Gondwana: constraints from detrital zircon U-Pb and Hf-O isotope studies. *Island Arc* 25, 137-153.
- Horton, B.K., Hassanzadeh, J., Stockli, D.F., Axen, G.J., Gillis, R.J., Guest, B., Amini, A.H., Fakhari, M., Zamanzadeh, S.M., Grove, M., 2008. Detrital zircon provenance of Neoproterozoic to Cenozoic deposits in Iran: Implications for chronostratigraphy and collisional tectonics. *Tectonophysics* 451, 97-122.
- Hutchison, W., Mather, T.M., Pyle, D.M., Boyce, A.J., Gleeson, M.L.M., Yirgu, G., Blundy, J.D., et al., 2018. The evolution of magma during continental rifting: New constraints from the isotopic and trace element signatures of silicic magmas from Ethiopian volcanoes. *Earth and Planetary Science Letters* 489: 203-218.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8, 523-548.
- Jafari, S.M., Shemirani, A., Hamdi, B., 2007. Microstratigraphy of the Late Ediacaran to the Ordovician in NW Iran (Takab area). In: Vickers-Rich, P., Komarower, P. (Eds.). *The Rise and Fall of the Ediacaran Biota*. Geological Society, Special Publications, London 286, 433-438.
- Jahn, B.M., Litvinovsky, B.A., Zanzvilevich, A.N., Reichow, M., 2009. Peralkaline granitoids magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt: Evolution, petrogenesis and tectonic significance. *Lithos* 113, 521-539.
- Jamshidi Badr, M., Collins, A.S., Masoudi, F., Cox, G., Mohajjel, M., 2013. The U-Pb age, geochemistry and tectonic significance of granitoids in the Soursat Complex, Northwest Iran. *Turkish Journal of Earth*

- Sciences 22, 1-31.
- Ji, S., Li, Z., Pei, X., Pei, L., Li, R., Liu, C., Chen, Y., Lin, H., Wang, M., 2023. Petrogenesis and Tectonic Significance of Late Triassic A<sub>1</sub>-Type Granite from the West Section of North Qinling Orogenic Belt: Constraints from Geochronology and Geochemistry. *Minerals* 13, 557.
- Kemp, A.I.S., Wormald, R.J., Whitehouse, M.J., Price, R.C., 2005. Hf isotopes in zircon reveal contrasting sources and crystallization histories for alkaline to peralkaline granites of Temora, southeastern Australia. *Geology* 33:797–800.
- Keppie, J.D., 1985. The Appalachian Collage, in Gee, D.G., and Sturt, B., eds., *The Caledonide orogen, Scandinavia, and related areas*: New York, NY, John Wiley and Sons, 1217–1226.
- King, P.L., White, A.J.R., Chappell, B.W., Allen, C.M., 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachland fold belt, southeastern Australian. *Journal of Petrology* 38: 371–391.
- Klemme, S.; Prowatke, S.; Hametner, K.; Gunther, D., 2005. Partitioning of trace elements between rutile and silicate melts: Implications for subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 2361–2371.
- Landenberger, B., Collins, W.J., 1996. Derivation of A-type Granites from a Dehydrated Charnockitic Lower Crust: Evidence from the Chaelundi Complex, Eastern Australia. *Journal of Petrology* 37, 145–170.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanetti, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27, 745-750.
- Lu, S.Y., Ren, Y.S., Hou, H.N., Li, J.M., Hao, Y.J., Shang, Q.Q., 2022. Petrogenesis, tectonic setting, and metallogenic significance of the Middle Permian volcanic rock system of the Miaoling Formation, Yanbian area, NE China: Constraints from geochronology, geochemistry, and Sr–Nd–Hf isotopes. *Geochemistry* 82, 125902.
- Martin, R.F., 2006. A-type granites of crustal origin ultimately result from open-system fenitization-type reactions in an extensional environment. *Lithos* 91, 125–135.
- Medlin, C.C., Jowitt, S.M., Cas, R.A.F., Howard, H.M., Wingate, M.T.D., 2014. Petrogenesis of the A-type, Mesoproterozoic intra-caldera rheomorphic Kathleen ignimbrite and comagmatic Rowland suite intrusions, west Musgrave province, central Australia: Products of extreme fractional crystallization in a failed rift setting. *Journal of Petrology* 56, 493-525.
- Miller, J.A., and Harris, C., 2007. Petrogenesis of the Swaziland and northern Natal rhyolites of the Lebombo marginal graben, south east Africa. *Journal of Petrology* 48, 185-218.
- Moayyed, M., Hajialioghli, R., 2018. Geochemistry and petrogenesis of Alamdar rhyolites from East of Tasouj town (NW Iran). *Petrological Journal* 9(34), 21-38.
- Nance, R.D., Murphy, J.B., Strachan, R.A., D’Lemos, R.S., and Taylor, G.K., 1991. Late Proterozoic tectonostratigraphic evolution of the Avalonian and Cadomian terranes. *Precambrian Research* 53, 41–78.
- Pearce, J.A., Harris, N., Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25, 956–983.
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 58(1), 63–98.
- Piccoli, P.M., and Candela, P.A., 2002. Apatite in igneous systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 48: 255–292.
- Rajesh, H.M., 1999. Characteristics and Origin of Aluminous A-type Granitoids from Southwestern India. *Gondwana Research* 2, 604–606.
- Riley, T.R., Leat, P.T., Pankhurst, R.J., and Harris, C., 2001. Origins of large volume rhyolitic volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by crustal melting. *Journal of Petrology* 42, 1403-1065.
- Rollinson, H.R., 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, New York, 352 pp.
- Rossetti, L., Lima, E.F., Waichel, B.L., Scherer, C.M., Barreto, C.J., 2014. Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres Syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province. *J. S. Am. Earth Sci.* 56,

- 409–421.
- Sepidbar, F., Moghadama, H.S., Li, C., Stern, R.J., Jiantang, P., Vesali, Y., 2020. Cadomian Magmatic Rocks from Zarand (SE Iran) Formed in a Retro-Arc Basin. *Lithos* 366–367, 105569.
- Shafaii Moghadam, H., Khademi, M., Hu, Z., Stern, R.J., Santos, J.F., Wu, Y., 2015. Cadomian (Ediacaran–Cambrian) arc magmatism in the ChahJam–Biarjmand metamorphic complex (Iran): Magmatism along the northern active margin of Gondwana. *Gondwana Research* 27, 439–452.
- Shand, S.J., 1943. Eruptive rocks. Their genesis, composition, classification, and their relation to ore-deposits with a chapter on meteorite. New York, John Wiley and Sons, 488pp.
- Shao, F.L., Niu, Y.L., Regelous, M., Zhu, D.C., 2015. Petrogenesis of peralkaline rhyolites in an intra-plate setting: Glass House Mountains, southeast Queensland, Australia. *Lithos* 216, 196–210.
- Shellnutt, J.G. and Zhou, M.-F. 2007. Permian peralkaline, peraluminous and metaluminous A-type granites in the Panxi district, SW China: Their relationship to the Emeishan mantle plume. *Chemical Geology* 243, 286–316.
- Shellnutt, J.G., Wang, C.Y., Zhou, M.F., Yang, Y., 2009. Zircon Lu–Hf isotopic compositions of metaluminous and peralkaline A-type granitic plutons of the Emeishan large igneous province (SW China): Constraints on the mantle source. *Journal of Asian Earth Sciences* 35, 45–55.
- Siegel, K., Vasyukova, O.V., Williams-Jones, A.E., 2018. Magmatic evolution and controls on rare metal-enrichment of the Strange Lake A-type peralkaline granitic pluton, Québec-Labrador. *Lithos* 308–309, 34–52.
- Stöcklin, J., 1961. Lagunäre Formationen und Salzdom in Ostiran. *Eclogae Geologicae Helveticae* 54, 1–27.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders A.D, Norry M.J., (eds) *Magmatism in the Ocean Basins* 42. Geological Society, Special Publications, London, pp 313–345.
- Takanashi, K., Shuto, K., 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: 368–392.
- Ulmer, P., Kaegi, R., Muntener, O., 2018. Experimentally derived intermediate to silica-rich Arc Magmas by fractional and equilibrium crystallization at 1 GPa: An evaluation of phase relationships, compositions, liquid lines of descent and oxygen fugacity. *Journal of Petrology* 59(1), 11–58.
- Vahdati Daneshmand, F., 1996. Davaran Map 1/100000", Sheet 7251, Organization of Geology and Mineral Exploration.
- Vander Auwera, J., Bogaerts, M., Liégeois, J.P., Demaiffe, D., Walmart, E., Bolle, O., Duchesne, J.C., 2003. Derivation of the 1.0–0.9 Ga ferro-potassic A-type granitoids of southern Norway by extreme differentiation from basic magmas. *Precambrian Research* 124, 107–148.
- Vesali, Y., Esmaili, D., Sepidbar, F., Shibi, M., Niromand, Sh., 2018. Petrology, geochemistry and geostructural origin of alkaline rocks in Jalal-Abad region of Zarand. (Kerman Province) Signs of Paleotethys Coffin Formation in Central Iran. *Petrology* 1, 1–20 (in Persian).
- Von Raumer, J.F., Stampfli, G.M., Borel, G., Bussy, F., 2002. Organization of pre-Variscan basement areas at the north-Gondwanan margin: *International Journal of Earth Sciences* 91, 35–52.
- Wang, L.X., Ma, C.Q., Zhang, C., Zhu, Y.X., Marks, A.W.M., 2018. Halogen geochemistry of I- and A-type granites from Jiuhuashan region (South China): Insights into the elevated fluorine in A-type granite. *Chemical Geology* 478, 164–182.
- Wang, X.S., Gao, J., Klemd, R., Jiang, T., Zhai, Q.G., Xiao, X.C., Liang, X.Q., 2015. Early Neoproterozoic multiple arc–back-arc system formation during subduction–accretion processes between the Yangtze and Cathaysia blocks: New constraints from the supra-subduction zone NE Jiangxi ophiolite: South China. *Lithos* 236, 90–105.
- Weissman, A., Kessel, R., Navon, O., Stein, M., 2013. The petrogenesis of calc-alkaline granites from the Elat



- massif, Northern Arabian-Nubian shield. *Precambrian Research* 236, 252–264.
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-type granites; geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 95(4), 407–419.
- Wilson, A.F., 1989. Geological report on granites in West Africa; proceedings of the symposium on the granites of West Africa. 123–147.
- Winchester, J., and Floyd, P., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20, 325–343.
- Wu, F.Y, Sun, D.Y., Li, H.M., Jahn, B.M., Wilde, S., 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology* 234, 105–126.
- Xiong X., Keppler H., Audetat A., Ni H., Sun W., Li Y., 2011. Partitioning of Nb and Ta between rutile and felsic melt and the fractionation of Nb/Ta during partial melting of hydrous metabasalt. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 1673–1692.
- Yan, D., Chu, Z., Liu, Z., Wang, W., Xiong, F., 2023. Petrogenesis of Early Triassic Felsic Volcanic Rocks in the East Kunlun Orogen, Northern Tibet: Implications for the Paleo-Tethyan Tectonic and Crustal Evolution. *Minerals* 13, 607.
- Yan, H., Niu, Y.L., Li, J.Y., Lei, Y., Kong, J.J., Chen, S., Zhang, Y., Zhang, G.R., 2016. Petrogenesis and tectonic significance of the late Triassic mafic dikes and felsic volcanic rocks in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau. *Lithos* 245, 205–222.