



## Geology, petrography and geochemistry of Eocene lavas from the north of Yusuf-Khan-Kandi, north of Lahrud, Ardabil Province

Morteza Khalatbari Jafari<sup>1\*</sup>, Amir Shariari<sup>1</sup>, Mohammad Faridi<sup>2</sup>

1. Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

2. Geological Survey of Iran, Tabriz, Iran

### Article info

#### Article history

Received: 17 June 2023

Accepted: 01 September 2023

#### Keywords:

Basalt,  
picrobasalt,  
alkaline serie,  
shoshonite,  
Eocene,  
Lahrud,  
Ardabil.



### Abstract

The study area is located in the north of the Yusef -Kandi village, north of Lahrud, Ardabil Province (northwestern Iran). This area comprises portions of the Alborz-Azarbaijan structural zone, which together with the Little Caucasus and the highlands of southeastern Turkey have evolved due to the convergence of the Arabian and Eurasian plates during the Alpine-Himalayan orogeny. The study area includes outcrops of Eocene volcanic and volcano-sedimentary sequences which were deposited in marine to continental environments. The volcanic portion of these sequences consists of volcanoclastic rocks as well as lava flows. A few acidic volcanic rocks and ignimbrite are locally exposed in this area. The petrographic studies show that the Yusef-Khan-Kandi volcanic rocks include picrobasalt, basalt, tephrite, basanite, trachybasalt, basaltic trachyandesite, phenotephrite, tephrophenolite, trachyandesite and trachyte compositions. Phyrlic texture is common within the volcanic lavas. The majority of the samples show transitional to potassic trends, with only a few samples exhibiting sodic trends. The transitional trend observed in a significant number of the studied samples probably has resulted from the mingling of the sodic and potassic magmas. The Harker binary variation diagrams indicate trends that are consistent with fractional crystallization. The chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spider diagrams show high LREE/HREE ratios which could be explained by partial melting of an enriched mantle (including asthenospheric) or a metasomatized mantle in collisional to continental arc environments. Most of the studied volcanic rocks plot in the active continental arc or within plate domains. It seems that following the convergence between the Arabian and Eurasian plates in the Late Cretaceous, the northward subducting Neotethyan slab in the Eocene, triggered partial melting of the metasomatized subcontinental lithospheric mantle. Therefore, we suggest that the Yusef-Khan-Kandi Eocene volcanic rocks were erupted in a post-collision extensional environment.

### Introduction

The study area is located in the north of the Yusef -Kandi village, north of Lahrud, Ardabil Province (northwestern Iran). This area comprises portions of the Alborz-Azarbaijan

structural zone (Alavi, 1991; Babakhani and Khan Nazer, 1991), which together with the Little Caucasus and the highlands of southeastern Turkey, have evolved due to the

**DOI** <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.10393>

**\*Corresponding author:** Morteza Khalatbari Jafari; E-mail: [khalat1965@live.com](mailto:khalat1965@live.com)

**How to cite this article:** Khalatbari Jafari, M., Shariari, A., Faridi, M., 2023. Geology, petrography and geochemistry of Eocene lavas from the north of Yusuf-Khan-Kandi, north of Lahrud, Ardabil Province. Kharazmi Journal of Earth Sciences 9(1), 1-31. <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.10393>



convergence of the Arabian and Eurasian plates during the Alpine-Himalayan orogeny.

### Material and methods

We used the data of field observations, petrography and geochemical analyses. The major and trace elements of the samples were analyzed by X-ray fluorescence (XRF) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) at the GSI laboratories in Tehran and Karaj.

### Results and discussion

The study area includes outcrops of Eocene volcanic and volcano-sedimentary sequences which were deposited in marine to continental environments. The older rocks of the area, consist of Alahyarlo ophiolitic mélange that was metamorphosed in green schist facies. The Late Cretaceous recrystallized limestone and dolomite tectonically overlie the mélange assemblages. The Eocene volcano-sedimentary sequence contains a basal conglomerate overlying the older units with an angular unconformity. Paleontological study of the intercalated limestone lenses within the volcano-sedimentary sequence reveals a Middle-Late Eocene age. The volcanic portion of this sequence consists of volcanoclastic rocks as well as lava flows. A few acidic volcanic rocks and ignimbrite are locally exposed in this area.

Epiclastic breccias with interlayers of pillow lava are exposed on the basal conglomerate of the studied sequence. Weakly rounded pebbles in the poorly sorted epiclastic breccias are cemented by carbonate and hyaloclastite materials. The pebbles include older ophiolitic and sedimentary rocks as well as Eocene volcanic pebbles. The clasts vary from meter-sized boulders to centimeter- to decimeter-sized pebbles. Sandstone and marl layers are exposed above the epiclastic breccia

and pillow lava. The volume of epiclastic breccia, pillow lava and sedimentary rocks decreases at the expense of increasing volume of volcanic lava toward the top of the sequence. A thick massif lava flow, with concentric columnar jointing at the bottom, possibly indicates a fossil lava lake. Ropy, megaphyric-phyric lavas and ignimbrite are exposed towards the top of the sequence. Olivine basalt and picritic lava crop out at the top of the volcano-sedimentary sequence. The decreasing volume of epiclastic breccia, pillow lava and hyaloclastite, and increasing phyric-megaphyric lavas towards the top of the sequence confirms that the Eocene volcanic eruptions gradually changed from a subaqueous to a subaerial environment.

The microscopic studies show that the Yusef-Khan-Kandi volcanic rocks include microbasalt, basalt, tephrite, basanite, trachybasalt, basaltic trachyandesite, phenotephrite, tephrophenolite, trachyandesite and trachyte compositions. Phyric texture is common within the volcanic lavas. Fresh olivine is a major constituent mineral in the basic lavas. Two generations of clinopyroxenes (augite) are abundant in microbasalts, olivine basalts and basalts. The first generation of clinopyroxene show anhedral shapes with zoning, spongy texture, and reaction rims. The second generation of clinopyroxene exhibits euhedral shape and glomeroporphyritic texture. The second generation of clinopyroxenes is sometimes formed as a thin rim around the first generation of clinopyroxenes. It is possible that the first generation of clinopyroxenes is the result of crystallization from a parental sodic magma which has been corroded due to the reaction with alkaline potassic magma (Soltan Mohammadi, 2018). The presence of analcime as the main mineral, together with sodalite in

phenotephrite, tephrophenolite and basaltic trachy-andesitic lavas confirms the alkaline and undersaturated nature of these lavas. Fine-grained lherzolitic xenoliths are occasionally found in the picrobasaltic lavas. The presence of the fine-grained olivine basaltic to basaltic autolith confirms mingling of the basaltic and trachytic magmas.

Except for a few trachybasalt, trachyandesite and tephrite basanite samples that plot in the subalkaline field, all other samples follow alkaline and shoshonitic trends. In the sodic-potassic discrimination diagram, the majority of the samples show transitional to potassic trends, with only a few samples exhibiting sodic trends. The transitional trend observed in a significant number of the studied samples probably has resulted from the mingling of the sodic and potassic magmas. The Harker binary diagram variations indicate trends that are consistent with fractional crystallization.

The chondrite-normalized patterns of the samples, show slight light rare earth elements (LREE) enrichment in comparison to heavy rare earth elements (HREE). A gentle slope from La to Yb of these patterns, coupled with a significant decrease in middle rare earth elements (MREE) (for example  $La/Gd > 10$ ) probably indicate the presence of garnet in the

mantle source. Although, the high LREE/HREE ratios could also be resulted from partial melting of an enriched asthenospheric mantle or a metasomatized mantle in collisional to continental arc environments.

Some primitive mantle-normalized spider diagrams show depletion in Rb, Nb, Ta and P. Additionally, some spider diagrams display enrichment in Cs, Th, U, La, K and Zr. These geochemical characters with depletion in Ti, Nb and Ta could be attributed to partial melting of either a metasomatized mantle or a low grade partial melting of a depleted mantle source. Most of the studied volcanic lavas plot in the active continental arc or within plate domains.

### Conclusion

It seems that following the convergence between the Arabian and Eurasian plates in the Late Cretaceous (e.g. [Khalatbari jafari et al., 2016](#) and references therein), the northward subducting Neotethys slab in the Eocene, triggered partial melting of the metasomatized subcontinental lithospheric mantle of the Central Iranian microplate. Therefore, we suggest that the Yusef-Khan-Kandi Eocene volcanic rocks were erupted in a post-collision extensional environment.

### References

- Alavi, M., 1991. Tectonic Map of Middle East, scale 1:5000000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Babakhani, A.R., Khan Nazer, N., 1991. Geological Map of Lahrud, Scale 1: 100000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Khalatbari Jafari, M., Babaie, H.A., Moslempour., 2016. Mid-ocean-ridge to suprasubduction geochemical transition in the hypabyssal and extrusive sequences of major Upper Cretaceous ophiolites of Iran. Geological Society of America, doi:10.1130/2016.2525(07).
- Soltanmohammadi, A., Rahgoshay, M., 2015. Mineralogy and geochemistry of analcime bearing alkaline rocks in Salavat range, Azerbaijan Magmatic Plateau, NW Iran. Petrology 22, 91-118. In Persian.

## CRediT authorship contribution statement

|                                                                                                                       |                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br><b>Morteza Khalatbari Jafari</b> | Conceptualization, Methodology, Formal analysis,<br>Investigation, Data Curation, Writing - Original Draft<br>Writing - Review & Editing, Supervision |
| <br><b>Amir Shahriari</b>            | Software, Validation, Investigation , Resources<br>Writing - Original Draft                                                                           |
| <br><b>Mohammad Faridi</b>           | Investigation, Project administration,<br>Funding acquisition                                                                                         |



## زمین‌شناسی، پتروگرافی و ژئوشیمی گدازه‌های آتشفشانی ائوسن شمال یوسف‌خان‌کندی، شمال لاهرود، استان اردبیل

مرتضی خلعت‌بری جعفری<sup>۱\*</sup>، امیر شهریاری<sup>۱</sup>، محمد فریدی<sup>۲</sup>

۱. پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران، ایران

۲. سازمان زمین‌شناسی کشور، تبریز، ایران

| اطلاعات مقاله                                                   | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>تاریخچه مقاله</b><br>دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷<br>پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۰ | محدوده مورد مطالعه، در شمال روستای یوسف‌خان‌کندی و شمال شهرستان لاهرود (استان اردبیل) واقع است. این منطقه در شمال باختری ایران واقع بوده و جزیی از پهنه ساختاری البرز-آذربایجان است که همراه با پهنه قفقاز کوچک و ارتفاعات جنوب خاوری ترکیه، ضمن برخورد پلیت عربی با اورازیا طی کوهزایی آلپ-همالیا شکل گرفته‌اند. محدوده مورد مطالعه، دربردارنده تناوبی از سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن است که در محیط زیرآبی تا خشکی تشکیل شده‌اند. بخش آتشفشانی این توالی، از سنگ‌های ولکانوکلاستیک و جریان‌های گدازه تشکیل شده است. سنگ‌های آتشفشانی اسیدی و ایگنمبریت بصورت محلی برونزد دارند. طبق مطالعات پتروگرافی، گدازه‌های آتشفشانی یوسف‌خان‌کندی شامل انواع پیکروبازالت، بازالت، تفریت بازالت، تراکی بازالت، بازالت، بازالتیک تراکی آندزیت، فنوتفریت، تفروفنولیت، تراکی آندزیت و تراکیت هستند. بافت میکروسکوپی غالب در این گدازه‌ها فیریک است. اکثر نمونه‌ها تمایل انتقالی تا پتاسیک و تعداد کمی نیز روند سدیک نشان می‌دهند. روند انتقالی در تعداد قابل توجهی از نمونه‌های مورد مطالعه ممکن است ناشی از آمیختگی ماگماهای پتاسیک و سدیک باشد. تغییرات در نمودارهای دوتایی هارکر دلالت بر اهمیت تفریق ماگمایی در ژنز این سنگ‌ها را دارد. الگوهای بهنجار شده عناصر نادر خاکی و نمودارهای عنکبوتی، دارای نسبت‌های بالای LREE/HREE هستند که ممکن است ناشی از ذوب بخشی گشته غنی شده (از جمله آستونوگر) و یا گشته دگرسان بوده باشد که در مناطق برخوردی و کمان قاره‌ای گزارش شده‌اند. در نمودارهای تکتونوماگمایی، بیشتر گدازه‌های آتشفشانی مورد مطالعه، در قلمروی حاشیه فعال قاره‌ای و تعدادی نیز در محدوده درون صفحه‌ای قرار می‌گیرند. به نظر می‌رسد که به دنبال همگرایی و برخورد صفحه عربستان با اوراسیا از کرتاسه بالایی و فرورانش رو به شمال پوسته اقیانوسی نئوتتیس طی ائوسن، موجب شده است تا گشته لیتوسفری زیرقاره که پیشتر توسط مولفه‌های فرورانشی غنی شده بود، دچار ذوب بخشی گردد. این احتمال وجود دارد که گدازه‌های آتشفشانی ائوسن منطقه یوسف‌خان‌کندی در یک پهنه کششی پس‌برخوردی فوران کرده باشند. |



### مقدمه

۲۸/ ۴۵/ ۴۷° خاوری و عرض‌های جغرافیایی ۳۳°

۳۶/ ۳۸° تا ۳۷/ ۴۴/ ۳۸° شمالی، در شمال خاوری ورقه

زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ اهر (Didon and Gemain, 1978)

و باختر ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود

محدوده مورد مطالعه، در شمال روستای یوسف‌خان-

کندی در شمال لاهرود (استان اردبیل) واقع شده است.

این منطقه مابین طول‌های جغرافیایی ۲۹/۰۷° تا ۴۷°

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.10393>

\*نویسنده مسئول: مرتضی خلعت‌بری جعفری [khalat1965@live.com](mailto:khalat1965@live.com)

استناد به این مقاله: خلعت‌بری جعفری، م.، شهریاری، ا.، فریدی، م. (۱۴۰۲) زمین‌شناسی، پتروگرافی و ژئوشیمی گدازه‌های آتشفشانی ائوسن

شمال یوسف‌خان‌کندی، شمال لاهرود، استان اردبیل، ایران. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۹، شماره ۱، صفحه ۱ تا ۳۱.

<http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.10393>



بازالت‌های منشوری ائوسن در جنوب خاوری شهرستان گرمی، سرشت ماگمایی آلکان داشته و در یک محیط کششی پسافروانش فوران کرده‌اند. طبق مطالعات سودی آجیرلو و جهانگیری (Sudi Ajirlu and Jahangiri, 2010) شمال باختری ایران همراه با ترکیه و قفقاز کوچک، تحت تأثیر حرکات صفحه‌ی عربی طی سنوزوئیک قرار گرفته است. امینی و شیدایی (Amini and Shydaei, 1995) گدازه‌های آتشفشانی شمال باختری مشکین شهر را دارای سرشت آلکان دانسته‌اند. بر اساس مطالعات سلطان‌محمدی و رهگشای (Soltan Mohammadi and Rahgoshay, 2015)، رشته‌کوه صلوات در خاور محدوده مورد مطالعه، دربردارنده گدازه‌های آلکان و شبکه وسیعی از دایک‌ها است. این محققان، سنگ‌های آلکان رشته‌کوه صلوات را به دو گروه تقسیم کرده‌اند: ۱- گدازه‌های با ترکیب آنالسیمیت، برش‌های آنالسیم‌دار و گدازه‌های بالشی تفریتی آنالسیم‌دار. ۲- دایک‌های تفریتی، فنو-تفریتی و لامپروفیری. بنابراین، بررسی‌های بیشتر زمین‌شناسی، پتروگرافی و ژئوشیمیایی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در مناطق کمتر مطالعه شده یا ناشناخته شمال باختری ایران، می‌تواند به درک بهتر ولکانیسم طی این بازه زمانی کمک کند.

(Babakhani and Khan Nazer, 1991) قرار گرفته است (شکل ۱). این محدوده، در کمان ماگمایی البرز-آذربایجان (Alavi, 1991) جای دارد (شکل ۱-a). این کمان، در محل برخورد صفحه‌های عربی-اوراسیا واقع شده که همراه با قفقاز کوچک، ارتفاعات جنوب خاوری ترکیه و ارتفاعات شمال باختری ایران (شکل ۱-a)، طی کوهزایی آلپی-همیالیا شکل گرفته‌اند (e.g. Allen et al., 2004; Dilek and Sandvol, 2009). بر پایه مطالعات پیشین، سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی سنوزوئیک در جای جای این پهنه برخوردی برونزد دارند (e.g., Allen et al., 2004; Dilek and Sandvol, 2009). نقطه نظرهای متفاوتی در مورد ولکانیسم سنوزوئیک (به‌خصوص ائوسن) در مناطق مختلف آذربایجان وجود دارد. بر پایه مطالعات ریو (Riou, 1979)، گدازه‌های تحت اشباع از سیلیس در آذربایجان به صورت محدود برونزد دارند و با توجه به رخمون گدازه‌های کالک‌آلکان، آلکان و شوشونیتی، پیشنهاد شده است که سری‌های ماگمایی ائوسن منطقه آذربایجان، در یک ریف‌ت قاره‌ای تشکیل شده‌اند. بر اساس مطالعات احمدزاده و همکاران (Ahmadzadeh et al., 2010)، گدازه‌های آتشفشانی شمال باختری مرند، روند ماگمایی پتاسیک و سدیک را نشان می‌دهند. بر اساس مطالعات مبشرگرمی و جهانگیری (Mobashergermi and Jahangiri, 2017)،

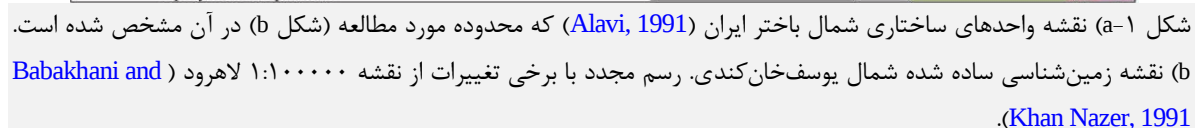


Fig.1. a) The structural map of NW Iran (modified from Alavi, 1991). The rectangle shows the location of the study area (Fig. b). b) Simplified geological map of the Yusef-Khan-Kandi region modified from the Lahrud map, scale 1:100000 (Babakhani and Khan Nazer, 1991).

## مواد و روش‌ها

اگرچه در پیشینه مطالعاتی ناحیه آذربایجان، می‌توان به اطلاعات ارزشمندی در مورد ولکانیسم ائوسن دست یافت، اما داده‌های زمین‌شناسی، پتروگرافی و ژئوشیمی جامعی از سنگ‌های آتشفشانی شمال یوسف‌خان‌کندی در دسترس نیست. لذا توالی آتشفشانی-رسوبی در این منطقه انتخاب و برداشت‌های صحرایی صورت گرفت. در این راستا، ضمن بهره‌گیری از نقشه‌های توپوگرافی (نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ مشیران) و زمین‌شناسی منتشر شده و تصاویر ماهواره‌ای، نقاط برداشت نمونه‌ها نیز با جی‌پی‌اس اندازه‌گیری شدند. ارتباط بین واحدهای مختلف به دقت بررسی شده و حاصل آن به صورت ستون چین‌نگاری (شکل ۲) نشان داده شده است. پس از تهیه مقاطع نازک، مطالعات پتروگرافی انجام و طی آن، نمونه‌های سالم‌تر جهت انجام تجزیه‌های شیمیایی انتخاب و به آزمایشگاه ارسال شدند. در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی (تهران)، اکسیدهای اصلی به روش XRF و در آزمایشگاه مرکز کرج، عناصر نادر و کمیاب به روش ICP-MS اندازه‌گیری شدند. نتایج آنالیزها در جدول ۱ آورده شده است. نتایج تجزیه‌های شیمیایی با کمک نرم‌افزارهای Excel و Iqpet 2007 در نمودارهای ژئوشیمیایی ترسیم و سپس در نرم‌افزار Corel DRAW X6 مرتب شدند.

بر اساس بررسی‌های صحرایی، قدیمی‌ترین واحد زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه، آمیزه افیولیتی اله‌یارلو است که دربردارنده سرپانتینیت، متاگابرو، متاولکانیک و متاپلیت می‌باشد. این سنگ‌ها در

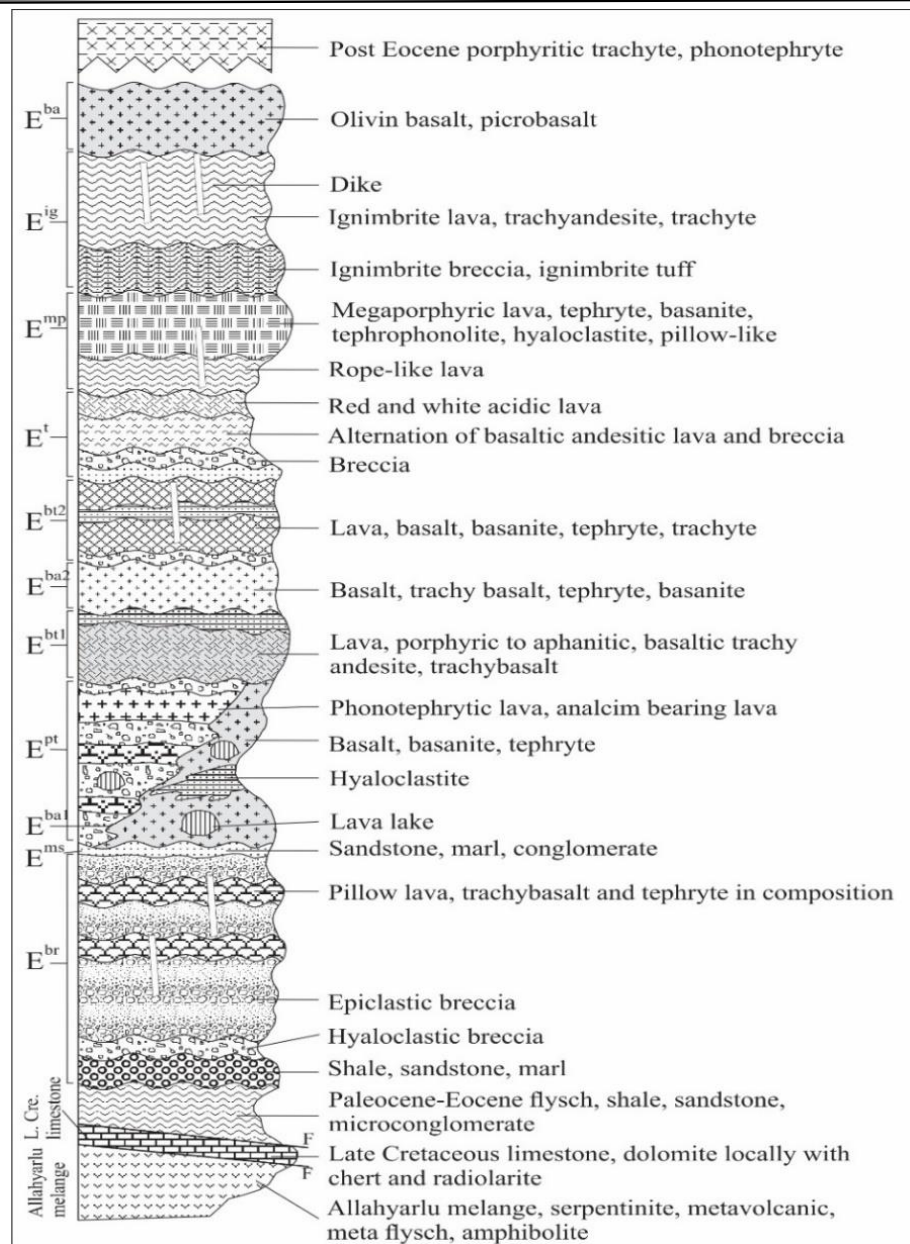
محدوده رخساره شیست سبز دگرگون شده‌اند (Babakhani and Khan Nazer, 1991; Barzegar and Pourkermani, 2010; Sudi Ajirlu et al., 2010). بر روی این مجموعه، سنگ آهک کم و بیش متبلور (شکل ۲) با سن کرتاسه بالایی به صورتی تکتونیزه جای گرفته است (Babakhani and Khan Nazer, 1991).

سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی ائوسن، تناوب قابل ملاحظه‌ای را در منطقه مورد مطالعه تشکیل داده‌اند. در باختر منطقه، در محدوده ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خوجا، سه واحد سنگ آهک نومولیت‌دار با میکروفسیل‌های ائوسن میانی شناسایی شده است (Faridi and Khalatbari Jafari, 2006). در شمال منطقه مورد مطالعه نیز در میان رسوبات توربیدیتی مغان، میکروفسیل‌های ائوسن میانی تا بالایی یافت شده‌اند (Babakhani and Khan Nazer, 1991). بنابراین، می‌توان سن توالی آتشفشانی-رسوبی در شمال یوسف‌خان‌کندی را به ائوسن نسبت داد. بر اساس بررسی‌های صحرایی، واحدهای زمین‌شناسی  $E^{br}$ ،  $E^{ba}$  و  $E^{ig}$ ،  $E^{mp}$ ،  $E^t$ ،  $E^{bt2}$ ،  $E^{ba2}$ ،  $E^{bt1}$ ،  $E^{pt}$ ،  $E^{ba1}$ ،  $E^{ms}$  در شمال یوسف‌خان‌کندی شناسایی شدند که ارتباط آن‌ها به صورت ستون چین‌نگاری نشان داده شده است (شکل ۲).

جدول ۱-آنالیز سنگ کل عناصر اصلی (wt.%) و کمیاب (ppm) نمونه‌های آتشفشانی محدوده یوسف‌خان‌کندی، شمال لاهرود.

Table 1. Whole rock major (wt.%) and trace element (ppm) analyses of volcanic samples of the Yusef-Khan-Kandi area, north of Lahrud.

| Sample                           | LR-2        | LR-36  | LR-23        | LR-24 | LR-10             | LR-16 | LR-17 | LR-47         | LR-30                   | LR-33           | LR-1           | LR-5     | LR-7 |
|----------------------------------|-------------|--------|--------------|-------|-------------------|-------|-------|---------------|-------------------------|-----------------|----------------|----------|------|
| Rock type                        | Picrobasalt | Basalt | Trachybasalt |       | Tephrite-basanite |       |       | Phonotephrite | Basaltic-Trachyandesite | Tephrophanolite | Trachyandesite | Trachyte |      |
| SiO <sub>2</sub>                 | 43.4        | 46.0   | 49.2         | 48.2  | 51.0              | 46.0  | 44.5  | 49.1          | 50.1                    | 55.1            | 58.6           | 61.2     | 60.6 |
| TiO <sub>2</sub>                 | 0.9         | 1.1    | 1.0          | 1.5   | 0.7               | 1.1   | 1.1   | 0.9           | 0.6                     | 1.1             | 0.9            | 0.4      | 0.5  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 13.5        | 16.7   | 17.4         | 18.7  | 19.9              | 18.3  | 18.4  | 18.9          | 18.9                    | 17.9            | 16.7           | 19.2     | 18.6 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * | 12.8        | 13.6   | 10.9         | 10.7  | 6.9               | 10.7  | 11.6  | 8.0           | 9.0                     | 6.3             | 6.2            | 3.2      | 3.7  |
| MnO                              | 0.2         | 0.3    | <.1          | <.1   | 0.7               | 0.3   | 0.3   | 0.2           | 0.3                     | 0.2             | <.1            | 0.2      | <.1  |
| MgO                              | 10.1        | 5.7    | 2.3          | 2.7   | 1.9               | 2.6   | 3.5   | 1.5           | 1.8                     | 1.1             | 1.0            | 1.0      | 0.7  |
| CaO                              | 13.6        | 9.0    | 9.9          | 8.3   | 7.0               | 9.9   | 10.2  | 8.0           | 9.7                     | 3.2             | 6.1            | 2.5      | 2.6  |
| Na <sub>2</sub> O                | 2.7         | 2.3    | 3.0          | 3.3   | 3.6               | 3.2   | 3.3   | 3.8           | 3.0                     | 3.9             | 3.5            | 4.2      | 4.2  |
| K <sub>2</sub> O                 | 0.5         | 2.2    | 3.7          | 3.4   | 4.4               | 3.4   | 3.1   | 5.0           | 4.2                     | 7.5             | 3.9            | 6.6      | 7.5  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>    | 0.4         | 0.4    | 0.7          | 0.9   | 0.6               | 0.9   | 1.1   | 0.8           | 0.6                     | 0.4             | 0.5            | 0.2      | 0.1  |
| L.O.I.*                          | 1.3         | 2.3    | 1.4          | 1.8   | 2.7               | 3.0   | 2.6   | 3.0           | 1.3                     | 2.9             | 2.2            | 1.2      | 1.2  |
| Total                            | 99.5        | 99.6   | 99.6         | 99.6  | 99.5              | 99.5  | 99.5  | 99.3          | 99.6                    | 99.7            | 99.6           | 99.8     | 99.7 |
| Sc                               | 40.8        | 25.5   | 27.0         | 16.6  | 7.40              | 13.5  | 19.0  | 12.5          | 15.0                    | 5.91            | 7.18           | 1.39     | 3.25 |
| Co                               | 49.4        | 32.1   | 23.5         | 21.3  | 14.0              | 20.3  | 25.2  | 17.1          | 21.6                    | 6.72            | 16.5           | 2.68     | 2.28 |
| Rb                               | 35.2        | 51.7   | 52.6         | 82.6  | 101               | 47.0  | 54.4  | 66.0          | 74.6                    | 233             | 111            | 174      | 206  |
| Zr                               | 206         | 194    | 253          | 528   | 608               | 431   | 379   | 336           | 174                     | 1031            | 455            | 781      | 881  |
| Nb                               | 9.69        | 11.2   | 10.1         | 45.4  | 54.9              | 32.3  | 28.1  | 23.6          | 8.63                    | 88.2            | 31.1           | 60.7     | 63.0 |
| Cs                               | 1.07        | 0.57   | 1.24         | 2.83  | 3.90              | 2.29  | 2.89  | 1.43          | 1.68                    | 7.13            | 2.10           | 8.01     | 6.08 |
| La                               | 38.9        | 37.1   | 35.0         | 70.2  | 83.3              | 70.5  | 66.4  | 47.0          | 39.9                    | 124             | 72.1           | 115      | 107  |
| Ce                               | 65.1        | 62.0   | 60.0         | 117   | 137               | 118   | 113   | 78.9          | 66.8                    | 197             | 112            | 173      | 164  |
| Pr                               | 8.19        | 7.75   | 8.20         | 14.2  | 15.5              | 14.3  | 13.9  | 9.86          | 8.23                    | 21.7            | 12.6           | 18.1     | 17.7 |
| Nd                               | 34.0        | 30.6   | 32.9         | 51.0  | 54.5              | 54.6  | 52.4  | 40.3          | 32.5                    | 75.6            | 47.5           | 65.0     | 59.2 |
| Sm                               | 6.67        | 6.62   | 6.91         | 8.98  | 9.53              | 10.3  | 10.3  | 8.63          | 6.89                    | 13.0            | 8.24           | 9.58     | 9.24 |
| Eu                               | 1.85        | 2.16   | 1.92         | 2.37  | 2.66              | 2.78  | 2.83  | 2.77          | 2.20                    | 2.94            | 2.41           | 2.44     | 2.35 |
| Gd                               | 5.71        | 5.27   | 5.99         | 8.27  | 8.32              | 8.78  | 8.68  | 6.49          | 5.08                    | 11.1            | 7.23           | 9.15     | 9.14 |
| Tb                               | 0.81        | 0.83   | 0.98         | 1.13  | 1.03              | 1.05  | 1.11  | 1.00          | 0.76                    | 1.46            | 0.85           | 1.13     | 1.05 |
| Dy                               | 4.24        | 4.72   | 5.34         | 6.05  | 5.21              | 5.52  | 5.60  | 4.96          | 4.34                    | 7.87            | 4.25           | 6.06     | 5.59 |
| Ho                               | 0.83        | 0.97   | 1.12         | 1.17  | 0.98              | 1.04  | 1.08  | 1.13          | 0.89                    | 1.52            | 0.77           | 1.13     | 1.11 |
| Er                               | 2.16        | 2.76   | 3.21         | 3.38  | 2.79              | 2.78  | 3.05  | 2.80          | 2.45                    | 4.50            | 2.22           | 3.38     | 3.34 |
| Tm                               | 0.32        | 0.43   | 0.50         | 0.52  | 0.42              | 0.42  | 0.42  | 0.47          | 0.40                    | 0.71            | 0.33           | 0.55     | 0.53 |
| Yb                               | 1.90        | 2.68   | 3.13         | 3.23  | 2.85              | 2.77  | 2.67  | 2.86          | 2.42                    | 4.50            | 2.05           | 3.74     | 3.78 |
| Lu                               | 0.34        | 0.45   | 0.54         | 0.53  | 0.50              | 0.49  | 0.47  | 0.52          | 0.41                    | 0.76            | 0.40           | 0.72     | 0.63 |
| Hf                               | 3.54        | 4.40   | 4.48         | 7.70  | 8.52              | 6.59  | 6.03  | 7.20          | 3.17                    | 15.2            | 7.80           | 12.5     | 13.2 |
| Ta                               | 0.27        | 0.76   | 0.55         | 2.48  | 2.69              | 1.88  | 1.21  | 3.79          | 0.45                    | 5.56            | 2.00           | 4.40     | 4.05 |
| Th                               | 7.54        | 4.20   | 10.0         | 17.6  | 23.7              | 18.9  | 15.3  | 11.5          | 8.22                    | 42.0            | 16.2           | 35.0     | 34.7 |
| U                                | 1.58        | 1.09   | 2.77         | 3.98  | 6.04              | 5.71  | 3.73  | 2.54          | 2.14                    | 10.4            | 3.21           | 7.44     | 7.94 |
| W                                | 0.99        | 0.66   | 0.39         | 1.26  | 1.29              | 1.14  | 0.56  | 0.80          | 0.55                    | 4.21            | 1.67           | 2.61     | 2.64 |



شکل ۲- ستون لیتواستراتیگرافی عمومی از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در محدوده یوسف خان کندی، بر اساس برداشت‌های صحرایی.  
Fig.2. Generalized lithostratigraphic column of the Eocene volcanic rocks in the Yusef-Khan- Kandi area, based on field observations.

الهیارلو و سنگ‌های رسوبی پالئوزوئیک و مزوزوئیک است. به سمت بالای واحد، گدازه‌های بالشی با ترکیب تراکی‌بازالت و تغریت رخنمون دارند. بر روی آنها، برش اپی‌کلاستیک نهشته شده که دربردارنده قطعه-های کم و بیش گرد شده هستند و نشان از حمل و

واحد  $E^{br}$ ، بطور عمده از برش اپی‌کلاستیک تشکیل شده است (شکل ۲). این واحد در قاعده شامل کنگلومرا است که بر روی آمیزه افیولیتی الهیارلو به صورتی دگرشیب نهشته شده‌اند. واحد کنگلومرایی دربردارنده قطعه‌های گردشده از افیولیت

نقل در محیط آبدار دارد. گاهی این قطعه‌ها توسط زمینه‌ای از خرده‌های بلورین سبز رنگ به خصوص اپیدوت و کلریت، هیالوکلاستیت و سیمان کربناته در برگرفته شده‌اند. اندازه قطعه‌ها متفاوت است به طوری که از اندازه‌های نزدیک به یک متر (بولدر) تا قطعه‌های در ابعاد سانتی‌متری و دسی‌متری متغیرند. این واحد به صورتی تدریجی به واحد  $E^{ms}$  تبدیل شده است.

واحد  $E^{ms}$ ، شامل شیل، ماسه سنگ و مارن است (شکل ۲) که به صورتی تدریجی به واحد  $E^{ba1}$  تبدیل شده است. واحد  $E^{ba1}$  دربردارنده گدازه و هیالوکلاستیت (شکل ۳- a و b) با ترکیب بازالت، بازانیت و تفریت است و به سمت بالای واحد، بر فراوانی گدازه اضافه شده است (شکل ۲ و ۳- a). گاهی در قاعده این واحد، توف و برش فروژن (ferrogenous tuff) همراه با برش هیالوکلاستیک برونزد دارند. در شمال خاوری محدوده مورد مطالعه، رخنمون‌های دریاچه گدازه‌ای فسیل (fossil lava lake) (شکل ۳- c) دیده می‌شوند که دارای شکستگی‌های شعاعی هم مرکز در قاعده جریان گدازه هستند. این سنگ‌ها دربردارنده فنوکریست‌های درشت البوین و کلینوپروکسن و به صورت جانبی دارای فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و آنالسیم بوده که نشانگر تغییرات جانبی این واحد با واحد  $E^{pt}$  است. واحد  $E^{pt}$ ، شامل تناوبی از برش و گدازه با ترکیب تراکی‌بازالت، بازالتیک تراکی آندزیت و فنوتفریت است و به سمت بالای واحد بر مقدار برش اضافه شده است. در بالای واحد، بقایای دریاچه‌گدازه‌ای فسیل و گدازه‌های بالشی تا طول ۵ متر را نیز می‌توان یافت

(شکل ۳- d). این واحد به صورتی تدریجی به واحد  $E^{bt1}$  تبدیل شده است (شکل ۲).

واحد  $E^{bt1}$ ، حاوی گدازه‌های با ترکیب بازالتیک تراکی آندزیت و تراکی بازالت است (شکل ۳- e) که گاهی به صورت بالشی دیده می‌شوند. گدازه‌های واحد  $E^{ba2}$  بر روی آن‌ها ریخته شده‌اند (شکل ۲). واحد  $E^{ba2}$ ، شامل گدازه‌های با ترکیب بازالت، تراکی بازالت، تفریت و بازانیت است که در محیط خشکی بیرون ریخته‌اند. این سنگ‌ها دارای فنوکریست‌های درشت پیروکسن بوده و به صورتی تدریجی بر روی واحد  $E^{bt1}$  و در زیر واحد  $E^{bt2}$  قرار گرفته‌اند. واحد  $E^{bt2}$ ، شامل گدازه‌های با ترکیب بازالت، بازانیت، تفریت و تراکیت است که به صورت متناوب با برش هیالوکلاستیک دیده می‌شوند. گاهی در لابلای قطعه‌های برش، کربنات (شکل ۳- f) و خرده‌های کانی‌های سبز مانند کلریت و اپیدوت یافت شدند که نشان می‌دهد که بخش‌هایی از این واحد در محیط آبدار سرد شده‌اند. واحد  $E^t$ ، دربردارنده تناوبی از گدازه بازالتیک آندزیتی، برش و توف و گدازه اسیدی در بالای واحد است (شکل ۳- g). با توجه به وجود گدازه‌های اسیدی در بالا و گدازه‌های بازیک در زیر واحد، شاید بتوان فوران آن‌ها را با ولکانیسم دوگانه توجیه کرد. گاهی در لابلای گدازه‌ها، برش نیز یافت شده است. گدازه‌های واحد  $E^{mp}$  بر روی این واحد نهشته شده‌اند.

واحد  $E^{mp}$ ، دربردارنده گدازه‌های طنابی، پورفیریک تا مگاپورفیریک (شکل ۴- a) با ترکیب تفریت، بازانیت و تفروفتولیت و هیالوکلاستیت است. بخش زیرین این واحد ساختاری طنابی دارد، اما به سمت بالا و به صورت تدریجی شکل بالشی یافته‌اند.

بنابراین، شاید بتوان نتیجه گرفت که فوران گدازه‌های  
مگاپورفیریک در شرایطی بین محیط خشکی تا آبدار  
رخ داده است. ایگنمبریت‌های واحد  $E^{ig}$  بر روی آن  
نهشته شده‌اند (شکل ۴- b).



شکل ۳- تصاویر صحرایی واحدهای  
سنگی منطقه مورد مطالعه. (a)  
رخنمون برش هیالوکلاستیک،  
هیالوکلاستیت و گدازه (واحد  $E^{ba1}$ )  
در شمال باختری روستای نوری  
کندی. (b) حضور قطعه‌های آتشفشانی  
با فرسایش کروی در هیالوکلاستیت.  
(c) جریان گدازه‌ای ضخیم در میان  
هیالوکلاستیت و گدازه بالشی  
(واحد  $E^{ba1}$ )، که دارای شکستگی‌های  
منشوری در پایین بوده و ممکن است  
که یک دریاچه گدازه‌ای فسیل  
(fossil lava lakes) باشد. (d) گدازه  
بالشی (واحد  $E^{Pl}$ ). (e) تصویر پانوراما از  
گدازه‌های آتشفشانی (واحد  $E^{bt1}$ ) در  
خاور روستای ویجینی. (f) قطعه‌های  
برش (واحد  $E^{bt2}$ ) با سیمان کربناته،  
روستای قلدر کهلی. (g) تصویر پانوراما  
از گدازه‌های آتشفشانی (واحد  $E^l$ )،  
خاور خرده قشلاق.

Fig.3. Field photographs of the rock units in the study area. a) the exposure of the hyaloclastic breccia, hyaloclastite and lava ( $E^{ba1}$ ) in the northwest of Nouri Kandi village. b) the presence of volcanic fragments showing spherical weathering in the hyaloclastite. c) thick massif lava flow interbedded with hyaloclastite and pillow lava ( $E^{ba1}$ ), with columnar jointing at the bottom, possibly showing a fossil lava lake. d) pillow lava ( $E^{Pl}$ ). e) panoramic images of the volcanic rocks of the  $E^{bt1}$ , east of Vijini village. f) fragments of the breccia ( $E^{bt2}$ ) cemented by carbonate, Qoldor Kohli village. g) Panoramic images of the volcanic lavas ( $E^l$ ), east of Khurdeh Qeshlaq.



شکل ۴-تصاویر صحرایی واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه. (a) بافت پورفیریک-مگاپورفیریک در گدازه بالشی (واحد  $E^{mp}$ ). (b) ایگنمبریت (واحد  $E^{ig}$ ) بر روی گدازه مگاپورفیریک واحد  $E^{mp}$ ، شمال روستای یوسف‌خان کندی. (c) قطعه‌های تیره در ایگنمبریت-برش (واحد  $E^{ig}$ )، شمال روستای یوسف‌خان کندی. (d) آنکلاو تیره (الیوین بازالت) با حاشیه بین انگشتی در ایگنمبریت (واحد  $E^{ig}$ ). (e) فیام دروغین در ایگنمبریت (واحد  $E^{ig}$ ). (f) آنکلاو پیروکسنیتی در گدازه پیکروبازالتی (واحد  $E^{ba}$ ).

Fig.4. Field photographs of the rock units in the study area. a) the porphyritic-megaporphyritic texture in the pillow lava ( $E^{mp}$ ). b) the ignimbrites ( $E^{ig}$ ) overlying the megaporphyritic lava ( $E^{mp}$ ), north of Yusuf Khan Kandi village. c) Dark fragments in the ignimbrite-breccia of the unit  $E^{ig}$ , north of Yusef-Khan-Kandi village. d) dark enclave (olivine basalt) with lobate contact, embedded in the ignimbrite ( $E^{ig}$ ). e) the pseudofiamme in the ignimbrite ( $E^{ig}$ ). f) pyroxenite enclave in the microbasaltic lava ( $E^{ba}$ ).

همبری بینابینی با خمیره هستند. ایگنمبریت-گدازه دارای فیام‌های دروغین فراوان است (شکل ۴- e) که اغلب توسط فلدسپار پر شده‌اند. در شمال روستای یوسف‌خان کندی، این واحد توسط الیوین بازالت واحد  $E^{ba}$  پوشیده شده است.

واحد  $E^{ba}$ ، شامل گدازه‌های با ترکیب الیوین بازالت و پیکروبازالت است که به صورت متناوب بر روی هم ریخته شده‌اند. زنولیت‌های پیروکسنیت

واحد  $E^{ig}$ ، شامل ایگنمبریت-برش، ایگنمبریت-توف و ایگنمبریت-گدازه با ترکیب تراکی آندزیت و تراکیت است که توسط دایک‌های بازیک قطع شده‌اند. ایگنمبریت-برش در قاعده و ایگنمبریت-گدازه در بالای واحد جای دارد. این واحد دربردارنده قطعه‌های با ابعاد دسی‌متری و سانتی‌متری (شکل ۴- c و d)، به رنگ‌های تیره (با ترکیب بازیک-حدواسط) و روشن (با ترکیب اسیدی) در خمیره‌ای از خرده‌های آتشفشانی و فیام است. این قطعه‌ها اغلب دارای

(شکل ۴- f) در آن‌ها یافت شده و دارای فنوکریست-های فراوان الیوین و پیروکسن هستند. می‌توان گفت که این واحد، جوان‌ترین واحد آتشفشانی ائوسن در منطقه مورد مطالعه است.

### پتروگرافی

همانطور که در بخش زمین‌شناسی اشاره شد، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن دارای ترکیب متنوع بازیک-حدواسط بوده و سنگ‌های ایگنمبریتی نیز در بالای توالی آتشفشانی-رسوبی دیده می‌شوند. بر پایه مطالعات پتروگرافی (شکل ۵) و بهره‌گیری از نمودارهای نامگذاری ژئوشیمیایی (شکل ۶-a و b)، سنگ‌های آتشفشانی منطقه یوسف‌خان‌کندی را می‌توان تحت عناوین پیکروبازالت، بازالت، تغریت، بازانیت، تراکی بازالت، بازالتیک تراکی آندزیت، فنوتغریت، تغروفنولیت، تراکی آندزیت و تراکیت دسته‌بندی نمود.

گدازه‌های پیکروبازالتی بافت پورفیریک دارند. در این گدازه‌ها، فنوکریست‌های الیوین (شکل ۵-a) و اوژیت سالم هستند، اما فنوکریست‌های الیوین به مقدار اندک، در حاشیه و امتداد شکستگی‌ها به سرپانتین دگرسان شده‌اند (شکل ۵-b). خمیره از بلورهای ریز الیوین، اوژیت، میکروولیت‌های پلاژیوکلاز و گاه آنالسیم (شکل ۵-b) تشکیل شده است. فنوکریست‌های اوژیت در پیکروبازالت، بازالت و تراکی‌بازالت گاهی دارای ماکل ساعت شنی بوده و در دو نسل دیده می‌شوند. نسل اول بی‌شکل، دارای منطقه‌بندی، بافت اسفنجی و حاشیه واکنشی است. نسل دوم سالم، شکل‌دار، دارای منطقه‌بندی و ماکل-دار یافت شده است. گاهی اوژیت نسل دوم به صورت

پهنه‌ای نازک در اطراف اوژیت نسل اول شکل گرفته است. ممکن است که اوژیت نسل اول حاصل تبلور یک ماگمای سدیک و اولیه بوده که در اثر واکنش با ماگمای آکالن پتاسیک دچار خوردگی و ایجاد هاله واکنشی در اطراف شده است (Soltanmohammadi et al., 2018).

بر اساس مطالعات اسماعیلی و همکاران (Esmaili et al., 2013)، وجود خوردگی در حاشیه پیروکسن‌ها، بافت غربالی و منطقه‌بندی نوسانی در سنگ‌های آکالن پتاسیک در نیمه جنوبی جزیره اسلامی، نتیجه اختلاط ماگمایی و آلودگی پوسته‌ای بوده است. گاهی فنوکریست‌های اوژیت نسل دوم دارای ماکل هستند (شکل ۵-c). در مواردی در گدازه پیکروبازالتی، زنولیت‌های ریز الترامافیک با ترکیب لرزولیت یافت شده است. این زنولیت‌ها، دارای حاشیه واکنشی، خورده‌شده و بی‌شکل بوده و از بلورهای الیوین، کلینوپیروکسن (دیوپسید) و ارتوپیروکسن (انستاتیت) تشکیل شده‌اند. در مواردی، الیوین دارای ساختار کینک است و این حدس را تقویت می‌نماید که این کانی در یک محیط تکتونیکی همگرا تشکیل شده است (Li et al., 2012). درایگنمبریت‌های با ترکیب تراکیتی در شمال روستای یوسف‌خان‌کندی و کوه قیزگاچان، زنولیت‌های ریز بازیک یافت شدند. این زنولیت‌ها ترکیب بازالت تا الیوین‌بازالت و همبری بینابینی دارند (شکل ۵-d). گدازه‌های بازالتی دارای بافت پورفیریک با خمیره میکروکریستالین و میکروولیتی جریان‌ی بوده و دربردارنده فنوکریست‌های الیوین و کلینوپیروکسن هستند. در مواردی، فنوکریست‌های الیوین در امتداد شکستگی‌ها توسط

صورت بی شکل تا خودشکل و هشت‌وجهی دیده می‌شوند. گاهی هم کانی‌های ریز از خانواده سودالیت در سطح آن‌ها یافت می‌شود.

در گدازه‌های فنوتفریتی و تفروبازانیتی، آپاتیت به صورت میانبار و یا به صورت پراکنده دیده می‌شود (شکل ۵- h). تفروبازانیت دارای فنوکریست‌های پلاژیوکلاز با بافت غربالی است که ممکن است در اثر برداشته شدن سریع فشار شکل گرفته باشد (Nelson and Montana, 1992). گاهی آنالسیم همراه با اوژیت به صورت گلومروکریست دیده می‌شود. شواهدی از لوسیت اولیه نیز در درون آنالسیم یافت شده است. گاهی آپاتیت به صورت بلورهای ریز و سوزنی شکل در خمیره پراکنده‌اند. کانی‌های اپاک به صورت بلورهای ریز و درشت تشکیل شده‌اند (شکل ۵- h).

گدازه‌های بازالتیک تراکی آندزیتی در بردارنده فنوکریست‌های الیوین، اوژیت و آنالسیم هستند. در گدازه‌های تراکی آندزیتی، فنوکریست‌های پلاژیوکلاز با منطقه‌بندی نوسانی (شکل ۵- i) و بافت غربالی دیده می‌شوند. بر پایه مطالعات ویلشیر و همکاران (Willshire et al., 1996) بر روی بازالت‌های آلکالن در ناحیه آتشفشانی Cima در کالیفرنیا، منطقه‌بندی نوسانی در پلاژیوکلازها، ناشی از تغییرات در فشار حاکم بر حجره ماگمایی بوده است. بر اساس مطالعات هومفریس و همکاران (Humphreys et al., 2006)، منطقه‌بندی نوسانی در پلاژیوکلاز سنگ‌های پیروکلاستیک و گدازه‌های آندزیتی آتشفشان shiveluch در کامچاتکا، ناشی از عوامل مختلفی مانند تاثیرات جنبشی بوده است. کنترل رشد بلور توسط انتشار (Allègre et al., 1981; Bottinga et al.,

سرپانتین و تالک جانشین شده‌اند (شکل ۵- e). گدازه‌های تراکی‌بازالتی، دارای فنوکریست‌های درشت الیوین و اوژیت و فنوکریست‌های اوژیت دارای منطقه‌بندی، بافت اسفنجی و گاهی هم بافت غربالی دارند. فنوکریست‌های اوژیت نسل دوم به صورت شکل‌دار و نیمه‌شکل و گاهی نیز به صورت نواری نازک در حاشیه کلینوپیروکسن نسل اول دیده می‌شوند (شکل ۵- f).

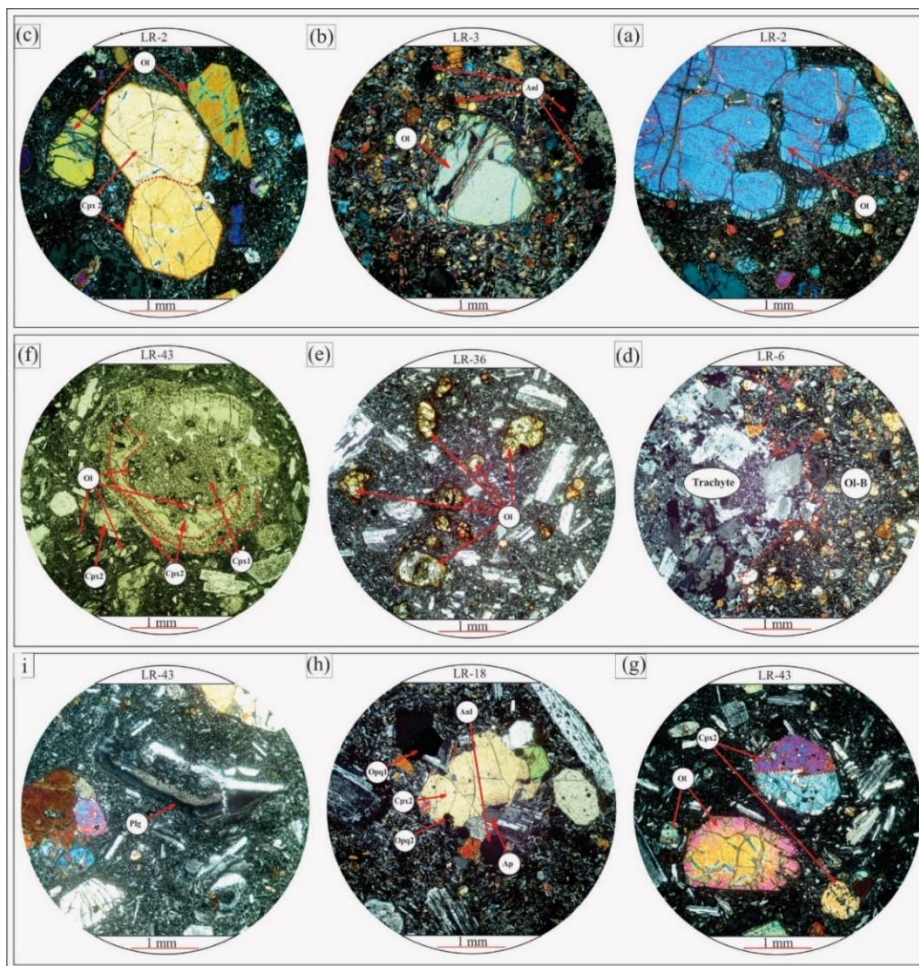
در مواردی، فنوکریست‌های الیوین همراه با اوژیت نسل دوم به صورت پراکنده یافت شدند (شکل ۵- g). منطقه‌بندی در کلینوپیروکسن‌ها ممکن است در سه حالت تشکیل شود: ۱) منطقه‌بندی نوسانی و ساعت شنی که در جریان تبلور ماگما روی می‌دهد. این نوع از منطقه‌بندی در پیروکسن و آمفیبول گدازه‌های تراکی‌بازالتی و بازالتیک تراکی آندزیتی منطقه مورد مطالعه دیده شد. ۲) منطقه‌بندی تلاطمی و معکوس که در نتیجه تاثیر متفاوت سیالات در طی تبلور ماگما تشکیل می‌شود. ۳) منطقه‌بندی عادی که در اثر تبلور تفریقی و طی صعود ماگما روی می‌دهد (Aydin et al., 2009) و در اوژیت گدازه‌های شمال یوسف‌خان‌کندی فراوان است. شاید بتوان حالت نخست را موجب تشکیل اوژیت ساعت شنی در گدازه‌های مورد مطالعه دانست که البته نیاز به بررسی‌های کانی‌شناسی تکمیلی دارد. در گدازه‌های فنوتفریتی، آنالسیم به صورت فنوکریست و در گدازه‌های تفروبازانیتی و بازالتیک تراکی آندزیتی به صورت فرعی یافت شده است. گدازه‌های فنوتفریتی در بردارنده فنوکریست‌های پلاژیوکلاز از نوع آندزین تا الیگوکلاز هستند. فنوکریست‌های آنالسیم به

تراکیت میکروولیت‌های پلاژیوکلاز جریانی و آلکالی  
فلدسپار دیده شدند.

تعدادی از نمونه‌های با ترکیب بازالت، تفریت  
بازانیت، فنوتفریت، تفروفنولیت و تراکی آندزیت  
دربردارنده کانی‌های ثانویه‌ای همچون کلریت و یا  
کلسیت هستند. بعلاوه، در نمونه‌های دستی آن‌ها،  
آثار کانی‌های سولفیدی ریزدانه نیز دیده شدند که در  
میکروسکوپ پلاریزان نمی‌توان از کانی‌های اپاک  
متمایز نمود. این گمان وجود دارد که وجود کانی‌های  
ثانوی یادشده باعث افزایش مقادیر L.O.I. بیشتر از ۲  
(جدول ۱) در این نمونه‌ها شده باشد.

گدازه‌های پسا-ائوسن دارای ترکیب تراکیتی و  
فنوتفریتی هستند که فراوانی گدازه‌های تراکیتی  
بیشتر است.

(1966; Pearce and Kolisnik, 1990)، برداشته شدن  
فشار از روی بلور (Nelson and Montana, 1992)،  
ورود ماگمای مافیک جدید به حجره ماگمایی  
(Singer et al., 1995)، ورود ماگمای سیلیسی به  
حجره ماگمایی (Ginibre et al., 2002) و همرفتی  
ماگمایی (Singer et al., 1995) از دیگر عوامل تشکیل  
منطقه‌بندی نوسانی در پلاژیوکلاز ذکر شده است.  
شاید جریان‌های همرفتی و یا ورود ماگمای جدید  
(پتاسیک) و همبری با ماگمای سدیک سبب تشکیل  
بافت تلاطمی در نمونه‌های مورد مطالعه شده است  
که اثبات آن نیاز به بررسی‌های تکمیلی کانی‌شناسی  
دارد. در شمال یوسف‌خان‌کندی، تراکیت‌ها در سه  
دسته قابل بررسی هستند: گدازه‌های تراکیتی  
جریانی، ایگنمبریت با ترکیب تراکیتی و گدازه‌های  
تراکیتی. در انواع ایگنمبریتی، فیام و سودوفیام و در



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه. (a) فنوکریست‌های الیوین در گدازه پیکروبازالتی (XPL). (b) فنوکریست‌های الیوین که در حاشیه توسط سرپانتین جایگزین شده‌اند و همچنین حضور آنالسیم در تراکی‌بازالت (XPL). (c) فنوکریست‌های الیوین در گدازه پیکروبازالتی (XPL). (d) زئولیت الیوین بازالتی که دارای همبری بین انگشتی با گدازه تراکییتی است (XPL). (e) الیوین بازالتی (XPL). (f) اوژیت نسل اول که

خوردگی داشته و دارای رونینگ با اوژیت فاقد خوردگی از نسل دوم است. میانبارهای ریز الیوین در کلینوپروکسن پراکنده‌اند (PPL). (g) فنوکریست‌های الیوین همراه با اوژیت نسل دوم در گدازه تراکی‌بازالتی (XPL). (h) تجمع کومولیتی از اوژیت، پلاژیوکلاز، آنالسیم و آپاتیت در فنوتفریت (XPL). (i) منطقه‌بندی نوسانی در فنوکریست پلاژیوکلاز گدازه تراکی‌اندزیتی (XPL).

Fig.5. Photomicrographs of the studied volcanic rocks. a) phyric microbasalt containing olivine phenocrysts (XPL). b) Olivine phenocrysts with a replacement rim of serpentine, and analcime in trachybasalt (XPL). c) augite phenocrysts of the second generation and olivine in microbasalt (XPL). d) olivine basalt xenolith has lobate contact with trachytic lava (XPL). e) olivine basaltic lava (XPL). f) augite of the first generation displaying resorption and the mantling of non-resorbed augite of the second generation. Fine olivine inclusions distributed within clinopyroxene (PPL). g) olivine phenocrysts with the augite of the second generation in the trachybasaltic lava (XPL). h) a cumulative aggregate of augite, plagioclase, analcime and apatite in phenotephrite (XPL). i) oscillatory zoning in the plagioclase phenocryst of the basaltic trachyandesite (XPL).

جهت انجام تجزیه‌های شیمیایی به آزمایشگاه ارسال

شدند (جدول ۱). نتایج تجزیه‌های شیمیایی، بر حسب مورد، جهت ترسیم نمودارهای طبقه‌بندی ژئوشیمیایی، نمودارهای دوتایی، الگوهای عناصر

### ژئوشیمی

همانگونه که پیشتر اشاره شد، پس از انجام مطالعات پتروگرافی، نمونه‌های سالم‌تر انتخاب و

نادرخاکی و نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده و محیط تکتونوماگمایی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از داده‌های ژئوشیمیایی در ادامه ارائه شده‌اند.

#### نامگذاری و تعیین سری ماگمایی گدازه‌های مورد مطالعه

تعدادی از نمونه‌ها (جدول ۱)، دارای مقادیر L.O.I کمتر از ۲ درصد وزنی هستند، که نشان می‌دهد دگرسانی تأثیر زیادی بر روی ترکیب آن‌ها نداشته است. اما تعدادی از نمونه‌ها دارای مقادیر L.O.I بیشتر از ۲ درصد وزنی هستند که می‌تواند با حضور کانی‌های ثانویه کلریت و کلسیت و یا کانی‌های سولفیدی در ارتباط باشد. لذا جهت اطمینان بیشتر در نامگذاری ژئوشیمیایی و تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه، علاوه بر نمودارهای عناصر اصلی از نمودارهای عناصر فرعی نام‌تحرک نیز استفاده شده است.

در نمودار  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  به  $\text{SiO}_2$  (Cox et al., 1976)، نمونه‌های مورد مطالعه در قلمروهای بازالت، بازانیت-تفریت، هاوائیت، موژه‌آریت، فنولیتیک تفریت، فنولیت، تراکی آندزیت و تراکیت قرار گرفته‌اند (شکل ۶- a). در این نمودار که مرز بین ماگماهای آکالن و ساب‌آکالن (Irvine and Baragar, 1971) نیز در آن نشان داده شده است، جز

یک نمونه تراکی آندزیت، بقیه نمونه‌ها، روند ماگمایی آکالن را نشان داده‌اند. در نمودار نامگذاری نسبت  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$  به Nb/Y (Winchester and Floyd, 1977)، نمونه‌های شمال یوسف‌خان‌کندی در قلمروی تراکیت، تراکی آندزیت، ریوداسیت/داسیت و آندزیت جای گرفته‌اند (شکل ۶- b).

در نمودار نسبت Ce/Yb به Ta/Yb (Pearce, 1982)، جز تعداد معدودی از نمونه‌های با ترکیب بازالت و تفریت بازانیت که در قلمروی کالک آکالن جای گرفته‌اند، اکثر نمونه‌ها روند ماگمایی شوشونیتی دارند (شکل ۶- c). جهت تمایز ماهیت سدیک و یا پتاسیک گدازه‌های پتاسیک منطقه مورد مطالعه، از نمودار  $\text{K}_2\text{O}$  نسبت به  $\text{Na}_2\text{O}$  (Irvine and Baragar, 1971) استفاده شد (شکل ۶- d). طبق این نمودار اکثر گدازه‌های آتشفشانی شمال یوسف‌خان‌کندی، روند ماگمایی انتقالی تا پتاسیک نشان می‌دهند. نمونه‌های پیکروبازالت و یک نمونه فنوتفریت روند سدیک دارند. بر اساس مطالعات سلطان‌محمدی و همکاران (Soltanmohammadi et al., 2018)، گدازه‌های انتقالی در کوه صلوات واقع در خاور منطقه مورد مطالعه، حاصل آمیختگی ماگماهای پتاسیک و سدیک هستند.

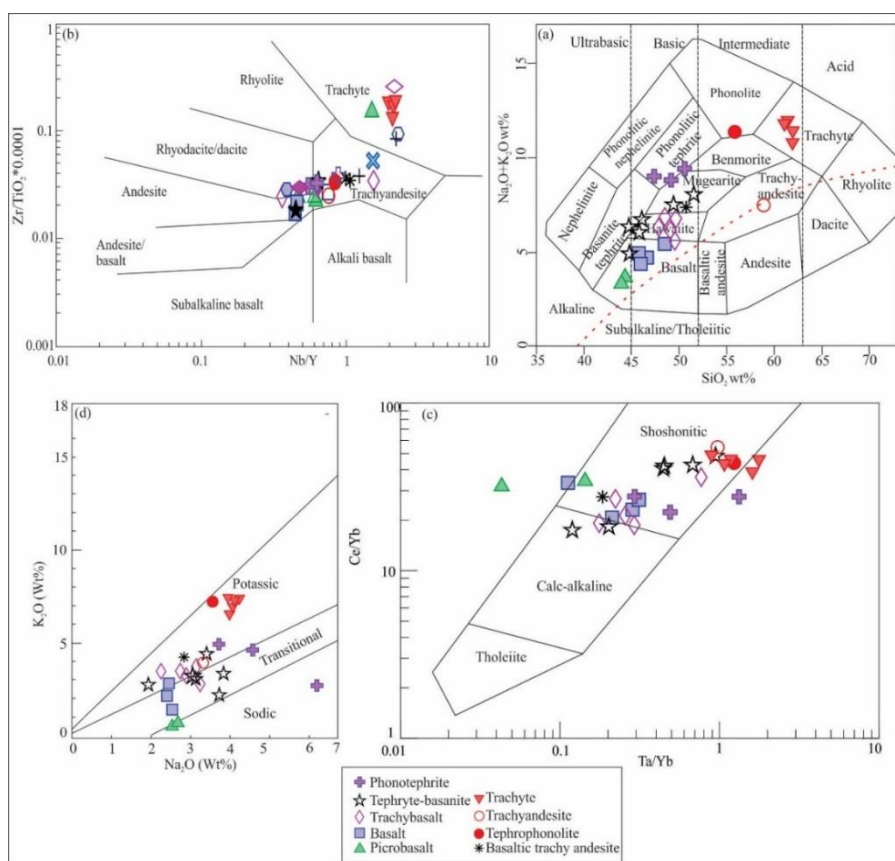


Fig.6. Geochemical classification and magmatic series of the studied volcanic rocks. a) Total alkali vs. silica diagram (Cox et al., 1976) in which the boundary between alkaline and subalkaline fields (Irvine and Barager, 1971) is also shown. b)  $Zr/TiO_2 \cdot 0.0001$  vs.  $Nb/Y$  diagram (Winchester and Floyd, 1976). c)  $Ta/Yb$  vs.  $Ce/Yb$  diagram (Pearce, 1982). d)  $K_2O$  vs.  $Na_2O$  diagram (Irvine and Baragar, 1971).

در گدازه‌های آتشفشانی شمال یوسف‌خان‌کندی،

مقادیر  $MgO$  از ۰/۵ الی ۱۰/۱ درصد وزنی در تغییر است. در نمودار تغییرات  $MgO$  نسبت به  $SiO_2$ ، نمونه‌های مورد مطالعه، روندی مشابه با تفریق ماگمایی را نشان می‌دهند. به این ترتیب که مقدار  $MgO$  از گدازه پیکروبازالتی به سمت گدازه تراکیتی، به تدریج کاهش یافته است (شکل ۷- a). کاهش مقدار  $MgO$  را می‌توان به تبلور تفریقی الیوین، کلینوپیروکسن و اکسیدهای  $Fe-Ti$  نسبت داد (Sahakyan et al., 2016; Alici et al., 1998).

شکل ۶- طبقه‌بندی ژئوشیمیایی و سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه. (a) نمودار مجموع عناصر آلکالن به سیلیس (Cox et al., 1976) که در آن مرز بین سنگ‌های آلکالن و ساب‌آلکالن (Irvine and Baragar, 1971) نیز نشان داده شده است. (b) نمودار نسبت  $Zr/TiO_2 \cdot 0.0001$  به  $Nb/Y$  (Winchester and Floyd, 1977). (c) نمودار جهت تعیین سری ماگمایی  $Ta/Yb$  به  $Ce/Yb$  (Pearce, 1982). (d) نمودار نسبت  $K_2O$  به  $Na_2O$  (Irvine and Baragar, 1971).

## نتایج و بحث

### نمودار تغییرات عناصر نسبت به $SiO_2$

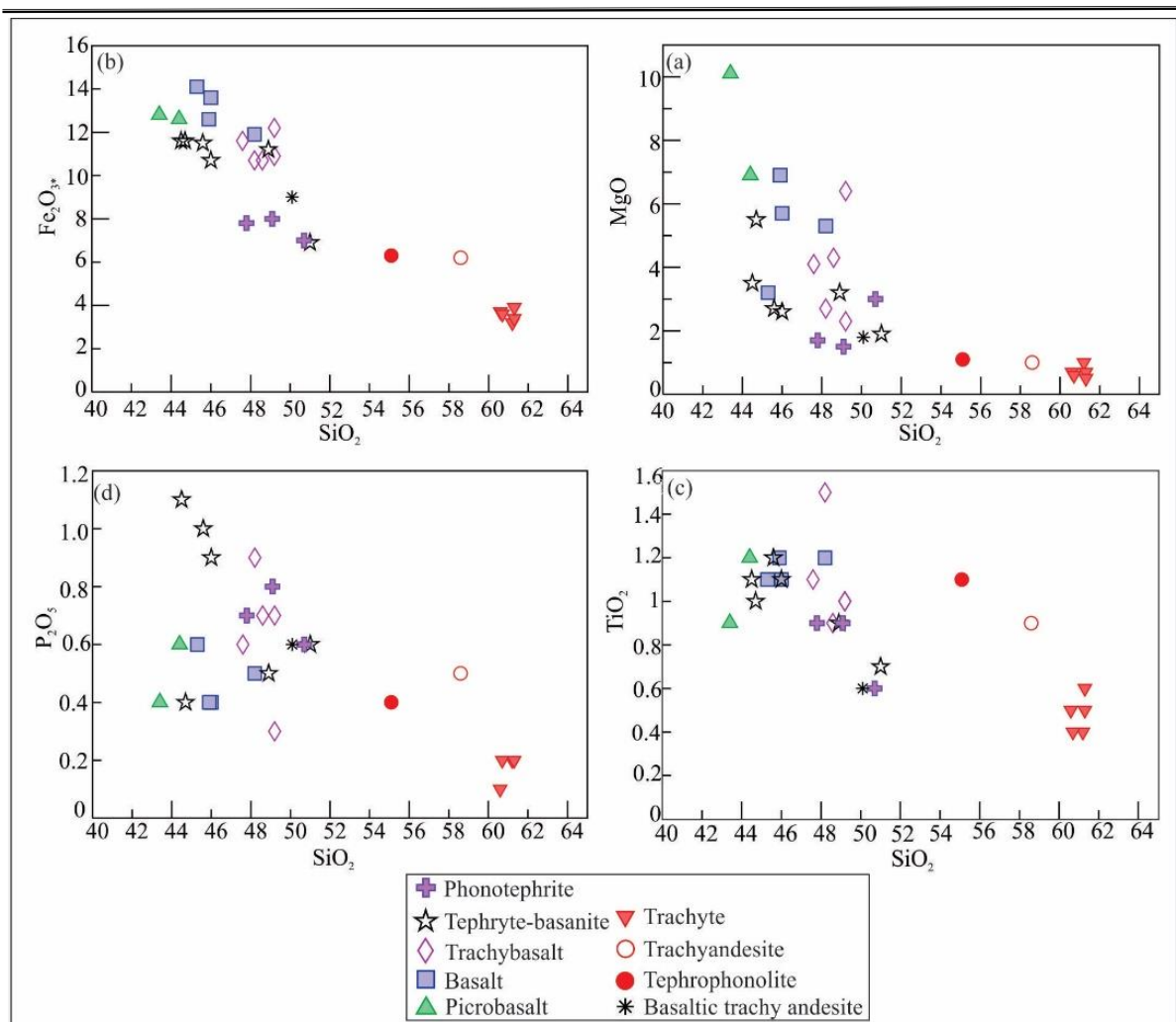
با توجه به مطالعات پتروگرافی مشخص شد که کانی‌های الیوین، کلینوپیروکسن، آنالسیم، آپاتیت و پلاژیوکلاز از کانی‌های اصلی و فرعی مهم در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن شمال یوسف‌خان‌کندی هستند. لذا تغییرات اکسیدهای منیزیم، آهن، تیتان و فسفر نسبت به  $SiO_2$  جهت بررسی نقش تفریق ماگمایی در ژن این سنگ‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است.

۷- d). در این نمودار یک روند کاهشی از سمت سنگ‌های بازیک تحت اشباع به سمت نمونه‌های تراکیتی دیده می‌شود که می‌توان به تفریق آپاتیت نسبت داد (Kaygusuz and Öztürk, 2015; Kaygusuz et al., 2017). کسکین و همکاران (Keskin et al., 2008) معتقدند که روند کاهشی  $P_2O_5$  در نمودارهای دوتایی، معرف آن است که آپاتیت تنها یک فاز کانیاپی ثانوی نیست. با توجه به روند پتاسیک بالا و آلکالن گدازه‌های شمال یوسف‌خان‌کندی، می‌توان انتظار داشت که آپاتیت‌های درشت‌تر شاید به صورت اولیه تبلور یافته‌اند. از تفسیر نمودارهای انتخابی مورد بحث می‌توان نتیجه گرفت که تفریق ماگمایی در ژنز سنگ‌های آتشفشانی ائوسن شمال یوسف‌خان‌کندی نقشی اساسی داشته است.

در گدازه‌های آتشفشانی شمال یوسف‌خان‌کندی، مقادیر  $Fe_2O_3^*$  از  $3/2$  تا  $14/1$  درصد وزنی در تغییر است (شکل ۷ - b). تغییرات  $Fe_2O_3^*$  به  $SiO_2$  از گدازه پیکروبارالتی به سمت گدازه تراکیتی دارای شیب زیاد است که می‌توان به تبلور تفریقی کلینوپیروکسن (Giuseppe et al., 2018; Aydınçakir et al., 2013) و یا الیوین همراه با کلینوپیروکسن نسبت داد (Keskin et al., 2008).

مقادیر  $TiO_2$  در سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه از  $0/4$  تا  $1/5$  درصد وزنی در تغییر است (شکل ۷ - c). در نمودار تغییرات  $TiO_2$  نسبت به  $SiO_2$  یک روند کاهشی از سمت نمونه‌های بازیک به سمت نمونه‌های تراکیتی دیده می‌شود که با تفریق کانی-های کلینوپیروکسن و اکسیدهای تیتانیوم و آهن قابل توجیه است (Wang et al., 2017; Renjith et al., 2016; Temel et al., 2010; Kumral et al., 2006).

مقادیر  $P_2O_5$  در گدازه‌های آتشفشانی مورد مطالعه از  $0/1$  تا  $1/1$  درصد وزنی متغیر است (شکل

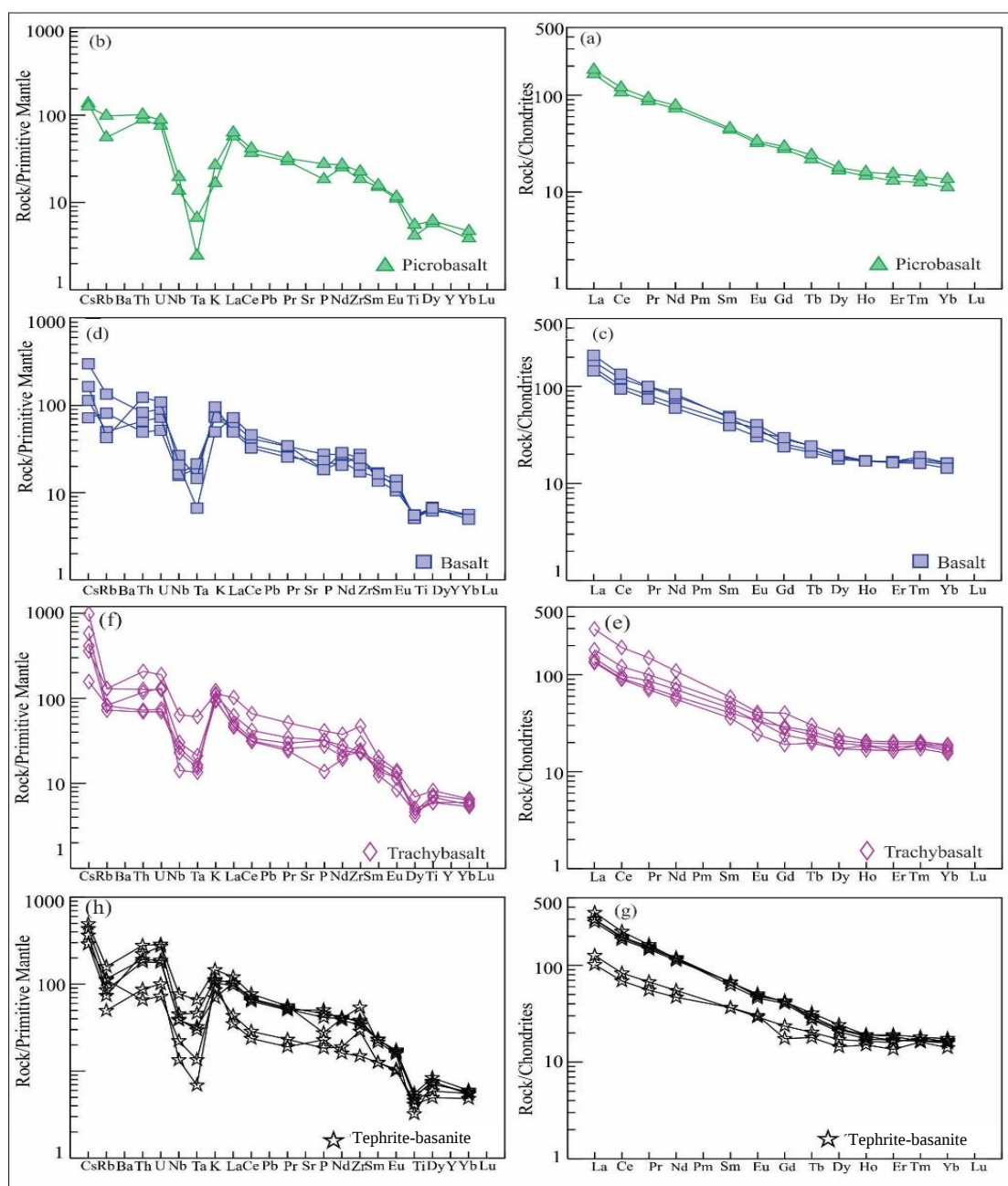


شکل ۷- نمودارهای دوتایی هارکر که نشان‌دهنده تغییرات برخی اکسیدهای عناصر اصلی نسبت به  $\text{SiO}_2$  است.

Fig.7. Binary Harker diagrams showing variation of some major element oxides versus  $\text{SiO}_2$ .

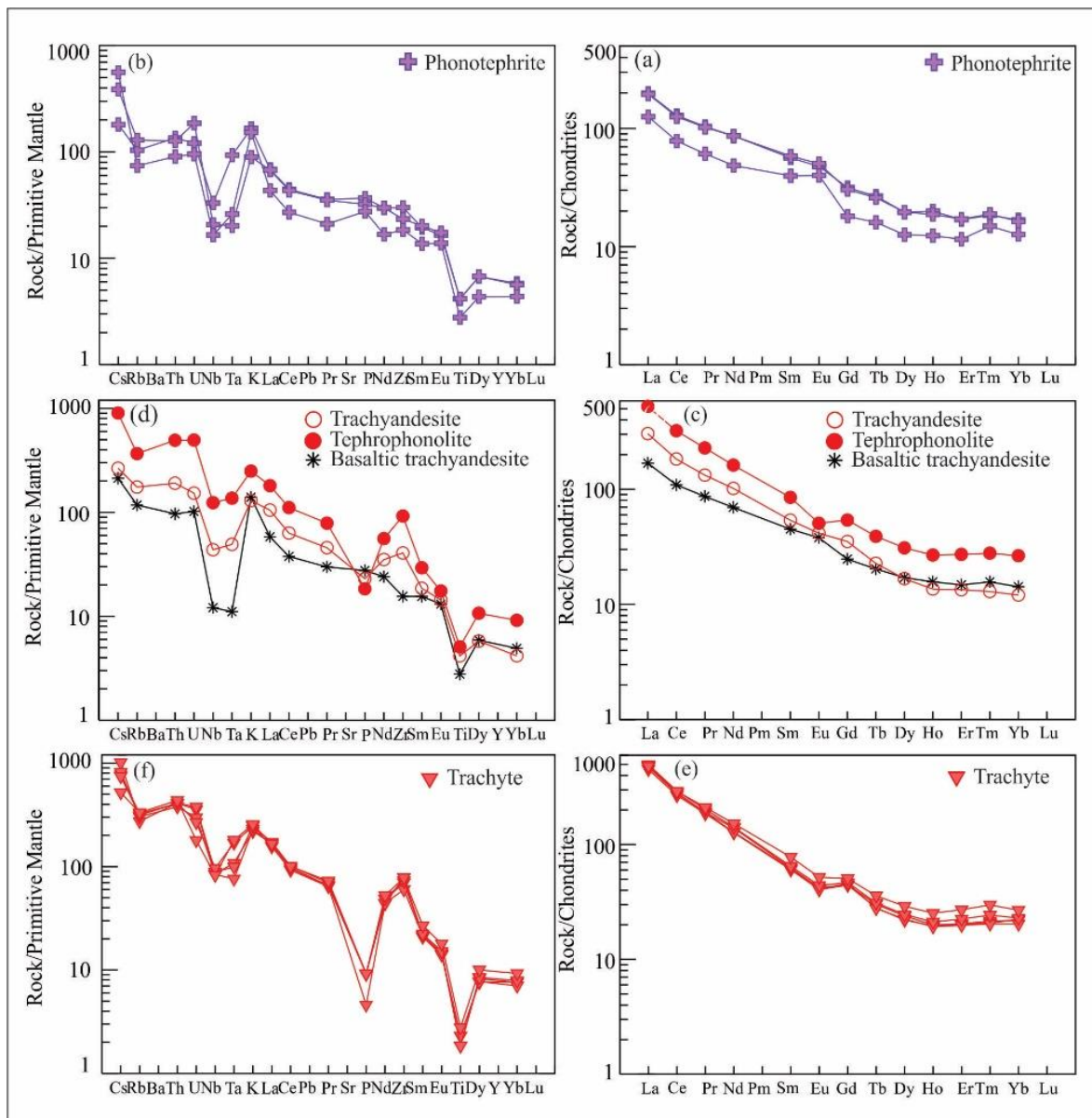
گدازه‌های فنوتفریتی (شکل ۹- a و b)، تراکی آندزیتی-تفروفنولیتی-بازالتیک تراکی آندزیتی (شکل ۹- c و d) و گدازه تراکییتی (شکل ۹- e و f) نشان داده شدند.

الگوهای عناصر نادر خاکی و نمودارهای عنکبوتی در شکل‌های ۸ و ۹، الگوهای عناصر نادر خاکی و عنکبوتی بهنجار شده با مقادیر کندریت و گوشته اولیه شامل گدازه پیکروبازالتی (شکل ۸- a و b)، گدازه بازالتی (شکل ۸- c و d)، گدازه تراکی‌بازالتی (شکل ۸- e و f)، گدازه تفریت بازانییتی (شکل ۸- g و h)،



شکل ۸- الگوهای عناصر نادر خاکی و نمودارهای عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه. a, c, e و g) الگوهای عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت (Sun and McDonough, 1989). b, d, f و h) نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده با مقادیر گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989).

Fig.8. REE patterns and spider diagrams of the studied volcanic rocks. a, c, e, g) REE patterns normalized to chondrite (Sun and McDonough, 1989). b, d, f, h) spider diagrams normalized to primitive mantle (Sun and McDonough, 1989).



شکل ۹- الگوهای عناصر نادر خاکی و نمودارهای عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه. a, c, e, g) الگوهای عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت (Sun and McDonough, 1989). b, d, f, h) نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده با مقادیر گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989).

Fig.9. REE patterns and spider diagrams of the studied volcanic rocks. a, c, e, g) REE patterns normalized to chondrite (Sun and McDonough, 1989). b, d, f, h) spider diagrams normalized to primitive mantle (Sun and McDonough, 1989).

نسبت بالای LREE/HREE در سنگ‌های آذرین مطرح شده است. غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE و تغییرات ملایم در مقادیر MREE در

این گدازه‌ها، دارای غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE بوده و مقادیر آن‌ها از La به سمت Yb کاهش یافته است. نقطه نظرهای مختلفی در رابطه با

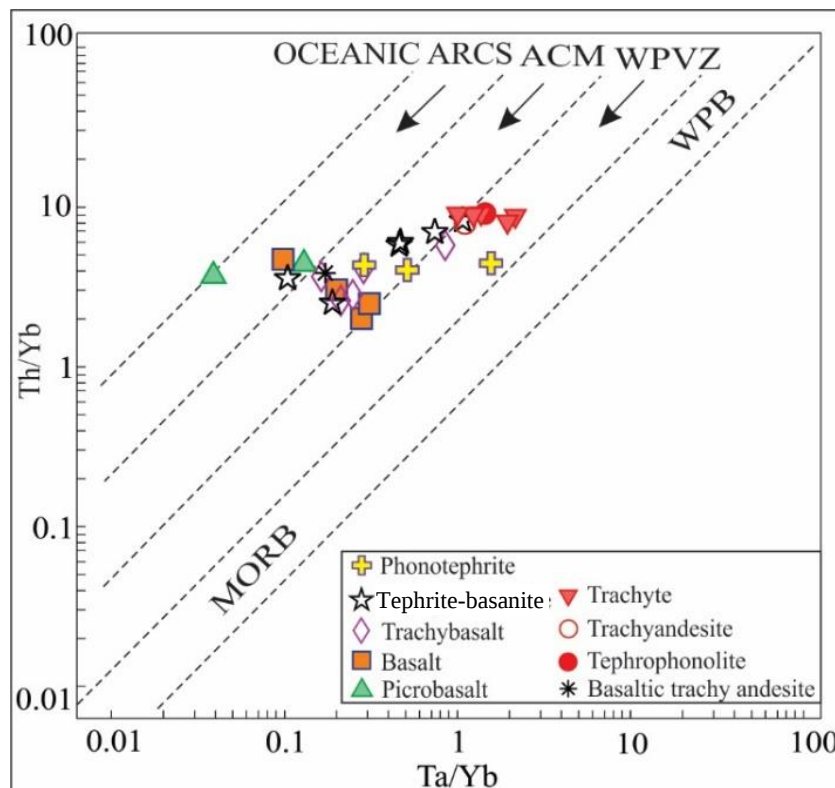
گدازه‌های آتشفشانی مورد مطالعه، می‌تواند ناشی از حضور گارنت در سنگ منشاء باشد (e.g. Lechmann et al., 2018; Özdemir et al., 2016). بر اساس مطالعات کایگوسوز و همکاران (Kaygusuz et al., 2017) نسبت بالای LREE/HREE ممکن است ناشی از ذوب بخشی گوشته غنی شده (از جمله آستنسفر) باشد. بر اساس مطالعات ایتالیانو و همکاران (Italiano et al., 2017)، غنی‌شدگی از عناصر با سازگاری بالا و LREE می‌تواند ناشی از ذوب بخشی یک خاستگاه غنی شده و یا ذوب بخشی درجه پایین و متناوب گوشته تهی شده باشد (Wilson and Downes, 2006).

در شکل ۸ و ۹، نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده با مقادیر گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، دارای تهی‌شدگی عناصر Rb, Nb, Ta, Ti و P در برخی از نمونه‌ها و غنی‌شدگی عناصر Cs, Th, U, La, K و Zr در برخی دیگر را دارد که به ماگماتیسم مناطق فرورانش و یا به آرایش، هضم و ذوب بخشی پوسته نسبت داده شده است (Gill, 2010). تهی‌شدگی عناصر Ti, Nb و Ta و همچنین شیب نمودارها از سمت عناصر نادرخاکی سبک (LREE) به سمت عناصر نادرخاکی سنگین (HREE) به عنوان یکی از دلایل منشاء گوشته‌ای دگرسان شده ذکر شده است (e.g. Lechmann et al., 2018). تهی‌شدگی از عناصر دارای قدرت میدان

بالا (HFSE) می‌تواند علاوه بر جایگاه فرورانشی، ناشی از ذوب بخشی گوشته‌ای باشد که پیشتر تحت تاثیر مولفه‌های فرورانش (سیالات و مذاب) دگرسان شده است (Sokół et al., 2018). مقادیر بالای عناصر K, Rb, Sr, Ba, Th و U همراه با غنی‌شدگی LREE به HREE نیز می‌تواند نشانگر تاثیر سیالات مرتبط با فرورانش بر منشاء گوشته‌ای باشد که در مناطق کم‌انرژی گزارش شده‌اند (Haq Siddiqui et al., 2007). براساس مطالعات کارمالکار و همکاران (Karmalkar et al., 2005) گدازه‌هایی که دارای تهی‌شدگی Ti, Zr و یا Sr هستند، ممکن است از یک گوشته کم‌عمق و یا از گوشته لیتوسفری زیرقاره (SCLM) منشاء گرفته باشند، که می‌توان به عنوان خاستگاهی جهت گدازه‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه در نظر گرفت.

#### جایگاه تکتونوماگمایی

از نمودار نسبت Th/Yb به Ta/Yb جهت تشخیص جایگاه تکتونوماگمایی سنگ‌های آتشفشانی شمال یوسف‌خان‌کندی استفاده شد. در این نمودار، قلمروهای بازالت پشته‌میان‌اقیانوسی، بازالت درون‌صفحه‌ای، پهنه آتشفشانی درون‌صفحه‌ای، حاشیه فعال قاره‌ای و کمان اقیانوسی مشخص شده‌اند (شکل ۱۰). اغلب سنگ‌های آتشفشانی محدوده یوسف‌خان‌کندی، نسبت بالایی از Th/Yb به Ta/Yb دارند و در قلمرو حاشیه فعال قاره و پهنه آتشفشانی درون‌صفحه‌ای قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۰- جایگاه تکتونوماگمایی نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار نسبت  $Th/Yb$  به  $Ta/Yb$  (Gorton and Schandle, 2002) که در آن قلمروهای بازالت درون صفحه (WPB)، بازالت پشته میان اقیانوسی (MORB)، پهنه آتشفشانی درون صفحه‌ای (WPVZ)، حاشیه فعال قاره‌ای (ACM) و کمان اقیانوسی (Oceanic Arcs) مشخص شده است.

Fig. 10. Tectono-magmatic setting of the studied samples in the  $Th/Yb$  vs.  $Ta/Yb$  diagram (Gorton and Schandle, 2002), in which, the fields for within plate basalt (WPB), mid-ocean ridge basalts (MORB), within plate volcanic zone (WPVZ), active continental margin (ACM), and oceanic arcs are recognized.

توسط (Lisboa et al., 2019; Pearce, 1983) که توسط

مولفه‌های فرورانس غنی شده است.

با توجه به قرارگیری اکثر نمونه‌ها در قلمروهای حاشیه فعال قاره و پهنه آتشفشانی درون صفحه‌ای، این گمان تقویت می‌شود که شاید ولکانیسم ائوسن منطقه مورد مطالعه در یک محیط کششی پس از برخورد صورت گرفته باشد. جهت اطمینان بیشتر، از نمودارهای تکتونوماگمایی دیگر نیز استفاده شد (شکل ۱۱). در نمودار نسبت  $Th/Ta$  به  $Yb$  (Gorton and Schandle, 2002)، قلمروهای بازالت-های میان اقیانوسی، پهنه آتشفشانی درون صفحه‌ای،

غنی‌شدگی  $Th$  نسبت به  $Ta$  و نسبت بالای

$Th/Yb$  به  $Ta/Yb$  می‌تواند ناشی از تاثیر مولفه‌های

فرورانس بر خاستگاه گوشته‌ای نمونه‌های مورد مطالعه

باشد (Gill, 2010; Karacık et al., 2013; Pearce

et al., 1984; Pearce and Peate, 1995; Pearce,

1983). نسبت بالای  $Th/Yb$  همچنین نمایانگر یک

منشأ گوشته‌ای غنی شده است و مقدار آن قابل قیاس

با ماگمایی است که در حاشیه فعال قاره‌ای یافت می-

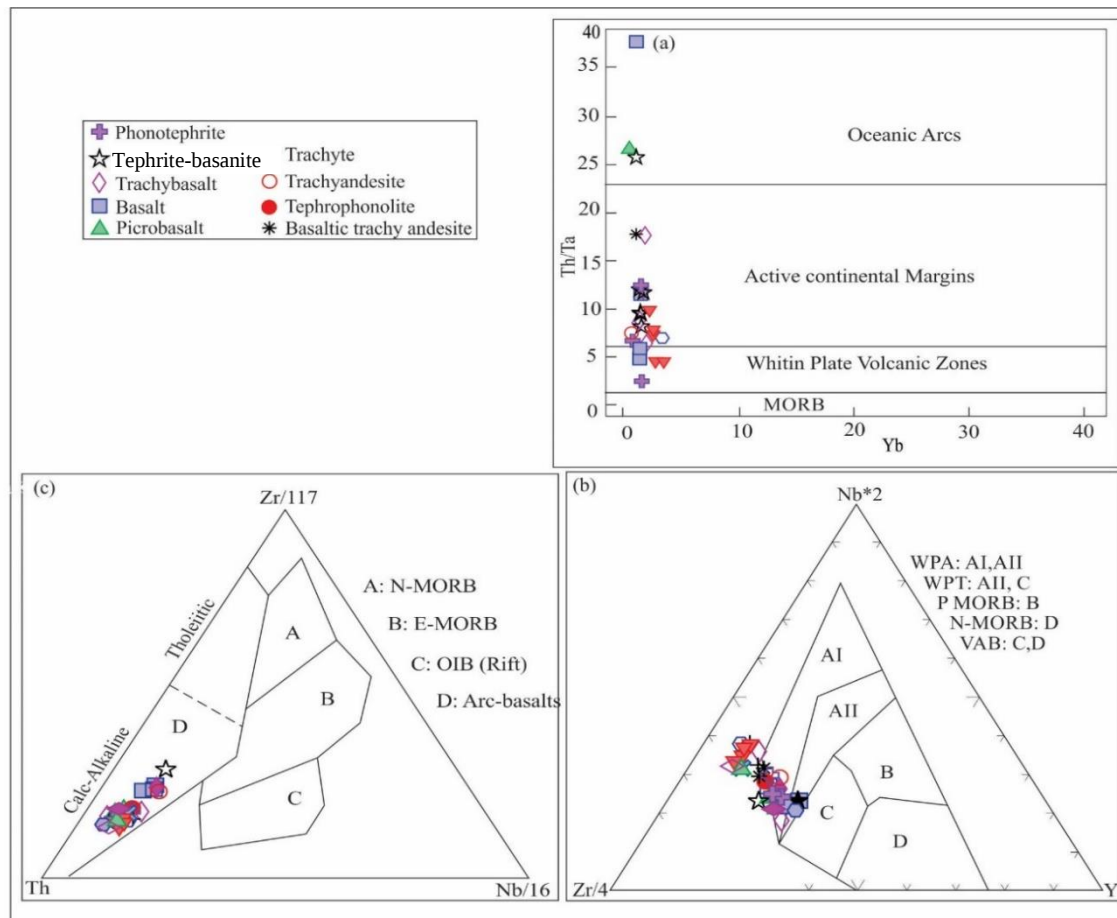
شود (شکل ۱۰). همچنین نسبت بالای  $Th/Yb$  به

$Ta/Yb$  از جمله نشانه‌های ژئوشیمیایی منشأ گوشته-

ای ناهمگن است (Brown et al., 1984; Carvalho

حاشیه فعال قاره‌ای و کمان اقیانوسی از یکدیگر

تفکیک شده‌اند (شکل ۱۱ - a).



شکل ۱۱- جایگاه نکتونوماگمایی نمونه‌های مورد مطالعه. (a) نمودار  $Yb$  نسبت به  $Th/Ta$  (Gorton and Schandle, 2002). (b) نمودار سه‌تایی  $Nb*2-Zr/4-Y$  (Meschede, 1986) که در آن قلمروهای آلکالی بازالت درون صفحه‌ای (WPA)، تولیت درون صفحه‌ای (WPT)، مورب نوع پلوم (P-MORB)، مورب نوع عادی (N-MORB)، و بازالت کمان آتشفشانی (VAB) متمایز شده‌اند. (c) نمودار سه‌تایی  $Th-Zr/117-Nb/16$  (Wood, 1980) که در آن بازالت‌های مورب عادی (N-MORB)، مورب غنی‌شده (E-MORB)، بازالت جزایر اقیانوسی (OIB)، و بازالت کمائی (arc basalt) قابل تشخیص است.

Fig.11. Tectono-magmatic setting of the studied samples. a)  $Yb$  vs.  $Th/Ta$  diagram (Gorton and Schandle, 2002), in which the fields for the oceanic arc, active continental margin and within plate volcanic zone are distinguished. b) Ternary  $Nb*2-Zr/4-Y$  diagram (Meschede, 1986) in which the fields for the within plate alkali basalt (WPA), within plate tholeiite (WPT), plume-mid ocean ridge basalt (P-MORB), normal-mid ocean ridge basalt (N-MORB), and volcanic arc basalt (VAB) are recognized. c) Ternary  $Th-Zr/117-Nb/16$  diagram (Wood, 1980), in which the fields for normal mid ocean ridge basalt (N-MORB), enriched mid ocean ridge basalt (E-MORB), oceanic basalt (OIB), and arc basalt are distinguished.

محدوده درون صفحه‌ای و کمان اقیانوسی قرار گرفته‌اند. در نمودار سه تایی  $Nb*2-Zr/4-Y$

در این نمودار اغلب سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه، در قلمرو حاشیه فعال قاره و تعدادی هم در

متاسوما تیزه در محیط آبدار تا خشکی فوران نموده و توالی آتشفشانی-رسوبی شمال یوسف‌خان‌کندی را تشکیل داده باشند. فرضی که اثبات آن نیاز به بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی تکمیلی دارد.

### نتیجه‌گیری

در شمال یوسف‌خان‌کندی، شمال لاهرود (استان اردبیل)، توالی آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن با دگرشیبی زاویه‌دار بر روی آمیزه رنگین افیولیتی الهیارلو و سنگ‌های کربناته کرتاسه بالایی نهشته شده‌اند. قاعده این توالی از کنگلومرا تشکیل شده و به سمت بالا، برش اپی‌کلاستیک و گدازه بالشی، نهشته-های رسوبی، تناوبی از گدازه فیریک-مگافیریک، ایگنمبریت و در راس آن گدازه‌های الیوین بازالتی و پیکریتی قرار گرفته‌اند. مطالعات دیرینه‌شناسی بر روی عدسی‌های سنگ آهک در این توالی، سن ائوسن میانی-بالایی را نشان داده است. با توجه به کاهش حجم کنگلومرا، برش اپی‌کلاستیک، گدازه بالشی و دیگر سنگ‌های رسوبی از قاعده به سمت بالای توالی و افزایش حجم گدازه‌های فیریک-مگافیریک و ایگنمبریت، می‌توان گفت که فوران‌های آتشفشانی ائوسن، در شمال یوسف‌خان‌کندی، از محیط زیرآبی به سمت خشکی تغییر یافته است.

بافت میکروسکوپی غالب در گدازه‌های منطقه مورد مطالعه پورفیریک است. بر اساس مطالعات پتروگرافی و بهره‌گیری از نمودارهای نامگذاری ژئوشیمیایی، گدازه‌های آتشفشانی مورد مطالعه در این توالی شامل پیکروبازالت، بازالت، تفریت بازانیت، تراکی بازالت، بازالتیک تراکی آندزیت، فنوتفریت، تفروفنولیت، تراکی آندزیت، تراکیت هستند. اغلب

(Meschede, 1986) بازالت‌های آلکالن درون‌صفحه-ای، تولیت‌های درون‌صفحه‌ای، بازالت‌های کمان آتشفشانی، N-MORB و P-MORB متمایز شده‌اند (شکل ۱۱-b). در این نمودار، نمونه‌های مورد مطالعه در قلمروهای مرتبط با فروران‌ش ترسیم شدند. در نمودار سه تایی Th-Zr/117-Nb/16 (Wood, 1980)، محیط‌های تکتونوماگمایی شامل بازالت‌های مورب عادی (N-MORB)، مورب غنی شده (E-MORB)، بازالت‌های جزایر اقیانوسی (OIB)، و بازالت کمانی تفکیک شده‌اند (شکل ۱۱-c). سنگ‌های آتشفشانی محدوده مورد مطالعه، در قلمرو بازالت‌های کمانی قرار گرفته‌اند. قرار گرفتن نمونه‌های مورد مطالعه، در قلمرو بازالت کمانی این گمان را تقویت می‌کند که خاستگاه گوشته‌ای سنگ‌های آتشفشانی شمال یوسف‌خان‌کندی با مولفه‌های فروران‌ش غنی شده است (Özdemir et al., 2016).

به دنبال باز شدن حوضه اقیانوسی نئوتتیس در تریاس بالایی در شمال باختری ایران، همگرایی صفحه عربی و اورازیا و بسته شدن این حوضه طی کرتاسه بالایی-پالئوسن زیرین (e.g. Khalatbari et al., 2016)، این ناحیه به مدتی طولانی تحت تاثیر عملکرد پوسته اقیانوسی فرورونده بوده است. برخورد صفحه‌ها در بازه‌های زمانی مختلف طی سنوزوئیک (e.g. Khalatbari Jafari et al., 2016) و فروران‌ش رو به شمال بقایای پوسته اقیانوسی، سبب تاثیر مولفه‌های فروران‌ش (از جمله سیالات) بر روی گوشته زیر قاره و غنی‌شدگی و دگرسانی آن شده است. این احتمال وجود دارد، که در اثر کشش پس از برخورد، ماگمای حاصل از ذوب بخشی گوشته

گوشته لیتوسفری زیر قاره که پیشتر توسط مولفه‌های فرورانشی غنی شده بود، دچار ذوب بخشی شده و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن شمال یوسف‌خان‌کندی در یک محیط کششی پس‌برخوردی تشکیل شده‌اند.

### تشکر و قدردانی

مدیریت محترم سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مرکز تبریز امکانات صحرایی و آزمایشگاهی را جهت انجام این مطالعات فراهم نمودند. آقای مهندس خوش زارع امیرخیز کارشناس آن مرکز و آقای رضا عشقی همکار نقلیه، همکاری لازم را در صحرا داشته‌اند. در خاتمه از سه داور محترم و همچنین آقایان دکتر محمدرضا قاسمی و دکتر مرتضی دلاوری که با کامنت‌های اصلاحی سبب ارتقاء کیفیت مقاله شده‌اند، قدردانی می‌شود.

این گدازه‌ها، سری ماگمایی آلکالن و شوشونیتی داشته و بیشتر نمونه‌ها ماهیت انتقالی و پتاسیک و تعدادی نیز ماهیت سدیک دارند. ماهیت انتقالی در تعدادی از نمونه‌ها، ممکن است مربوط به آمیختگی ماگماهای اولیه سدیک با پتاسیک باشد. به نظر می‌رسد که تفریق ماگمایی نقش اساسی در ژنز سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه داشته است. در الگوهای عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت و نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده با گوشته اولیه، ویژگی‌های ژئوشیمیایی مناطق فرورانش دیده می‌شود. بررسی نمودارهای تکتونوماگمایی نشان می‌دهد که بیشتر گدازه‌های آتشفشانی مورد مطالعه، در قلمروی حاشیه فعال قاره‌ای و تعدادی نیز تمایل درون صفحه‌ای دارند. به نظر می‌رسد که به دنبال همگرایی صفحه عربستان با اوراسیا، و فرورانش نتوتیس،

### References

- Ahmadzadeh, Gh., Jahangiri, A., Lentz, D. and Mojtahedi, M., 2010. Petrogenesis of Plio-Quaternary post-collisional Ultrapotassic volcanism in NW of Marand, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 39, 37-50.
- Alavi, M., 1991. Tectonic Map of Middle East in scale 1:5000000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Alici, P., Temel, A., Gourgaud, A., Kieffer, G., Gündoğdu, M.N., 1998. Petrology and geochemistry of potassic rocks in the Gölcük area (Isparta, SW Turkey): genesis of enriched alkaline magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 85, 423-446.
- Allègre, C. J., Provost, A. & Jaupart, C., 1981. Oscillatory zoning: a pathological case of crystal growth. *Nature* 294, 223-228.
- Allen, M., Jackson, J., and Walker, R., 2004. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia Collision and the Comparison of short-term and

- long-term deformation rates. *Tectonics* 23. <https://doi.org/10.1029/2003TC001530>.
- Amini, S., Shydaie, L., 1995. Petrology of the volcanic rocks in the northwest of MeshkinShar. *Geosciences-Tehran university* 34 (1), 1-12. (In Persian).
- Aydınçakır, E., Şen, C., 2013. Petrogenesis of the post-collisional volcanic rocks from the Borçka (Artvin) area: Implications for the evolution of the Eocene magmatism in the Eastern Pontides (NE Turkey). *Lithos* 172-173, 98-117.
- Aydin, F., Karsli, O., Sadiklar, B. M., 2009. Compositional Variations, Zoning Types and Petrogenetic Implications of Low-pressure Clinopyroxenes in the Neogene Alkaline Volcanic Rocks of Northeastern Turkey", *Turkish Journal of Earth Sciences* 18, 163-186.
- Babakhani, A.R., Khan Nazer, N., 1991. Geological Map of Lahrud, Scale 1: 100,000, Geological Survey of Iran.
- Barzegar, A., M. Pourkermani, A., 2010. Structural evolution of folded zone of Allahyarlu in

- western Alborz. – 21st Congress of Geological Sciences and 15th Congress of Geological Survey of Iran. Urmia University (In Persian).
- Bottinga, Y., Kudo, A. & Weill, D. 1966. Some observations on oscillatory zoning and crystallization of magmatic plagioclase. *American Mineralogist* 51, 792–806.
- Brown, G.C., Thorpe, R.S., Webb, P.C. 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of Geological Society of London* 141, 413–426.
- Carvalho Lisboa, V.A., Conceicao, H., Silva Rosa, M.L., Fernandes, D.M., 2019. The onset of post-collisional magmatism in the Macurure Domain, Sergipano Orogenic System: The Gloria Norte Stock. *Journal of South American Earth Sciences* 89, 173–188.
- Cox, K.G., Bell, J.D., and Pankhurst, R., 1979. The interpretation of igneous rocks. Allen and Unwin, London, 450p.
- Didon, J., Gemain, Y.M., and Revised by: Lescuyer, J.L., Riou, R., Babakhani, A., 1978. Geological Map of Ahar, scale 1:250.000. Geological Survey of Iran.
- Dilek, Y., and Sandvol, E., 2009. Seismic Structure, Crustal Architecture and Tectonic Evolution of the Anatolian-African Plate Boundary and the Cenozoic Orogenic Belts in the Eastern Mediterranean Region, in Murphy, B., Keppie, J.D., and Hynes, A., eds., *Ancient Orogens and Modern Analogues*. Geological Society of London Special Publication 327, 127–160.
- Esmaili, S., Pourmaafi, M., Asadpour, M., 2013. Petrographic and geochemical investigation of the Alkaline potassic rocks in the southern of the Islamic island, in 17th Symposium of Geological Society of Iran. (In Persian).
- Faridi, M., Khalatbari Jafari, M., 2006. Geological Map of Khoja, Scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Gill, J.B. 2010. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Springer, Berlin, 472p.
- Ginibre, C., Woerner, G. and Kronz, A., 2002. Minor and trace element zoning in plagioclase: implications for magma chamber processes at Parinacota volcano, northern Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 143, 300–315.
- Giuseppe, P.D., Agostini, S., Manetti, P., Yilmaz Savaşçın, M., Conticelli, S., 2018. Sub-lithospheric origin of Na-alkaline and calc-alkaline magmas in a post-collisional tectonic regime: Sr-Nd-Pb isotopes in recent monogenetic volcanism of Cappadocia, Central Turkey. *Lithos* 316–317, 304–322.
- Gorton M.P., Schandle E.S., 2002. Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology* 97, 629–642.
- Haq Siddiqui, R., Asifkhan, M., Qasim jan, M., 2007. Geochemistry and petrogenesis of the Miocene alkaline and sub-alkaline volcanic rocks from the Chagai arc, Baluchistan, Pakistan: Implications for porphyry Cu-Mo-Au deposits. *Journal of Himalayan Earth Sciences* 40,1-23.
- Humphreys M.C.S., Blundy J.D., Sparks S.J., 2006. Magma evolution and opensystem processes at shiveluch volcano: insights from phenocryst zoning. *Journal of Petrology* 47 (12), 2303-2334.
- Irvine, T.N., and Baragar., W.R.A. 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Science* 8, 523-548.
- Italiano, F., Yuce, G., Di Bella, M., Rojay, B., Sabatino, G., Tripodo, A., Martelli, M., Rizzo, A.L., Misseri, M., 2017. Noble gases and rock geochemistry of alkaline intraplate volcanics from the Amik and Ceyhan-Osmaniye areas, SE Turkey. *Chemical Geology* 469, 34-46. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.04.003>.
- Karacık, Z., Genc, S.C., Gulmez, F. 2013. Petrochemical features of Miocene volcanism around the Cubukludag graben and Karaburun peninsula, western Turkey: Implications for crustal melting related silicic volcanism". *Journal of Asian Earth Sciences* 73, 199-217. DOI: 10.1016/j.jseae.2013.04.001
- Karmalkar, N.R., Rege, S., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., 2005. Alkaline magmatism from Kutch, NW India: Implications for plume–lithosphere interaction. *Lithos* 81, 101– 119.

- Kaygusuz, A., Öztürk, M., 2015. Geochronology, geochemistry, and petrogenesis of the Eocene Bayburt intrusions, Eastern Pontides, NE Turkey: evidence for lithospheric mantle and lower crustal sources in the High-K calc-alkaline magmatism. *Journal of Asian Earth Sciences* 108, 97-116. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.04.017>
- Kaygusuz, A., Aslan, Z., Aydınçakır, E., Yücel, C., Gücer, M.A., Şen, C., 2017. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotope characteristics of the Miocene to Pliocene volcanic rocks from the Kandilli (Erzurum) area, Eastern Anatolia (Turkey): Implications for magma evolution in extension-related origin. *Lithos* 296-299, 332-351. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.11.003>
- Keskin, M., Can Genç, S., Tüysüz, O., 2008. Petrology and geochemistry of post-collisional Middle Eocene volcanic units in North-Central Turkey: Evidence for magma generation by slab breakoff following the closure of the Northern Neotethys Ocean. *Lithos* 104, 267-305.
- Khalatbari Jafari, M., Babaie, H.A., Moslempour., 2016. Mid-ocean-ridge to suprasubduction geochemical transition in the hypabyssal and extrusive sequences of major Upper Cretaceous ophiolites of Iran. *Geological Society of America*, doi:10.1130/2016.2525(07).
- Kumral, M., Coban, H., Gedikoglu, A., Kilinc, A., 2006. Petrology and geochemistry of augite trachytes and porphyritic trachytes from the Gölcük volcanic region, Isparta, SW Turkey: A case study. *Journal of Asian Earth Sciences* 27, 707-716.
- Lechmann, A., Burg, J.P., Ulmer, P., Guilong, M., Faridi, M., 2018. Metasomatized mantle as the source of Mid-Miocene-Quaternary volcanism in NW-Iranian Azerbaijan: Geochronological and geochemical evidence. *Lithos* 304-307, 311-328. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.01.030>
- Li, C., Thakurata, J., Ripley, E.M., 2012. Low-Ca contents and kink-banded textures are not unique to mantle olivine: evidence from the Duke Island Complex, Alaska. *Mineralogy Petrology* 104, 147-153.
- Meschede, M., 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology* 56, 207-263.
- Mobashergermi, M., Jahangiri, A., 2017. Geochemistry and petrogenesis of basaltic prisms from South of Germe city (Ardabil province). *Petrology* 31, 165-188. (In Persian).
- Nelson, S. T., Montana, A., 1992. Sieve-textured plagioclase in volcanic Rocks produced by Rapid decompression. *American Mineralogist* 77, 1242-1249.
- Özdemir, Y., 2016. Geochemistry of tholeiitic to alkaline lavas from the east of Lake Van (Turkey): Implications for a late Cretaceous mature supra subduction zone environment", *Journal of African Earth Sciences* 120, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.04.018>
- Pearce, J.A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries, in Thorpe, R.S., ed., *Andesites*. New York, NY. Wiley 525-548.
- Pearce, T. H. and Kolisnik, A. M. 1990. Observations of plagioclase zoning using interference imaging", *Earth-Science Reviews* 29, 9-26.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25, 938-956.
- Pearce, J.A., Peate, D.W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 23, 113-134.
- Renjith, M.L., Santosh, M., Satyanarayana, M., Subba Rao, D.V., Tang, L., 2016. Multiple rifting and alkaline magmatism in southern India during Paleoproterozoic and Neoproterozoic. *Tectonophysics* 680, 233-253, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.04.041>.
- Riou, R., 1979. Petrography of the Eocene alkaline lavas of the Northern Azerbaijan (Iran). *Neues Jahrb, Geol. Abh.* 9, 532-559.
- Sahakyan, L., Bosch, D., Sosson, M., Avagyan, A., Galoyan, G.H., Rolland, Y., Bruguier, O., Stepanyan, ZH., Galland, B., Vardanyan, S., 2016. Geochemistry of the Eocene magmatic

- rocks from the Lesser Caucasus area (Armenia): evidence of a subduction geodynamic environment, Geological Society, London, Special Publications 428, 73–98, <https://doi.org/10.1144/SP428.12>.
- Singer, B. S., Dungan, M. A. & Layne, G. D. 1995. Textures and Sr, Ba, Mg, Fe, K, and Ti compositional profiles in volcanic plagioclase: clues to the dynamics of calc-alkaline magma chambers. *American Mineralogist* 80, 776–798.
- Sokol, K., Halama, R., Meliksetian, KH., Savov, I.P., Navasardyan, G., Sudo, M., 2018. Alkaline magmas in zones of continental convergence: The Tezhsar volcano-intrusive ring complex, Armenia. *Lithos* 320–321, 172–19, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.08.028>.
- Soltanmohammadi, A., Rahgoshay, M., 2015. Mineralogy and geochemistry of analcime bearing alkaline rocks in Salavat range, Azerbaijan Magmatic Plateau, NW Iran. *Petrology* 22, 91–118. (In Persian).
- Soltanmuhammadi, A., 2018. Sources of the alkaline magmatism in the Turkish-Iranian Plateau: a link with the dynamic of stagnant lithospheres within the Mantle Transition Zone. Toulouse University Corporation with Shahid Beheshti University 285p. (In Persian).
- Sudi Ajirlu, M., Jahangiri, A., 2010. Petrography and tectonic setting of Allahyarlu ophiolite. 21st Congress of Geological Sciences, Geological Survey of Iran (In Persian).
- Sudi Ajirlu, M., Jahangiri, A., Moayyed, M., 2010. Relative dating of Allahyarlu ophiolite emplacement based on dating of limestones in core of Allahyarlu anticline, NW Iran. 2016. 5th Iranian Congress of Paleontology, Environmental Science Research Center, Kerman (In Persian).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society of London, Special Publication 42, 313–345.
- Temel, A., Yürür, T., Alıcı, P., Varol, E., Gourgaud, A., Bellon, H., Demirbağ, H., 2010. Alkaline series related to Early-Middle Miocene intra-continental rifting in a collision zone: An example from Polatlı, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences* 38, 289–306.
- Wang, F., Xu, Y.G., Xu, W.L., Yang, L., Wu, W., Sun, C.Y., 2017. Early Jurassic calc alkaline magmatism in northeast China: Magmatic response to subduction of the Paleo-Pacific Plate beneath the Eurasian continent. *Journal of Asian Earth Sciences* 143, 249–268, <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.04.018>.
- Willshire, H. G., Mc Guitre, A. V., 1996. Magmatic in filtration and melting in the lower crust and upper Mantle beneath the cime volcanic field, Colifornia. *contribution Mineralogy and Petrology* 123, 358–378. <https://doi.org/10.1007/s004100050162>.
- Wilson, M. and Downes, H. 2003. Tertiary-Quaternary intraplate magmatism in Europe and its relationship to mantle dynamics. In: Gee, D.G. and Stephenson, R. (eds.) *European lithosphere dynamics*. Geological Society of London Memoir 32. London: Geological Society of London 32, 147–166. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.09>.
- Winchester, J., Floyd, P.A., 1976. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20, 325–343.
- Wood, D.A., 1980. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters* 50, 11–30.