

Research Article

Geochemistry, petrography, and tectono-magmatic setting of Eocene volcanic lavas in the south of Mamoniye, Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Markazi Province, Iran

Mohammad Goudarzi¹, Hassan Zamanian²✉, Urs Klötzli³

¹ Ph.D. Candidate, Department of Geology, Faculty of Sciences, Lorestan University, Iran, goudarzi.mo@fs.lu.ac.ir

² Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Tehran, Iran, zamanian.h@lu.ac.ir

³ Professor, Department of Lithospheric Research, Faculty of Earth Sciences, Geography and Astronomy, University of Vienna, Austria, urs.kloetzli@univie.ac.at

ARTICLE INFO

Received: 20 November 2023

Accepted: 03 March 2024

Keywords

Urumieh-Dokhtar
Geochemistry
Subduction
Volcanism
Eocene



doi [10.22108/ijp.2024.139861.1315](https://doi.org/10.22108/ijp.2024.139861.1315)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The study area lies in the south of Mamoniye, a part of the Zaviyeh 1:100000 geological map, which covers the middle part of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc. The volcanic phases and the intrusive masses constitute the predominant rocks of the area which has been subjected to magmatic and tectonic activities. Thus, owing to the lack of detailed studies on the volcanic rocks of this area, we try to link the tectonic setting and the magmatic evolution of the rocks under study. In addition, magma evolution processes, such as fractional crystallization, crustal contamination, and magma mixing may play an important role in the genesis of these rocks. The present paper presents new petrological and geochemical data on these volcanic rocks, which were formed during the Eocene. The Urumieh Dokhtar Magmatic arc is characterized by a series of volcanic and plutonic rocks that formed during the Late Cretaceous to Early Miocene, approximately 95 to 20 million years ago, and extends for about 2,000 kilometers.

The magmatic rocks in the Urumieh Dokhtar Magmatic Arc are lavas, pyroclastic deposits, and plutonic rocks (i.e., granites and diorites) believed to have originated in the course of subduction of the Arabian plate beneath the Eurasian plate, which gave rise to the melting of the mantle. In this area, the Eocene volcanic units have been completely disrupted due to the influx of intrusive masses and high displacement by shear-compressional

faulting. Volcanic rocks in the region with over 4 km thick are composed of flows, pyroclastic layers, tuff, and ignimbrite.

Regional Geology

The Urumieh Dokhtar Magmatic arc is characterized by a series of volcanic and plutonic rocks formed during the Late Cretaceous to Early Miocene, approximately 20

✉ Corresponding Author

To cite this article: Goudarzi, M., Zamanian, H., Klötzli, U. (2024) Geochemistry, petrography, and tectono-magmatic setting of Eocene volcanic lavas in the south of Mamoniye, Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Markazi Province, Iran. *Petrological Journal*, 15(1), 85-116.

to 95 million years ago, extending for about 2,000 kilometers. The magmatic rocks in Urumieh Dokhtar Magmatic Arc include a variety of lithologies, such as lavas, pyroclastic deposits, and plutonic rocks (i.e., granites and diorites). These rocks were formed as a result of the subduction of the Arabian plate beneath the Eurasian plate, which led to the melting of the mantle and the formation of magma. In this area, the Eocene volcanic units have been completely disrupted due to the influx of intrusive masses and high displacement by shear-compressional faulting.

Research methodology

Preparation of a 1:20000 geological map of the area, sampling of surface volcanic units, and drilled boreholes were carried out simultaneously. Based on lithological diversity, 50 samples of volcanic rocks were collected, and 15 of those with the least amount of alteration were analyzed by ICP-MS and XRF methods. Using GCDkit software, petrogenesis and the development of the studied volcanic rocks were investigated.

Petrography

The main rock-forming minerals are plagioclase, K-feldspar, quartz, amphibole, biotite, and pyroxene, with small amount of olivine, apatite, zircon, and Fe-Ti oxides. Minor minerals include opaques, quartz, carbonate, epidote, chlorite, sericite, apatite, sphene, and zircon, accompanied by rare tremolite and actinolite. Fine-grained and idiomorphic apatites as well as short prismatic zircon crystals are found as inclusions in plagioclase and biotite, respectively. The predominant textures are clastic and porphyritic with trachytic and cryptocrystalline. Also, sieve intergranular, intersertal, hyalomicroclitic hyaloporphyritic, and microgranular are common textures.

Geochemistry

The amounts of SiO₂ and Al₂O₃ vary from 47 to 73 wt% and from 11.6 to 17.8 wt%, respectively. The total amounts of alkali elements in the investigated samples range from 4.5 to 10.1 wt%. As the different charts of rare elements display the magmatic series of rocks are in the range of basalt-andesite, calc-alkaline series, and dacite-rhyodacite of the calc-alkaline series. The ratios of Nb versus Nb/Zr, Sr/Zr versus Ti/Zr, Rb versus Rb/Sr, and Rb/Sr versus Ti/Zr show the effect of crystal segregation

and mixing processes during magma ascent, and the presence of large plagioclase and clinopyroxene crystals also support the hypothesis. In the spider diagram (primitive mantle-normalized multi-element spider) samples show enrichment in large ion lithophile elements (LILE), especially Rb, Ba, K, and Cs and depleted in high field strength elements (HFSE) (i.e., Ti, Yb, and Zr). The positive Pb and K anomaly can be caused by crustal involvement in magmatic processes. On the chondrite-normalized REE diagram, samples show an LREE-enriched and HREE-depleted pattern. The rather flat HREE patterns imply the absence of garnet and/or hornblende in the source of these magmas. The absence of Eu negative anomaly in non-altered volcanic rocks explains the high-water content or oxygen fugacity and an abundance of hornblende, pyroxene, sphene, and garnet may cause a positive Eu anomaly.

Discussion and Conclusion

Elevated LILE, and LREE, and depleted HFSE content of volcanic rocks in the south of Mamoniye indicate the metasomatized asthenospheric mantle source in a subduction zone. The presence of non-equilibrium textures such as sieve texture in plagioclase and opacification of amphiboles are probably related to crustal contamination. Zr/Y > 3 ratio in most samples corresponds to a continental volcanic arc rather than the oceanic arc. The available geochemical data show calc-alkaline magmatism occurred by 20 to 45% partial melting of a garnet-spinel lherzolite to spinel lherzolite. Trace elements reveal crustal contamination and magma mixing during the parent magma ascent as well as the role of fluids released from the subducting plate. The subduction-related process, including water and volatile materials released from the subducting slab, resulted in mantle wedge metasomatism and partial melting. This genetic model is consistent with other models suggested for the magmatism along the Urumieh-Dokhtar magmatic arc.

Acknowledgments

The authors are very grateful to the esteemed referees of Petrological Journal for their valuable suggestions for improving the scientific structure of the article.

زمین‌شیمی، سنگ‌شناسی و جایگاه تکتونوماگمایی گدازه‌های آتشفشانی ائوسن در جنوب مامونیه، کمان ماگمایی ارومیه-دختر، استان مرکزی، ایران

محمد گودرزی^۱، حسن زمانیان^۲ , اورس کلوتزلی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، ایران، goudarzi.mo@fs.lu.ac.ir

^۲ استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تهران، ایران، zamanian.h@lu.ac.ir

^۳ استاد، گروه تحقیقات لیتوسفر، دانشکده علوم زمین، جغرافیا و نجوم، دانشگاه وین، اتریش، urs.kloetzli@univie.ac.at

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۰۸/۲۹	منطقه مطالعاتی در جنوب مامونیه، استان مرکزی و در بخش میانی پهنه ماگمایی
تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۱۲/۱۳	ارومیه-دختر جای دارد. واحدهای سنگی آتشفشانی منطقه، شامل رخنمون‌های
کلید واژه‌ها	متنوعی از ریولیت، داسیت، تراکی داسیت، تراکیت، آندزیت، تراکی آندزیت، بازالت
مامونیه	تراکی آندزیت و تراکی بازالت با بافت بیشتر پورفیری هستند و در گروه ماگمایی
ارومیه-دختر	کالک آلکالن جای می‌گیرند. نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده به ترکیب گوشته
زمین‌شیمی	اولیه و کندریت گویای غنی‌شدگی در عنصرهای LILE، تهی‌شدگی از عنصرهای
فرورانش	HFSE و غنی‌شدگی عنصرهای LREE نسبت به HREE است که از ویژگی‌های
آتشفشانی	سنگ‌های کالک آلکالن در پهنه‌های فرورانش حاشیه قاره به‌شمار می‌روند و نشان
ائوسن	می‌دهند خاستگاه ماگمای پدیدآورنده سنگ‌ها، گوشته سست‌کرهای دگر نهاده در
	بالای تخته فرورنده بوده است. بررسی تغییرات عنصرهای کمیاب نشان‌دهنده
	رخداد آرایش با مواد پوسته‌ای و آمیختگی ماگما هنگام صعود ماگمای مادر و
	نقش سیال‌های آزاد شده از تخته فرورنده در ترکیب ماگمای مادر و تکامل
	فرایندهای تکتونوماگمایی منطقه است. گمان می‌رود خاستگاه ماگما از گوشته‌ای
	دگر نهاده با درجه ذوب بخشی ۲۰ تا ۴۵ درصد گارنت-اسپینل لرزولیت تا اسپینل
	لرزولیت بوده است. نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی نشان‌دهنده وابستگی
	سنگ‌های منطقه به محیط کمان آتشفشانی و پهنه فرورانشی است که با الگوهای
	تکتونوماگمایی پیشنهادی برای پهنه ماگمایی ارومیه-دختر و منطقه ساوه
	همخوانی دارد.



doi 10.22108/ijp.2024.139861.1315

 نویسنده مسئول

استناد به این مقاله: گودرزی، م.، زمانیان، ح.، کلوتزلی، ا. (۱۴۰۳) زمین‌شیمی، سنگ‌شناسی و جایگاه تکتونوماگمایی گدازه‌های آتشفشانی ائوسن در جنوب مامونیه، کمان ماگمایی ارومیه-دختر، استان مرکزی، ایران. پترولوژی ۱۵ (۱)، ۸۵-۱۱۶.

مقدمه

فرایندهای ماگمایی بیرونی و درونی گسترده در ایران در طول ائوسن که بیشترین حجم فعالیت‌های آتشفشانی در آن زمان رخ داده است، پیدایش سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری در گستره بزرگی از ایران را به دنبال داشته است (Jamshidzaei et al., 2021; Yousefi et al., 2021). الگوهای مختلفی برای توضیح تکامل پهنه ماگمایی ارومیه-دختر پیشنهاد شده است. باور عمیدی و همکاران (Amidi et al., 1984) بر پایه الگوی کافتی است؛ اما بیشتر الگوهای دیگر پیدایش را به صورت یک کمان قاره‌ای (Berberian et al., 1981) یا کمان جزیره‌ای دانسته‌اند (Shahabpour, 2007). قاسمی و تالبوت (Ghasemi and Talbot, 2007) خاستگاه پسابروردی را برای سنگ‌های آذرین پایان ائوسن میانی پیشنهاد کرده‌اند. درباره برخورد در پهنه ارومیه-دختر نظریه‌های گوناگونی پیشنهاد شده است که شامل برخورد نرم^۱ در الیگوسن آغازین (Allen and Armstrong, 2008; Agard et al., 2011; McQuarrie and van Hinsbergen, 2013; Moghadam et al., 2022) و برخورد سخت^۲ در ۲۰ میلیون سال پیش (Moghadam et al., 2022; Madanipour et al., 2017) و همچنین، نظریه‌ای در ارتباط با آغاز برخورد سخت در ۱۵ میلیون سال پیش است (Chiu et al., 2013; Pang et al., 2013; Raeisi et al., 2021; Babazadeh et al., 2023). ماگماتیسم پهنه ماگمایی ارومیه-دختر در طول ائوسن، با استقرار ماگماهای کالک‌آلکان مربوط به فرورانش (و توله‌ایتی-شوشونیتی) به اوج خود رسیده است (Omran et al., 2008; Verdel et al., 2011; Rabiee et al., 2020). پس از آغاز مرحله برخورد قاره‌ای در الیگوسن-میوسن، شدت فعالیت ماگمایی کاهش یافته است و سپس آرام‌آرام از شمال‌باختری به جنوب‌خاوری پایان یافته است (Chiu et al., 2013; Stern et al., 2021; Moghadam et al., 2022). سنگ‌های الترا پتاسیک (Ahmadzadeh et al., 2010; Pang et al., 2013; Moghadam et al., 2019; Lustrino et al., 2014) و آداکیتی

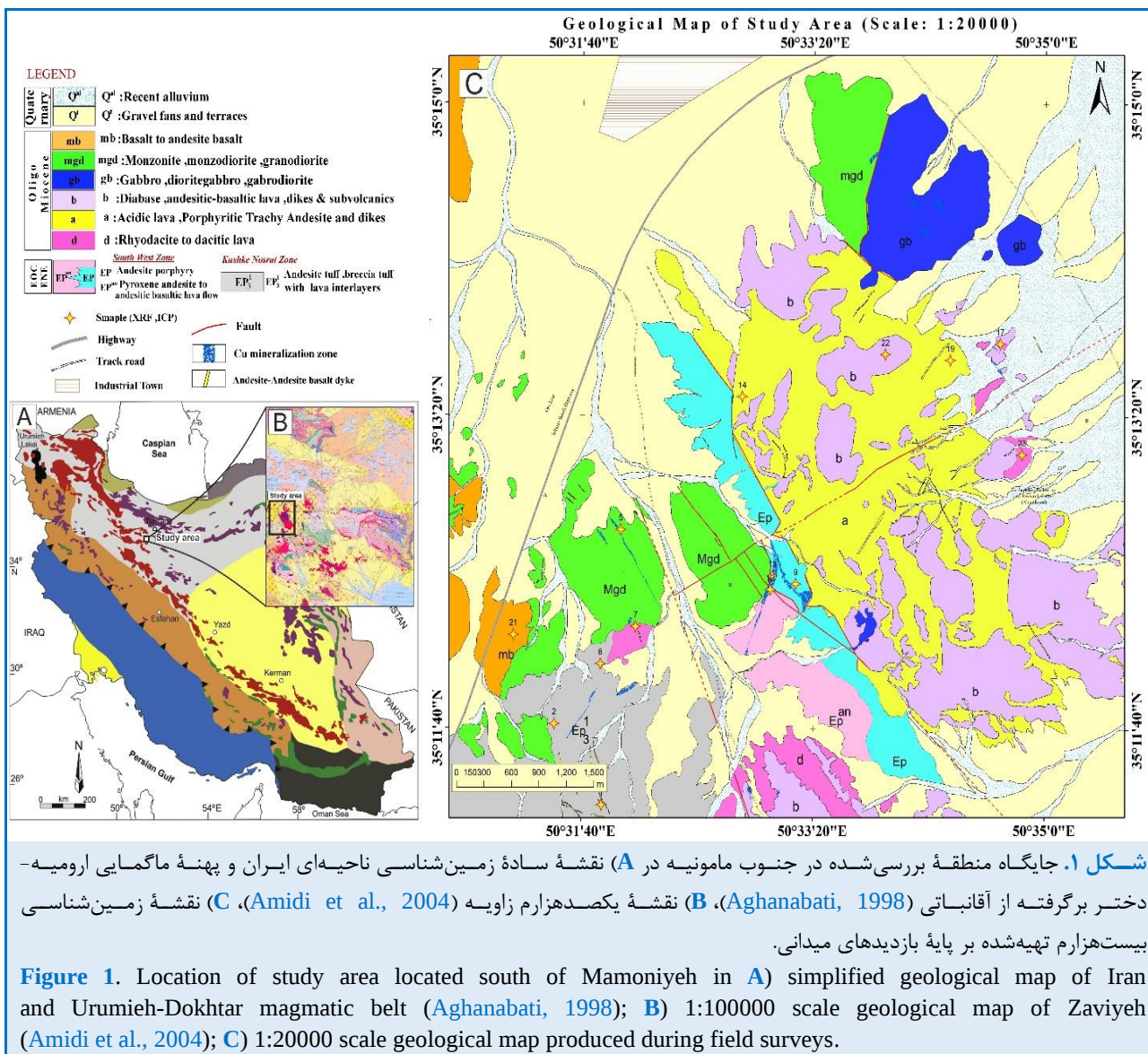
(Chaharlang et al., 2023; Salari et al., 2021) نیز در این مرحله نمایان شده‌اند. ماگماتیسم سنوزویک ارومیه-دختر به دو بخش آلومینیم بالا و کم آلومینیم دسته‌بندی شده است که گروه آلومینیم بالا در ارتباط با فعالیت‌های پیش از برخورد و گروه کم آلومینیم در ارتباط با فعالیت‌های پسابروردی هستند (Babazadeh et al., 2022). همچنین، بابازاده و همکاران (Babazadeh et al., 2023) ماگماتیسم بخش مرکزی ارومیه-دختر را به دو دوره ماگمایی در ۳۸-۴۲ میلیون سال و ۱۸-۲۵ میلیون سال دسته‌بندی کرده‌اند. بر این اساس برگشت تخته فرورانده شده^۳ نئوتتیس در بازه زمانی ۴۲ تا ۲۵ میلیون سال پیش رخنمون ماگماتیسم قدیمی‌تری را در بخش‌های خاوری و ماگماتیسم جوان‌تری را در بخش‌های باختری این پهنه ماگمایی پدید آورده است.

برپایه تازه‌ترین یافته‌ها، سنگ‌های ملانفلینی-ملیلیتی التراکلسیک الترابازیک که در محیط‌های زمین‌ساختی برخوردی بسیار نا معمول هستند، پیچیدگی فرایندهای سنگ‌زایی در کمان ماگمایی ارومیه-دختر یا UDMA^۴ را نشان می‌دهند (Lustrino et al., 2021). منطقه بررسی‌شده در استان مرکزی و در کیلومتر ۸۸ اتوبان تهران-ساوه و در پنج کیلومتری جنوب شهرک صنعتی مأمونیه، در بخش میانی پهنه ماگمایی ارومیه-دختر جای دارد (شکل ۱) و از آنجایی که در بخش میانی پهنه ماگمایی ارومیه-دختر و ناحیه معدنی ساوه جای دارد دربرگیرنده اندیس‌های فراوان معدنی و کانه‌سازی مختلف مانند مس، طلا، آهن و... و آثار معدن‌کاری‌های قدیمی است و از این رو، کاوشگران و پژوهشگران بسیار به بررسی آن پرداخته‌اند (Rezaei Kahkhaei et al., 2011; Rezaei Kahkhaei et al., 2014; Rajabpour, 2015; Fazli, 2015; Yousefi, 2017; Rajabpour et al., 2017; Nouri et al., 2018; Yousefi and Alipourasl, 2019; Dolatshahi et al., 2019; Fazli et al., 2019; Zamanian et al., 2021; Khademian et al., 2022; Heidari and Safavy, 2023)؛ اما تاکنون به صورت جداگانه و ویژه درباره چگونگی پیدایش و محیط تکنونوماگمایی

³ slab roll-back⁴ Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc¹ soft collision² hard collision

بینش واقع‌بینانه‌تری دربارهٔ سرشت، محیط زمین‌شناختی و تکامل زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی در بخش میانی پهنهٔ ماگمایی ارومیه-دختر و منطقهٔ ساوه این پژوهش انجام شد.

سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در این منطقه بررسی‌های دقیقی انجام نشده است. از آنجایی‌که بیشتر رخدادهای کانه‌زایی در ارتباط با سنگ میزبان آتشفشانی در این ناحیه است؛ با توجه به اهمیت موضوع و نیاز به کسب



با میکروسکوپ پلاریزان به بررسی سنگ‌نگاری آنها پرداخته شد. از میان نمونه‌های یادشده، ۱۵ نمونه با کمترین میزان دگرسانی برای تجزیه و تحلیل عنصرهای اصلی به آزمایشگاه گروه تحقیقات لیتوسفر دانشگاه وین فرستاده شدند. در این آزمایشگاه، عنصرهای خاکی کیمیا و فرعی به روش طیف‌سنجی فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) و طیف‌سنجی جرمی با پلاسمای جفت‌شده

روش انجام پژوهش

همزمان با تهیهٔ نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ از منطقه، از واحدهای سطحی و همچنین، از گمانه‌هایی که برای اکتشاف مس حفر شده بودند نمونه‌برداری شد. این نمونه‌برداری‌ها تنوع کاملی از رخنمون‌های منطقه را دربر داشت و شمار ۵۰ نمونه بر پایهٔ تنوع سنگ‌شناسی از آنها برداشت شد (شکل ۱). سپس مقاطع نازک تهیه شدند و

با سنگ‌های آهک ماسه‌ای فسیل‌دار الیگو-میوسن (هم‌ارز سازند قم) پوشیده شده‌اند (Amidi et al., 2004). سنگ‌های آتشفشانی پهنه‌ساره (شامل جریان‌های گدازه‌ای، لایه‌های آذرآواری، توف و ایگنیمبریت) ویژگی‌های زمین‌شیمیایی پهنه‌های فرورانش و ماگماهای کالک‌آلکال را نشان می‌دهند (Davaranah, 2009). ماگمای مادر و مافیک منطقه در پی ذوب‌بخشی کم‌ژرفای گوشته سنگ‌کره‌ای دگرنهاده^۵ و در پی گسترش مرتبط با فشارزدایی در فشار کم پدید آمده است و بر پایه سن‌سنجی اورانیم-سرب، این مجموعه ماگمایی در ائوسن بالایی در شمال‌باختری ساره متبلور شده است (Nouri et al., 2018). بیشتر فرایندهای ماگمایی در زمان پالئوژن در یک فوران ماگمایی در ۳۰ میلیون سال پیش در زمان ائوسن و الیگوسن رخ داده‌اند (Verdel et al., 2011; Chiu et al., 2013; Moghadam et al., 2015, 2016). تنوع فازهای مختلف ماگمایی ائوسن بیشتر از آنکه به رابطه‌ی زایشی مذاب‌ها از طریق فرایند تحول ماگمایی ارتباط داشته باشد، از تفاوت در میزان تهی‌شدگی خاستگاه گوشته‌ای و یا درجات ذوب‌بخشی گوشته‌ی خاستگاه آنها متأثر است (Delavari and Damghani, 2022). جدایش و پراکندگی برونزدهای سنگ‌های آتشفشانی ائوسن که کهن‌ترین رخنمون‌های گستره‌ی این ورقه را می‌سازند، به‌گونه‌ای است که ارتباط واحد‌ها را به‌علت ویژگی‌های آتشفشانی آن و تغییرات سریع رخساره‌های سنگی دشوار می‌کند. گاهی این برونزدها با پهنه‌های گسترده‌ای از نهشته‌های بسیار جوان جدا می‌شوند و ارتباط‌دادن این واحد‌ها چندان ساده نیست (Amidi et al., 2004). سنگ‌های آتشفشانی ائوسن نشانه‌هایی از کمان معمولی قاره‌ای دارند و با سازند سرخ‌زیرین، به سن ائوسن پسین تا الیگوسن پیشین (شامل کنگلومرا، ماسه‌سنگ، شیل و گچ) پوشیده شده‌اند (Verdel et al., 2011). واحد‌های سنگی رخنمون‌یافته در محدوده ۱:۲۰۰۰۰ محدوده بررسی شده در جنوب مامونیه (شکل ۱) شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های

القایی (ICP-MS) تجزیه شدند (جدول ۱). آماده‌سازی نمونه‌ها برای تجزیه در دستگاه ICP-MS به‌صورت ذوب نمونه با متابورات یا تترابورات لیتیم و هضم آن با اسید نیتریک رقیق ۰/۲ گرم بود. برای اندازه‌گیری LOI، ۱ گرم نمونه آسیاب شد و در آن با دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت حداقل ۴ ساعت خشک شد. سپس نمونه در کوره ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴ ساعت گرما داده شد. سپس مقدار LOI بر پایه اختلاف کاهش وزن نمونه گرم‌شده در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و خشک‌شده در ۱۰۵ درجه سانتیگراد به‌دست آورده شد. در پایان با تلفیق داده‌های به‌دست آمده از بررسی‌های میدانی، بررسی‌های میکروسکوپی و تجزیه شیمیایی عنصرهای اصلی و کمیاب و نرم‌افزارهای GCDkit، Excel و CorelDraw به بررسی سنگ‌زایی و چگونگی پیدایش سنگ‌های آتشفشانی منطقه پرداخته شد.

زمین‌شناسی عمومی منطقه

منطقه مورد بررسی در جنوب مامونیه بخشی از برگه یکصد هزارم زاویه و بخشی از کمان ماگمایی ارومیه-دختر به‌شمار می‌رود (Amidi et al., 2004). مجموعه واحد‌های سنگی و رسوبی در این ناحیه را می‌توان به سه گروه کلی دسته‌بندی کرد:

الف) سنگ‌های آتشفشانی و آذرین درونی ائوسن و جوان‌تر از ائوسن؛

ب) نهشته‌های مارنی گچدار با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی و کنگلومرایی که با سنگ‌های آواری جوان‌تر پوشیده شده‌اند و به سن میوسن - پلیستوسن هستند؛

۳) نهشته‌های آبرفتی و غیرآبرفتی (تبخیری) کواترنر و به مقدار کمتر سنگ‌های آتشفشانی که در سطوح مختلف نهشته‌های کهن‌تر را می‌پوشانند (Amidi et al., 2004).

در این ناحیه واحد‌های آتشفشانی ائوسن به‌علت هجوم توده‌های آذرین درونی و جابجایی بسیار در پی گسلش برشی - فشارشی به‌طور کامل به‌هم ریخته‌اند. سنگ‌های آتشفشانی این منطقه بازیک، حد واسط و اسیدی هستند و

⁵ metasomatized

بلورهای پیروکسن و هورنبلند نیمه‌شکل‌دار و شکل‌دار در نمونه به‌صورت میکروفنوکریست دیده می‌شوند و شیشه زمینه سنگ، کلریتی شده است (شکل‌های ۲-۳، ۳-۳، ۳-۳ و ۳-۳).

۲- واحد پیروکسن آندزیت-آندزیت پورفیری (Ep^{an}-Ep)

این واحد سنگی با روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری در مرکز محدوده رخنمون دارد و با واحدهای آندزیت توف و توف داسیتی-ریوداسیتی همبری گسله نشان می‌دهد. نمود صحرایی آن در بررسی‌های میدانی تیره است و ریخت‌شناسی نیمه‌صخره‌ای دارد. رنگ نمونه دستی این واحد سنگی خاکستری تیره است و بازه ترکیبی آن از آندزیت‌های آذرآواری، پیروکسن آندزیت تا آندزیت‌بازالت با میان‌لایه‌های تراکیت و آندزیت بازالت تا آندزیت مگاپورفیری است. بر پایه بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌های برداشت‌شده از این واحد بافت پورفیریتیک با زمینه تراکیتی دارد. فنوکریست‌ها و میکروفنوکریست‌های پلاژیوکلاز در زمینه متراکمی از میکروولیت‌های جهت‌دار فلدسپار و مقدار اندکی شیشه میان میکروولیت‌ها و ذرات کانی کدر جای گرفته‌اند. پلاژیوکلازها به فرم‌های تخته‌ای و تیغه‌ای و گاه به‌صورت شکسته در برخی نمونه‌ها دیده می‌شوند. این پلاژیوکلازها منطقه‌بندی‌های ساده و نوسانی دارند و در امتداد ماکل‌های پلی‌سینتتیک بافت غربالی نشان می‌دهند و در پهنه‌های مختلف سوسوریتی شده و با کربنات جایگزین شده‌اند. همچنین، حاشیه برخی بلورها آلبیتی شده است. وجود نشانه‌هایی مانند بافت غیرتعادلی غربالی در پلاژیوکلازها می‌تواند گواهی بر رخداد آلایش پوسته‌ای باشد (Ruprecht et al., 2012). در فضای خالی حاصل از خوردگی بلورها، گاه کلریت جایگزین شده است. کانی‌های فرومنیزین اصلی این نمونه، بلورهای پیروکسن است که به‌صورت فنوکریست، میکروفنوکریست و ریزبلور در زمینه دیده می‌شوند (شکل‌های ۲-۳، ۳-۳ و ۳-۳).

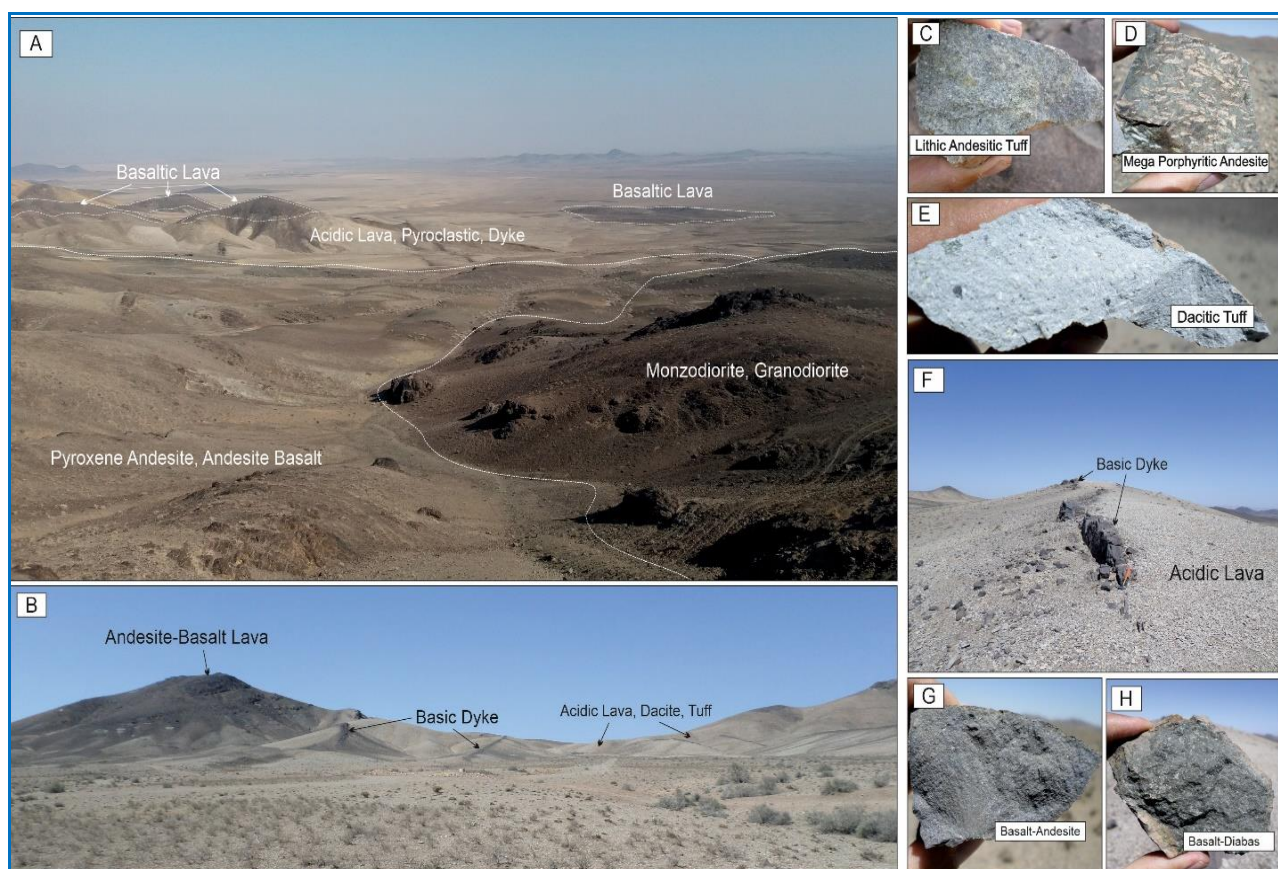
آذرین درونی با ترکیب دیوریت، گابرو، میکرودیوریت، مونزونیت و کوارتزمونزونیت و گرانودیوریت و تناوبی از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب اسیدی تا بازیک هستند. بر پایه نقشه ۱:۱۰۰.۰۰۰ زاویه، واحدهای سنگی آتشفشانی و آذرآواری سنی معادل ائوسن دارند و واحدهای آذرین درونی چه‌بسا در الیگوسن تا الیگومیوسن در این منطقه نفوذ کرده‌اند (Amidi et al., 2004).

سنگ‌شناسی و سنگ‌نگاری

بر پایه نقشه ۱:۲۰۰۰۰ تهیه‌شده توسط نگارنده، فراوان‌ترین واحدهای سنگی آتشفشانی رخنمون‌یافته در گستره مورد بررسی شامل آندزیت توف (EP³¹), پیروکسن آندزیت-آندزیت پورفیری (Ep^{an}-Ep), توف داسیتی-ریوداسیتی (d), گدازه اسیدی (a), آندزیت بازالت و دیاباز (b) و بازالت-دیاباز (mb) هستند (شکل‌های ۲-۳ و ۳-۳).

۱- واحد آندزیت توف (EP³¹)

در بررسی‌های میدانی این واحد نمود روشن و ریخت‌شناسی تپه ماهوری نشان می‌دهد. رنگ سنگ‌های این واحد در سطح هوازده خاکستری تیره است و در سطح تازه شکسته خاکستری مایل به سبز و ترکیب آن شامل آندزیت توف، توف‌برشی با میان‌لایه‌های گدازه، لیتیک کریستال توف و کریستال توف با میان‌لایه‌های آندزیت است. همچنین، همبری این واحد با واحدهای پیرامون بیشتر به‌صورت عادی است؛ اما در بخش‌هایی به‌صورت گسله نیز دیده می‌شود. در بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌ها بافت کلاستیک با اجزای سازنده پلاژیوکلاز و تکه‌های سنگی دیده می‌شود که در آنها بلورهای پلاژیوکلاز به‌صورت فنوکریست و میکروفنوکریست در زمینه‌ای از شیشه، ذرات کانی‌های کدر و میکروولیت‌های فلدسپار جای دارند. برخی قطعات هیالین و جریان‌ی هستند و ترکیب آنها از حد واسط تا بازیک تغییر می‌کند. در امتداد شکستگی‌های برخی بلورهای پلاژیوکلاز، اکسید آهن جایگزین شده است.



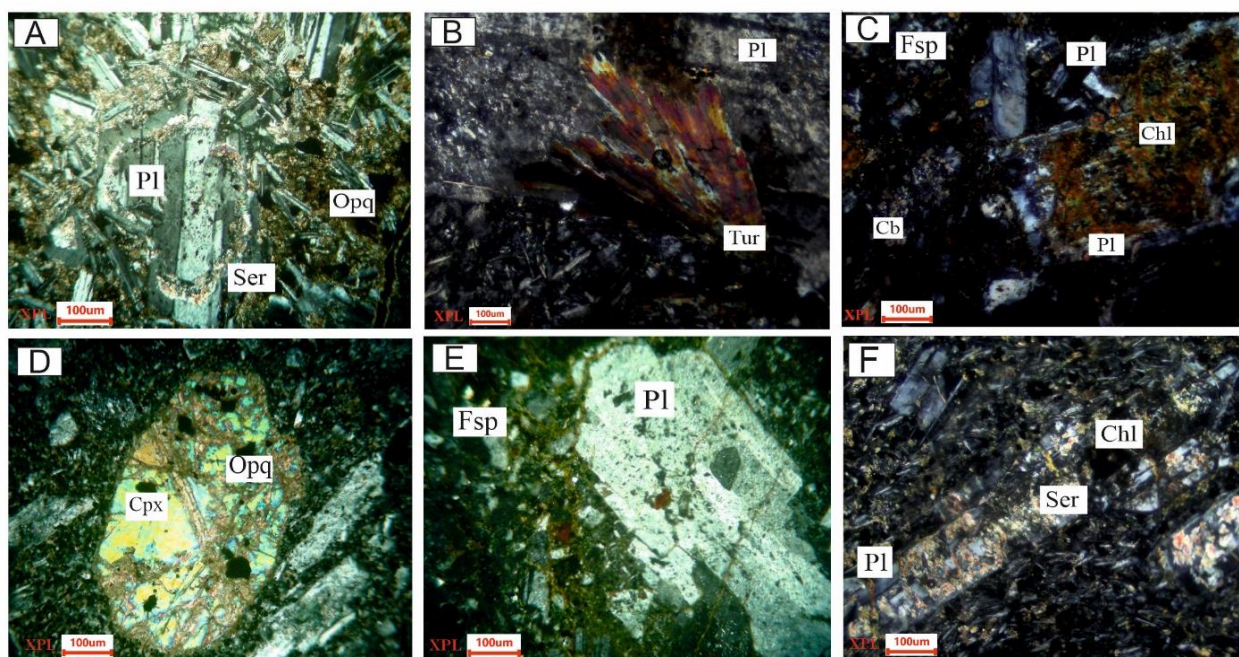
شکل ۲. A) نمایی کلی از جنوب منطقه مامونییه و رخنمون‌های واحدهای سنگی گوناگون (دید رو به شمال-باختری)؛ **B)** نمایی از رخنمون گدازه آندزیت‌بازالتی، گدازه‌های اسیدی و دایک‌های بازالتی (دید رو به شمال)؛ **C)** نمای نزدیک از واحد لیتیک-آندزیت‌توف؛ **D)** نمای نزدیک از واحد آندزیت مگاپورفیری؛ **E)** نمای نزدیک از واحد داسیتی؛ **F)** نفوذ دایک‌های بازالتی در واحدهای اسیدی؛ **G)** نمای نزدیک از واحد بازالت-آندزیتی؛ **H)** نمای نزدیک از واحد بازالت-دیاباز.

Figure 2. A) A general view of the study area in south of Mamoniye and various outcrops rock units (view to the northeast); **B)** A view of basaltic andesite lava outcrops, acid lavas, and basaltic dykes (view to the north); **C)** A close view of lithic andesite tuff unit; **D)** A close view of mega porphyritic andesite; **E)** A close view of the dacitic unit; **F)** Influx of basaltic dykes in acidic units; **G)** A close view of the basalt-andesite unit; **H)** A close view of the basalt-diabasic unit.

قطعات سنگی با اندازه و ترکیب گوناگونی در آن دیده می‌شود و ترکیب بیشتر آنها حد واسط است. بافت رایج نیز پورفیریتیک و آذرآواری است. افزون‌بر ریزبلورهای فلدسپار بی‌شکل در زمینه، میکروفنوکریست‌های کوارتز به مقدار اندک و بلورهای کوارتز و فلدسپار به‌صورت نهان‌بلور و ریزبلور نیز در زمینه دیده می‌شوند. همچنین، بیوتیت به‌صورت فنوکریست، میکروفنوکریست و ریزبلور در برخی نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل‌های E-۲، F-۳ و G-۲).

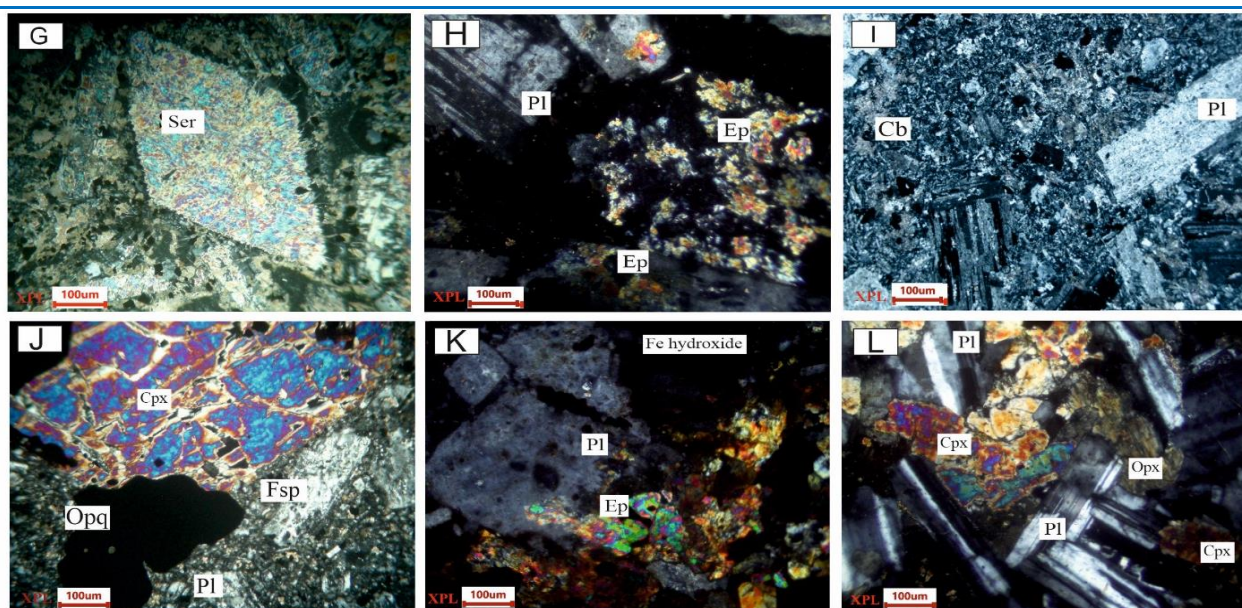
۳- واحد توف داسیتی-ریوداسیتی (d)

در بررسی‌های میدانی، واحدهای لیتیک کریستال توف داسیتی-ریوداسیتی ریخت‌شناسی تپه‌ماهوری تا نیمه‌صخره‌ای دارد. بر پایه بررسی‌های میکروسکوپی، این گروه سنگی بافت کلاستیک نشان می‌دهد و از قطعات سنگی میکروفنوکریست‌ها و فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و بیوتیت در زمینه‌ای از ریزبلورها و نهان‌بلورهای کوارتز و فلدسپار و کانی‌های کدر ساخته شده است.



شکل ۳. تصویرهای میکروسکوپی از سنگ‌های آتشفشانی منطقه (A) میکروفنوکریستال و بلورهای پلاژیوکلاز سریسیته شده با بافت پورفیری در نمونه آندزیتی؛ (B) ریزبلورهای تورمالین با آگرگات شعاعی و بافت میکرولیتی پورفیری در نمونه آندزیتی؛ (C) اورالیتی و کلریتی شدن کانی‌های فرومنیزین به همراه پلاژیوکلاز و کربنات در واحد آندزیتی؛ (D) بلورهای نیمه‌شکل‌دار دگرسان شده کلینوپیروکسن با بافت پورفیری و ریزبلور کانی کدر درون آن در نمونه آندزیت‌بازالتی؛ (E) بلورهای پلاژیوکلاز با بافت غربالی، آلکالی‌فلدسپار و قطعات سنگی آتشفشانی در نمونه لیتیک‌توف آندزیتی؛ (F) میکروفنوکریستال و بلورهای پلاژیوکلاز منشوری و تابولار سریسیته شده با بافت پورفیری و زمینه میکرولیتی در نمونه داسیتی؛ (G) سریسیته شدن بلورهای پلاژیوکلاز در امتداد ماکل‌های پلی‌سینتیک در نمونه ریوداسیتی؛ (H) درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در نمونه تراکیتی که خوردگی نشان می‌دهند و به اپیدوت دگرسان شده‌اند؛ (I) نمونه تراکی آندزیت با بافت پورفیری با زمینه ریزبلور؛ (J) درشت‌بلور کلینوپیروکسن و ریزبلورهای آلکالی‌فلدسپار آرژیلیکی شده و پلاژیوکلاز در نمونه آندزیت‌بازالتی؛ (K) پلاژیوکلاز اپیدوتی شده در زمینه ریزبلور در آندزیت‌بازالتی؛ (L) بلورهای نیمه‌شکل‌دار و دگرسان شده کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن به همراه کریستال‌های پلاژیوکلاز در نمونه بازالتی (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانس (Whitney and Evans, 2010)).

Figure 3. Photomicrographs of volcanic rocks in the area A) Microphenocryst and sericitized plagioclase crystals with porphyritic texture in the andesite sample; B) Tourmaline microcrystals with radial aggregate and porphyry microlithic texture in the andesite sample; C) Uralitization and chloritization of ferromagnesian with plagioclase and carbonate minerals in the andesite sample; D) Subhedral altered clinopyroxene crystals with porphyry texture and the opaque microcrystals in the basaltic andesite sample; E) Plagioclase crystals with sieve texture, alkali feldspar, and volcanic rock fragments in andesite lithic tuff sample; F) Sericitized plagioclase microphenocrystals and crystals with prismatic and tabular in the dacitic sample; G) Sericitization of plagioclase crystals along polysynthetic twinning in the rhyodacite; H) Coarse plagioclase crystals in the trachyte sample show corrosion and altered to epidote; I) Trachyandesite sample with porphyry texture and microcrystalline groundmass; J) Clinopyroxene phenocrysts and microcrystals of argillic alkali feldspar and plagioclase in the basaltic andesite sample; K) Epidotized plagioclase in a microcrystalline matrix in the andesite basalt; L) Subhedral altered clinopyroxene and orthopyroxene crystals along with plagioclase crystals in the basalt sample (Abbreviations from Whitney and Evans (2010)).



شکل ۳. ادامه.

Figure 3. Continued.

گدازه‌های آندزیت بازالیت به همراه دایک‌های ساب‌ولکان ساخته شده‌اند. نمود صحرایی این واحد سنگی در بررسی‌های میدانی تیره رنگ است و رنگ نمونه دستی آن سیاه است. در مقطع میکروسکوپی، بافت پورفیری با زمینه هیالین و اینترگرانولار-اینترسرتال دارد و بلورهای شکل‌دار منشوری پلاژیوکلاز کانی اصلی سازنده نمونه هستند. بلورهای پیروکسن، فنوکریست‌ها، میکروفنوکریست و شیشه کلریتی شده در بخش‌هایی از نمونه‌ها دیده می‌شوند. میکرولیت‌های فلدسپار تا اندازه‌ای حالت جریان‌ی نشان می‌دهند و بلورهای پلاژیوکلاز به صورت فنوکریست، میکروفنوکریست و میکرولیت و کانی‌های فرومنیزین به صورت میکروفنوکریست و میکرولیت دیده می‌شوند (شکل‌های ۲-G، ۲-K و ۳-J).

۶- واحد بازالیت-دیاباز (mb)

واحد بازالیت تا بازالیت آندزیت در باختر و شمال‌باختری محدوده رخنمون دارد و در نمونه دستی خاکستری تیره تا سیاه و با بافت پورفیریتیک با زمینه ریزبلور است. فنوکریست‌ها و میکروفنوکریست‌های شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار پلاژیوکلاز، الیوین و پیروکسن در زمینه‌ای از ریزبلورها و نهان‌بلورهای فلدسپار جای گرفته‌اند. بلورهای پلاژیوکلاز تا اندازه‌ای سالم هستند یا دچار دگرسانی کمی شده‌اند. پیروکسن و الیوین از کانی‌های فرومنیزین این سنگ‌ها هستند

۴- واحد گدازه اسیدی (a)

بیشترین رخنمون این واحد سنگی در نیمه خاوری محدوده است و از گدازه و توف اسیدی به همراه دایک‌های ساب‌ولکان ساخته شده است. همبری این واحد سنگی با واحدهای سنگی دیگر، هم به صورت عادی و هم به صورت گسله است. نمود صحرایی این واحد سنگی در بررسی‌های میدانی، روشن است و ریخت‌شناسی آن تپه ماهوری و ساخته‌شده از آگلومرا، گدازه‌های لیتیک و توف اسیدی، تراکیت-تراکی آندزیت به همراه دایک‌های ساب‌ولکان است. در مقاطع میکروسکوپی قطعات سنگی و دانه‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار و کانی کدر اجزا اصلی سازنده سنگ هستند که در زمینه شیشه‌ای سرشار از کانی کدر جای دارند. بخش‌هایی از زمینه کلریتی شده‌اند. بافت قطعات سنگی بیشتر هیالومیکرولیت پورفیریتیک و هیالوپورفیریتیک و کریپتوکریستالین پورفیریتیک، پیروکلاستیک و میکروگرانولار است و زمینه برخی قطعات سنگی اپاسیتی شده است (شکل‌های ۲-F، ۳-H و ۳-I).

۵- واحد آندزیت بازالیت و دیاباز (b)

بخش بزرگی از رخنمون این واحد سنگی در جنوب و خاور محدوده است و رخنمون‌های محدود دیگری نیز در جنوب و شمال جنوب منطقه مامونیه از آن دیده می‌شوند و از

آتشفشانی منطقه جنوب مامونیه پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی، شمار ۱۵ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی کمتر دگرسان‌شده برای انجام تجزیه شیمیایی از رخنمون‌ها و مغزه‌های حفاری برداشت شدند که یافته‌های به‌دست‌آمده از تجزیه آنها در جدول ۱ آورده شده‌اند.

که از دگرسانی برخی از آنها ترمولیت-اکتینولیت پدید آمده است (شکل‌های H-۲ و L-۳).

بحث

زمین‌شیمی سنگ کل، سری ماگمایی

برای بررسی رفتار زمین‌شیمیایی سنگ شناختی نمونه‌های

جدول ۱. داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ کل سنگ‌های آتشفشانی جنوب منطقه مامونیه (عنصرهای اصلی بر پایه درصدوزنی، عنصرهای فرعی و خاکی کمیاب بر پایه پی‌پی‌ام).

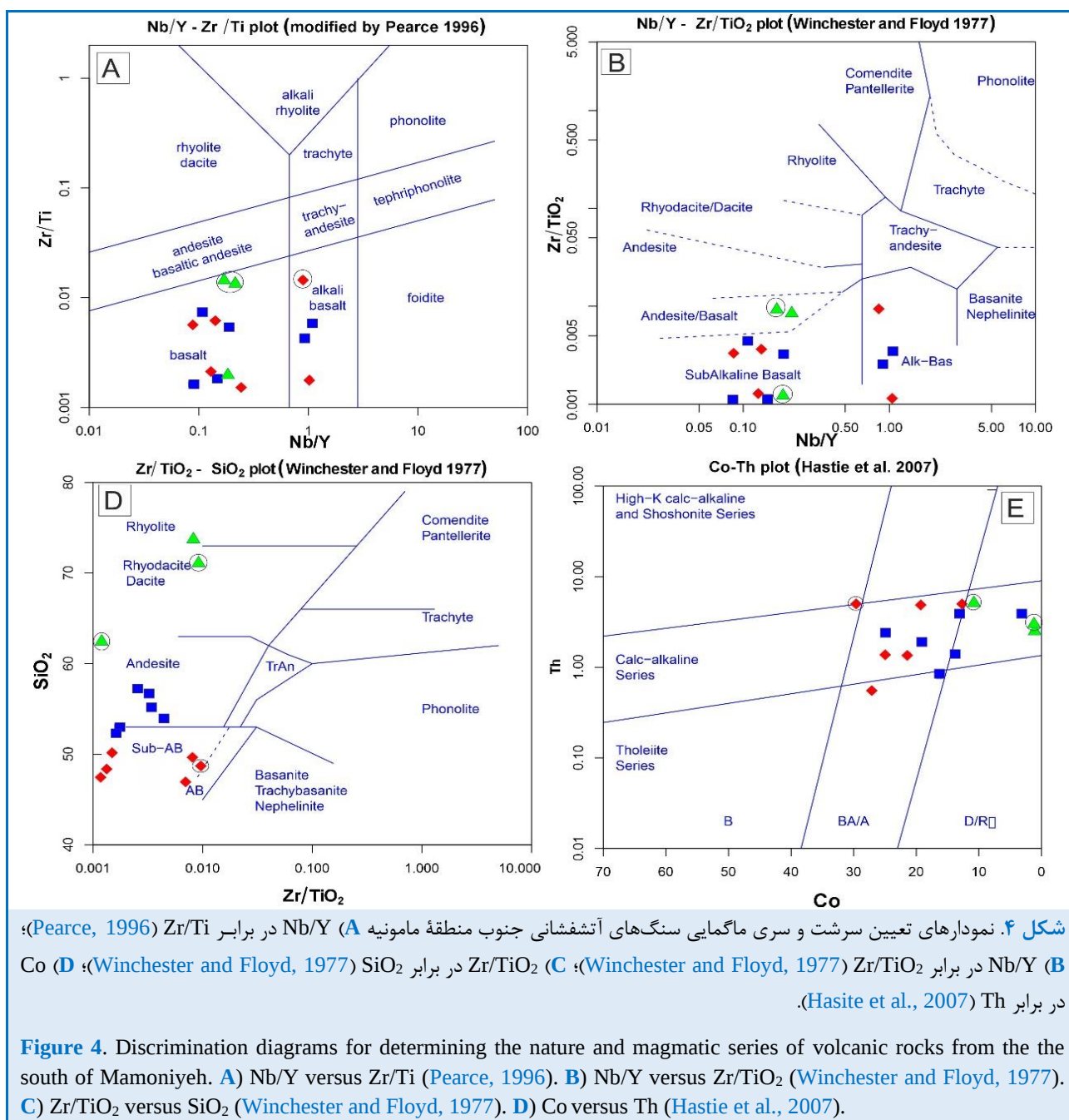
Table 1. Whole-rock geochemical data of the Eocene volcanic rocks from the the south of Mamoniye area (major elements in wt. %, trace and rare earth elements in ppm).

Sample No.	MNG-21	MNG-22	MNG-2	MNG-5	MNG-19	MNG-13	MNG-14	MNG-12	MNG-20	MNG-1	MNG-9	MNG-6		MNG-23	MNG-17
Rock Type	Basalt					Trachy basalt	Trachy Andesite		Andesite Basalt	MNG-7				Rhyodacite	
SiO ₂	49.6	48.7	48.36	47.98	Dacite	50.16	52.29	52.8	53.96	55.18	56.7	57.24	62.39	71	73.54
Al ₂ O ₃	17.6	16.5	18.75	17.89	16.94	17.97	15.88	17.98	16.13	17.36	15.15	15.84	15.09	13.4	11.62
CaO	8.4	9.1	3.14	4.96	9.75	1.84	4.9	2.8	6.68	2.51	2.35	3.06	2.78	1.9	2.1
Fe ₂ O ₃	9.1	9.4	10.82	12.3	9.9	10.35	10.13	8.61	9.32	7.27	10.35	7.41	7.06	3.1	2.9
K ₂ O	1.3	1.1	0.4	0.35	1.69	4.56	0.78	8.92	1.67	6.38	3.67	3.77	0.89	3.9	2.88
MgO	4.8	6.9	6.89	5.17	3.36	5.71	4.4	2.78	3.72	2.18	2.71	2.21	3.34	0.5	0.79
MnO	0.2	0.1	0.27	0.12	0.46	0.37	0.12	0.28	0.17	0.21	0.12	0.06	0.08	0.1	0.06
Na ₂ O	3.2	3.7	5.62	5.36	2.22	3.58	4.74	1.21	3.22	2.61	3.78	4.62	4.47	3.5	1.62
P ₂ O ₅	0.1	0.4	0.18	0.17	0.22	0.31	0.27	0.22	0.14	0.32	0.14	0.22	0.16	0.1	0.09
TiO ₂	0.9	1.5	0.85	0.78	0.92	0.8	1.18	0.71	0.79	0.69	0.71	0.84	0.71	0.5	0.32
LOI	4.4	2.3	4.71	4.91	7.21	4.08	5.31	3.05	4.08	5.1	4.21	4.63	2.96	1.4	3.9
Sc	25.3	23.4	22.4	22.3	29.6	18.6	30.6	17.7	24	17.6	19.5	19	19.2	4.3	4.6
V	226	241	215	185	283	156	269	153	238	78	116	147	140	31	19
Cr	31	32	80	18	14	20	37	20	35	13	38	24	33	<1	<1
Co	24.8	30.9	19.1	12.7	27.2	21.2	16.3	13.8	19.1	13.1	24.9	6.3	11	1.9	2.1
Ni	16.2	74.9	11	2	17	<1	9	7	11	<1	17	<1	10	3.9	4
Zn	62	68	250	70	171	167	53	52	72	50	51	32	68	13	18
As	12.6	11.9	13.7	15.2	9.5	11.6	9	13.1	7.8	0.9	5.8	7.3	16.8	8.1	7.3
Rb	20.8	17.1	32	19	28	73	31	169	16	122	73	73	50	58	61
Sr	646	716	264	303	344	199	241	206	361	104	138	339	275	65.1	58.9
Y	18	22	11.7	11.3	19.2	12	25.6	11.9	18.6	17	18	12.9	20.4	14.9	12.8
Zr	67	134	19	14	61	20	23	16	70	47	46	43	17	86	55
Nb	4.8	19	12	5.5	3.3	3.1	4.4	3.5	4	18.5	6.8	11.9	7.5	5.2	5.5
Mo	0.3	1.5	1	<0.5	<0.5	0.5	<0.5	1.2	0.6	2.1	1.6	0.9	1.6	<0.5	<0.5
Cs	0.9	0.5	1.1	2.1	3.7	0.8	1	2.1	0.5	3	1.1	2	4	1	1
Ba	461	361	218	41	452	1880	196	3801	439	1445	977	857	516	509	346
La	9.4	9.8	8.7	10.1	9.9	10.4	10.1	9.3	7.2	10.3	8.4	7.9	12.1	8.2	8.6
Ce	30.1	38.1	13	11	22	15	29	14	29	22	29	33	30	38	40
Pr	3.4	2.9	2.67	2.62	2.35	2.47	4.45	2.64	2.73	3.42	4.08	4.77	5.87	3.9	3.94
Nd	16.3	26.4	12.5	12.3	15.7	12	20.2	12.2	17.8	15.4	18	21.1	23.7	19.6	20.2
Sm	3.8	4.9	2.7	2.8	3	2.9	4.2	4.3	3.5	3.5	3.8	3.9	4.3	3.1	2.9
Eu	1.2	1.5	0.94	0.64	0.92	1.07	1.3	1.96	0.94	1	0.97	0.95	0.8	0.8	0.73
Gd	3.5	3.9	2.33	2.43	3.25	1.96	4.1	2.49	3.36	2.85	2.86	3.19	3.61	3.1	2.78
Tb	0.6	0.6	0.4	0.4	0.6	0.4	0.6	0.4	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5
Dy	3.3	3.7	3.3	2.8	3.8	2.7	5.3	3.3	3.6	3.9	3.9	3.2	4.2	2.6	2.9
Er	1.9	1.9	1.8	1.6	2	1.5	2.6	1.4	1.7	1.8	2.1	1.8	2.3	1.1	1.2
Yb	1.9	1.8	1.59	1.52	1.52	1.5	2.4	1.36	1.67	1.61	1.85	1.45	1.96	1.9	1.64
Lu	0.3	0.4	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2
Ta	0.2	1.5	9.5	3	0.3	1	0.9	1.2	0.4	4.8	1.8	3.8	0.9	0.8	0.7
Hf	1.9	3.7	1.5	1.3	2.3	1.2	1.4	1.2	2.5	2.2	1.7	2	1.1	2.2	2.3
Th	1.4	4.8	5	5	0.4	1.4	0.8	1.4	1.9	3.9	2.4	3.9	5.2	2.6	2.9
U	0.5	1.2	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.8	0.9	1.1	1.3	0.9	1.2	1.1

آلکالی در نمونه‌ها برابر با ۴/۵ تا ۱۰/۱ درصدوزنی است.

در نامگذاری سنگ‌ها و حذف تأثیر دگرسانی از عنصرهای کمتر متحرک و مقاوم در برابر دگرسانی بهره گرفته شد. بر این اساس با توجه به نمودار Nb/Y در برابر Zr/Ti ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیشتر بازالت، آلکالی‌بازالت، آندزیت‌بازالتی و تراکی‌آندزیت هستند (شکل ۴-ا).

با به‌کارگیری این داده‌ها و رسم نمودارهای مربوطه بر پایه الگوی رفتاری اکسیدهای اصلی، عنصرهای کمیاب و عنصرهای خاکی کمیاب به بررسی فرایندهای نخستین و نقش فرایندهای پس از زایش ماگما مانند تبلوربخشی و آلودگی با پوسته قاره‌ای پرداخته شد. در این سنگ‌ها، مقدار SiO_2 از ۴۷ تا ۷۳ درصدوزنی و مقدار Al_2O_3 از ۱۱/۶ تا ۱۷/۸ درصدوزنی در نوسان است. مجموع عنصرهای



پراکنده مقدار Na_2O و K_2O در سنگ‌های آتشفشانی منطقه چه‌بسا پیامد تحرک بالای سدیم و پتاسیم در هنگام رخداد دگرسانی و هوازدگی است (Rollinson, 1993). فراوانی CaO و Al_2O_3 و کاهش مداوم با افزایش مقدار SiO_2 در سنگ‌های آتشفشانی جنوب مامونیه نشان‌دهنده نقش مهم تبلور و جدایش بلوری پلاژیوکلاز در هنگام پیدایش آنها و همچنین، حضور اپیدوت در این سنگ‌ها باشد (Defant et al., 1992). تمرکز بالاتر و پراکندگی Al_2O_3 در نمونه‌های حد واسط و سپس روند کاهشی آن به‌سوی قطب اسیدی، پیامد فراوانی متغیر پلاژیوکلازها و تغییر در ترکیب آنهاست. روند کاهشی CaO نسبت به SiO_2 ، از نمونه‌های حد واسط به‌سوی اسیدی می‌تواند نشان‌دهنده جدایش بلوری کلینوپیرکسن و پلاژیوکلاز باشد (Ayabe et al., 2012). در نمودارهای تغییرات عنصرهای کمیاب در برابر سیلیس (شکل ۶) عنصرهای Ce و La روند افزایشی و Rb و Ba الگوی پراکنده رو به افزایشی دارند که افزایش آنها می‌تواند گویای نبود جدایش بلوری پتاسیم‌فلدسپار از ماگمای مادر این سنگ‌ها باشد. روند کمابیش کاهشی V و Ni نیز می‌تواند در ارتباط با جدایش بلوری کانی‌های فرومنیزینی مانند الیوین، پیروکسن باشد (Zanetti et al., 2004).

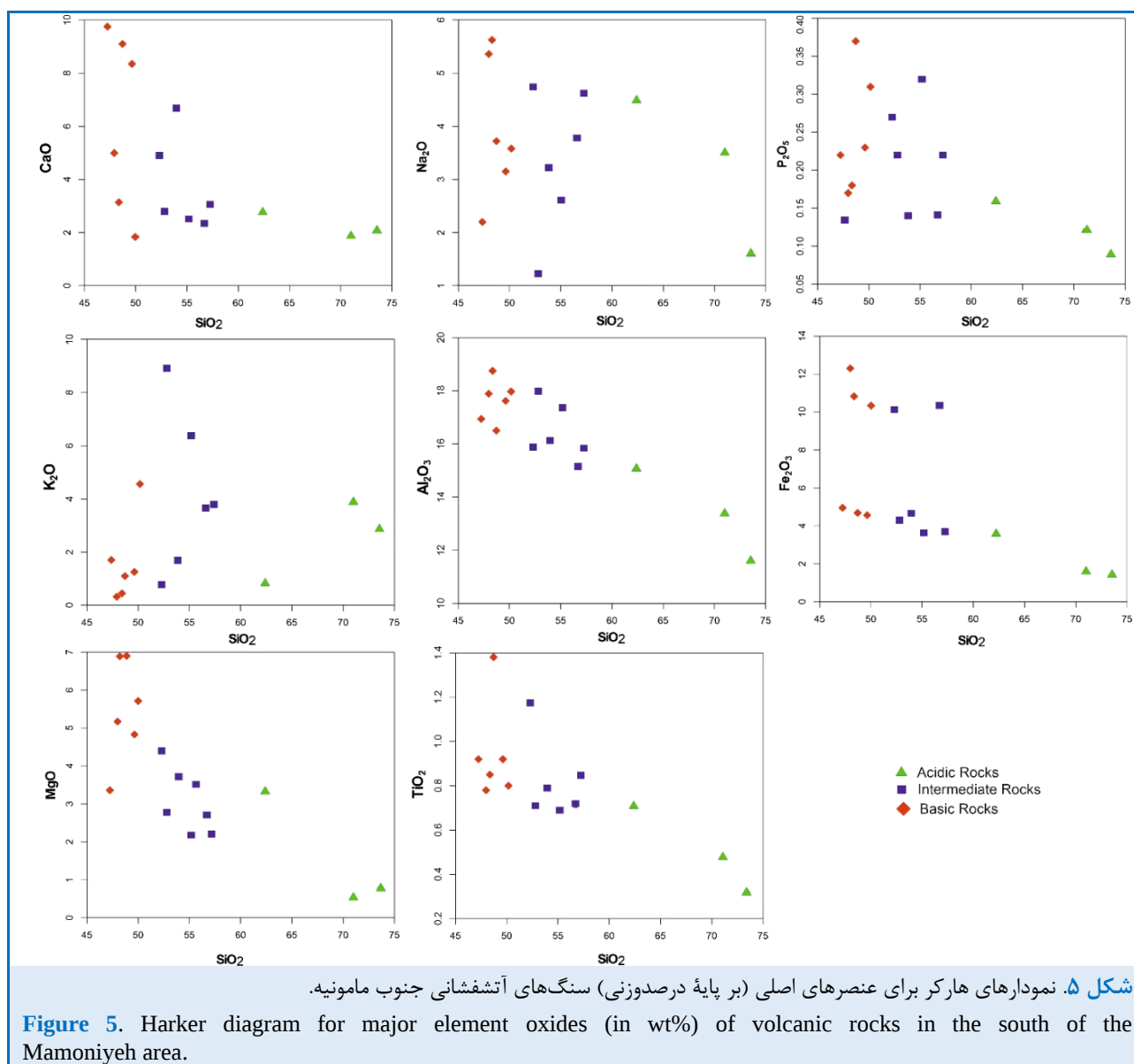
روند کمابیش افزایشی Nb با افزایش مقدار SiO_2 می‌تواند پیامد جان‌شینی تیتانیم در اکسیدهای تیتانیم‌دار و یا در ساختمان بیوتیت و هورنبلند باشد (Rollinson, 1993). مقدار Sc و Sr روند پراکنده و رو به کاهش نشان می‌دهد که چه‌بسا پیامد فرایند مهم تبلور پلاژیوکلاز در تکامل این سنگ‌هاست (Rollinson, 1993).

بر پایه نمودار محتوای Nb/Y در برابر Zr/TiO_2 ، ترکیب سنگ‌ها آندزیت‌بازالت، بازالت ساب‌آلکان و آلکالی‌بازالت است (شکل ۴-B). نمودار Zr/TiO_2 در برابر SiO_2 نشان‌دهنده ترکیب‌های آندزیت‌بازالت ساب‌آلکان، آندزیت و ریوداسیت برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه است (شکل ۴-C). همچنین، بر پایه نمودار Co برابر Th ، نمونه‌ها در محدوده بازالت‌آندزیت و آندزیت‌های سری کالک‌آلکان و داسیت-ریوداسیت‌های سری کالک‌آلکان جای می‌گیرند (شکل ۴-D).

بررسی تغییرات عنصرها

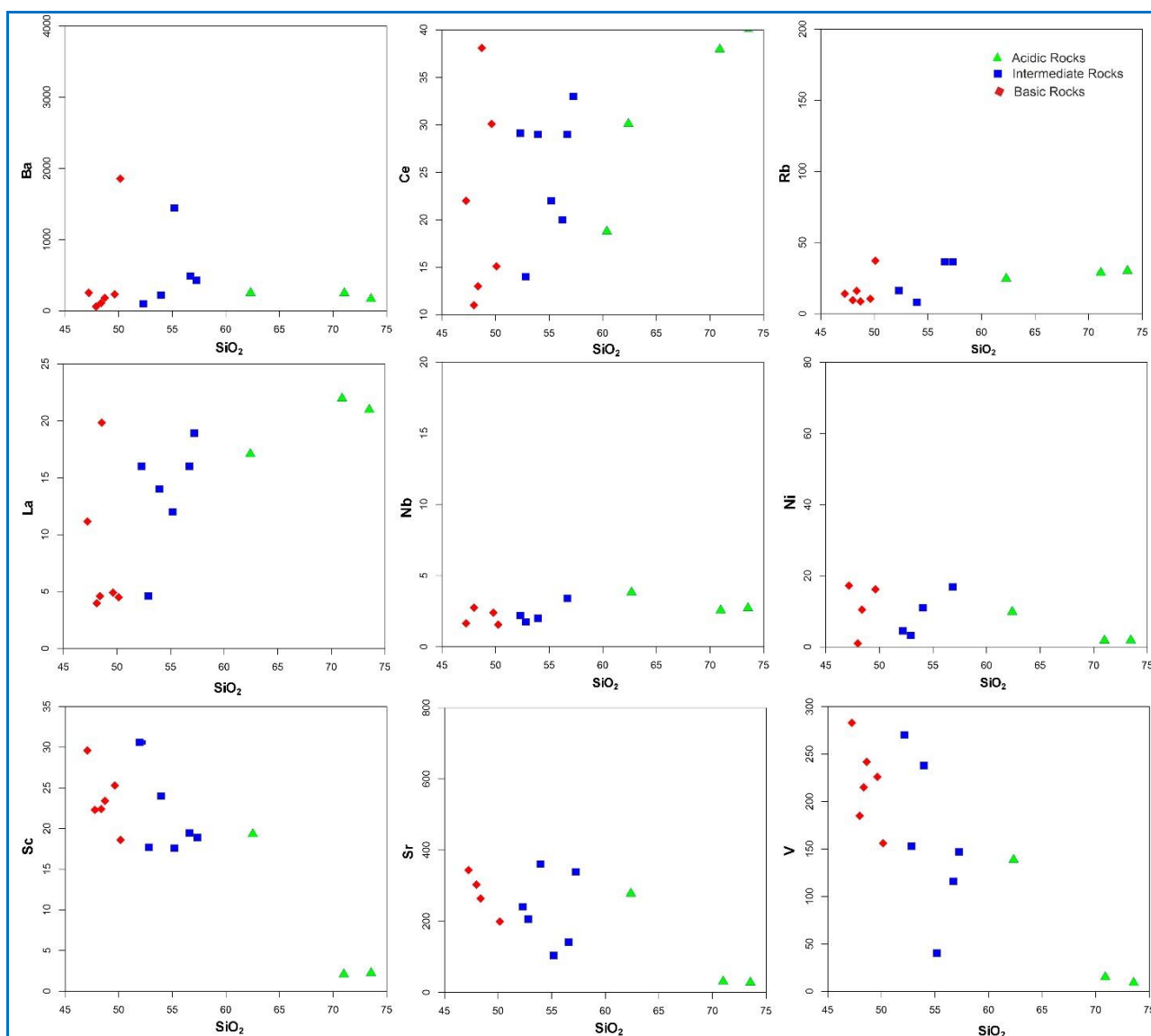
برای پی‌بردن به سرشت برخی فرایندهای مؤثر در تحول ماگما مانند تبلوربخشی، می‌توان از نمودارهای دوتایی تغییرات اکسید-اکسید، اکسید-عنصر و یا عنصر-عنصر هارکر (Harker, 1909) بهره گرفت. در کل، روندهایی که وابستگی خطی مثبت یا منفی دارند در کنترل تبلوربخشی، آمیختگی ماگمایی و یا آلايش هستند؛ اما پراکندگی‌ها می‌تواند در اثر تحولاتی مانند آلايش ماگما با پوسته بالایی، دگرسانی و یا تمرکزهای بلوری روی دهد (Willson, 2007). در میان اکسیدهای اصلی، Al_2O_3 و TiO_2 روند کاهشی آشکاری را نشان می‌دهند. کاهش Fe_2O_3 ، MgO و P_2O_5 چه‌بسا نشان‌دهنده تبلور کانی‌های فرومنیزین و تأثیر جدایش بلوری در پیدایش سنگ‌های آتشفشانی منطقه باشد (Defant et al., 1992). دیگر اکسیدها روند روشنی ندارند و به‌صورت پراکنده دیده می‌شوند (شکل ۵).

در مجموعه‌های کالک‌آلکان با افزایش مقدار SiO_2 ، مقدار MgO ، Fe_2O_3 ، CaO و TiO_2 کاهش و مقدار Na_2O و تا اندازه‌ای K_2O افزایش می‌یابند (Feely et al., 2002). روند



کروم (کمتر از ۴۰۰ ppm) دارند که نشان می‌دهد آنها در طول تکامل خود دچار تغییر شده‌اند (Wilson, 2007). با توجه به این موضوع که در گوشته اولیه مقدار نیکل از ۴۰۰ ppm بیشتر و مقدار کروم از ۱۰۰۰ ppm بیشتر است (Wilson, 1989)، داده‌های این عناصر در منطقه می‌تواند گویای تأثیر جدایش بلوری هنگام صعود ماگما باشد؛ همان‌گونه که درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن نیز نشان‌دهنده آن هستند (Zhang et al., 2009; Shahsavari Alavijeh et al., 2019).

غلظت Sr بیشتر با بلورهای پلاژیوکلاز کنترل می‌شود؛ زیرا استرانسیم در پلاژیوکلازها آسان‌تر از کانی‌های کلسیم‌دار دیگر جایگزین Ca می‌شود و سوسوریتی‌شدن و سریسیتی‌شدن آن هنگام دگرسانی گرمایی عامل پراکندگی استرانسیم است (Mason and Moore, 1982). کاهش نسبتاً شدید Sc و V از سنگ‌های حد واسط به سوی سنگ‌های اسیدی مربوط به جدایش بلوری کلینوپیروکسن و اکسیدهای آهن و تیتانیوم است (Cox et al., 1989). سنگ‌های بررسی‌شده مقدار کمی نیکل (کمتر از ۷۰ ppm) و

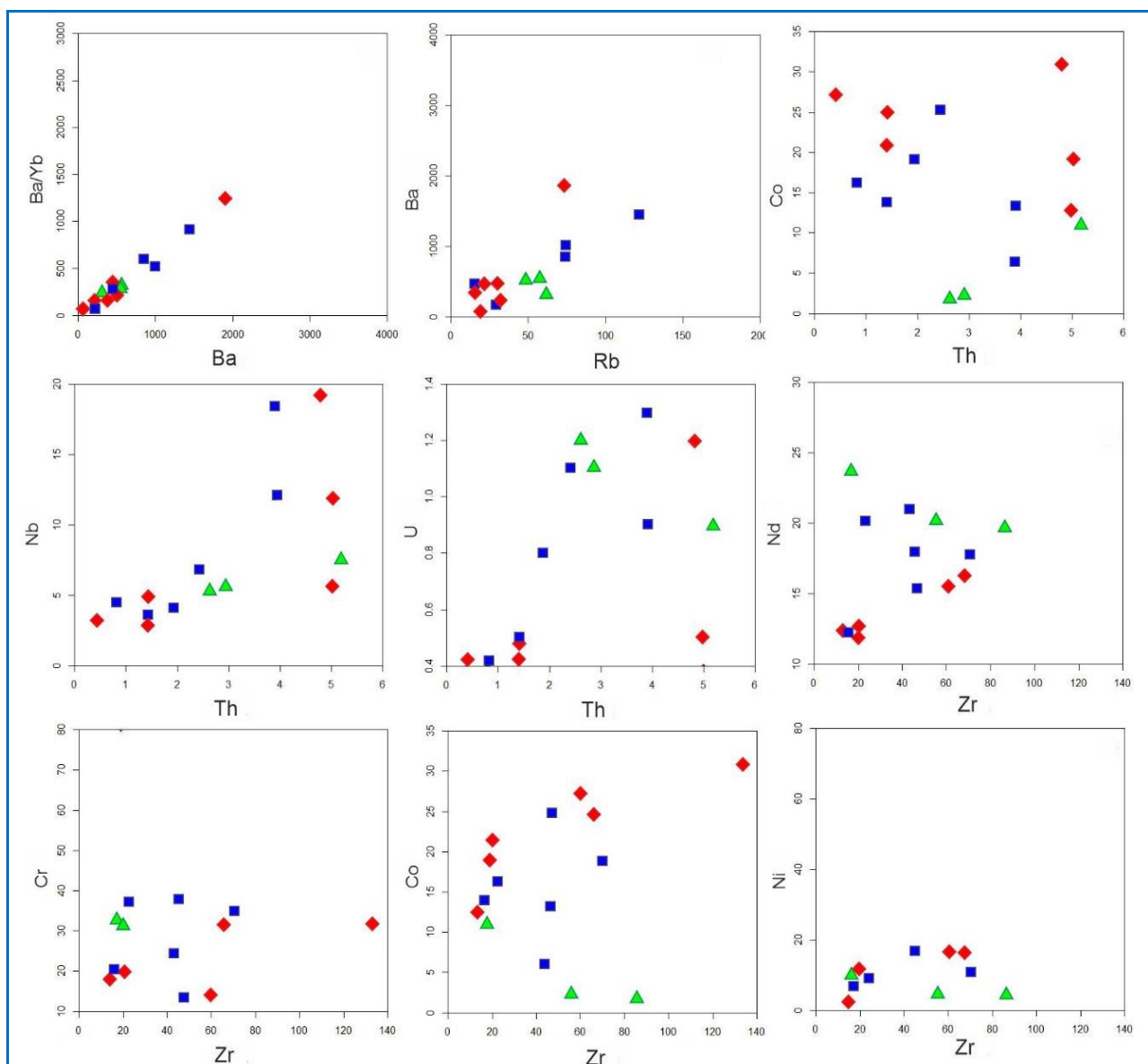


شکل ۶. نمودارهای هارکر برای عنصرهای کمیاب (بر پایه ppm) سنگ‌های آتشفشانی جنوب مامونیه.

Figure 6. Harker diagram for trace elements (in ppm) of volcanic rocks in the south of the Mamoniye area.

بلوری ماگما هنگام تبلور بخشی در پیدایش سنگ‌های آتشفشانی محدوده دخالت داشته است. همچنین، روند مثبت Nd در برابر Zr و روندهای تقریباً منفی عنصرهای ناسازگار Co، Cr و Ni در برابر Zr گویای سرشت واحد و رابطه زایشی نزدیک سنگ‌های آتشفشانی این منطقه با یکدیگر است (Ghasemi et al., 2017).

نمودارهای تغییرات عنصرهای سازگار و ناسازگار برای بررسی نقش فرایندهای ذوب بخشی و تبلور بخشی بسیار کارآمد هستند (Aldanmaz et al., 2000). بر پایه نمودار شکل ۷، افزایش عنصرهایی مانند U و Nb در برابر افزایش Th، افزایش Ba در برابر Rb و افزایش نسبت Ba/Yb در برابر افزایش مقدار Ba نشان می‌دهند جدایش

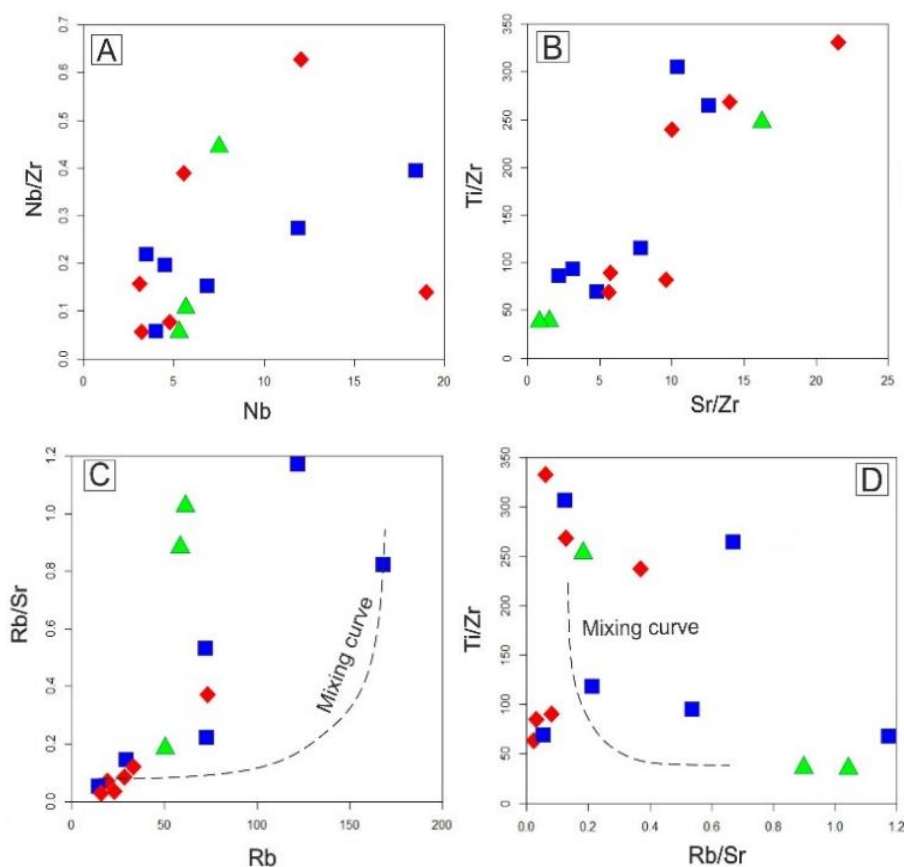


شکل ۷. نمودارهای تغییرات عنصرهای سازگار و ناسازگار (بر پایه ppm) برای بررسی فرایندهای تأثیرگذار در تحول ماگمایی سنگهای آتشفشانی جنوب مامونیه.

Figure 7. Variation diagram for the compatible and incompatible elements (in ppm) to investigate the effective processes in magma evolution of volcanic rocks in the south of Mamoniye area.

نمونه‌ها روندی همانند منحنی‌های آمیختگی دارند که این ویژگی نشان‌دهنده پدیده آمیختگی ماگمایی است. از این‌رو، ماگمای مادر سنگ‌های آتشفشانی منطقه جنوب مامونیه باید از ذوب‌بخشی خاستگاه گوشته‌ای پدید آمده باشند که با توجه به آمیختگی با ماگمای بازالتی در هنگام صعود و جایگیری در آشیانه ماگمایی به هنگام رخداد فرایندهای جدایش بلوری، آلیش و هضم، پیدایش انواع متفاوتی از سنگ‌های منطقه را به دنبال داشته است.

افزون بر جدایش بلوری، در هنگام پیدایش ماگما پدیده آمیختگی ماگمایی نیز می‌تواند تأثیرات مهمی در سرنوشت ماگما داشته باشد. به این منظور از نمودارهای Nb در برابر Nb/Zr (شکل A-۸) و Sr/Zr در برابر Ti/Zr (شکل B-۸) بهره گرفته شد. بر پایه این نمودارها، روند صعودی و شیب‌دار ترکیب نمونه‌های بررسی‌شده با روند آمیختگی ماگمایی همخوانی دارد. همچنین، در نمودارهای Rb در برابر Rb/Sr و Rb/Sr در برابر Ti/Zr (شکل‌های C-۸ و D-۸)،



شکل ۸. بررسی آمیختگی ماگمایی درباره سنگ‌های آتشفشانی جنوب منطقه مامونیه (A) نمودار Nb در برابر Nb/Zr (Soesoo, 2000); (B) نمودار تغییرات Sr/Zr در برابر Ti/Zr (Karsli et al., 2007); (C) نمودار Rb در برابر Rb/Sr (Kaygusuz et al., 2018); (D) نمودار Rb/Sr در برابر Ti/Zr (Kaygusuz et al., 2018) (عنصرها بر پایه ppm).

Figure 8. Investigation of magma mixing in the volcanic rocks of the southern of Mamoniye region; **A)** Nb versus Nb/Zr diagram (Soesoo, 2000); **B)** Sr/Z versus Ti/Zr diagram (Karsli et al., 2007); **C)** Rb versus Rb/Sr diagram (Kaygusuz et al., 2018); **D)** Rb/Sr versus Ti/Zr diagram (Kaygusuz et al., 2018) (elements in ppm).

(Winter, 2001; Wehrmann et al., 2014). تهی‌شدگی

^۹HREE از ویژگی‌های ماگماهای کالک‌آلکان و یا خروج آنها از ماگما به کمک محلول‌های CO₂ دار است (Tatsumi, 1989). تأثیر فرایندهای ثانویه و دگرسانی با توجه به پراکندگی الگوهای توزیع عنصرهای نادر بهنجار شده به ترکیب کندریت (شکل ۹-۹-۹) (B) چه‌بسا بازتابی از اثر تتراد^{۱۰} است که با تهی‌شدگی عنصرهایی مانند Ce, Gd و Yb به صورت ضعیف و در پی برهم کنش سیال-سنگ نمایان شده است. پیدایش فرم کوژ در نمودار سامانه‌های آذرین و یا سامانه‌های گرمایی و رخداد همزمان اثر تتراد کوژ و کاو در نمودار پیامد فرایندهای

بررسی نمودارهای عنکبوتی

نمودار عنکبوتی بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (شکل ۹-۹-۹) که شیب منفی آن نشان‌دهنده غنی‌شدگی عنصرهای سنگ‌دوست بزرگ یون (LILE^۶) نسبت به عنصرهای با شدت میدان بالا (HFSE^۷) است. این نمودار گویای تهی‌شدگی سنگ‌های آتشفشانی منطقه از عنصرهای HFSE (مانند Ti, Yb و Zr) است و عنصرهای LILE به‌ویژه Ba, K, Cs و Rb غنی‌شدگی نشان می‌دهند (Sun and McDonough, 1989; Asiabanha et al., 2012). پیدایش سنگ‌ها در پهنه‌های فرورانش عاملی است که باعث غنی‌شدگی از LREE^۸ می‌شود

^۹ Heavy rare earth elements

^{۱۰} Tetrad effect

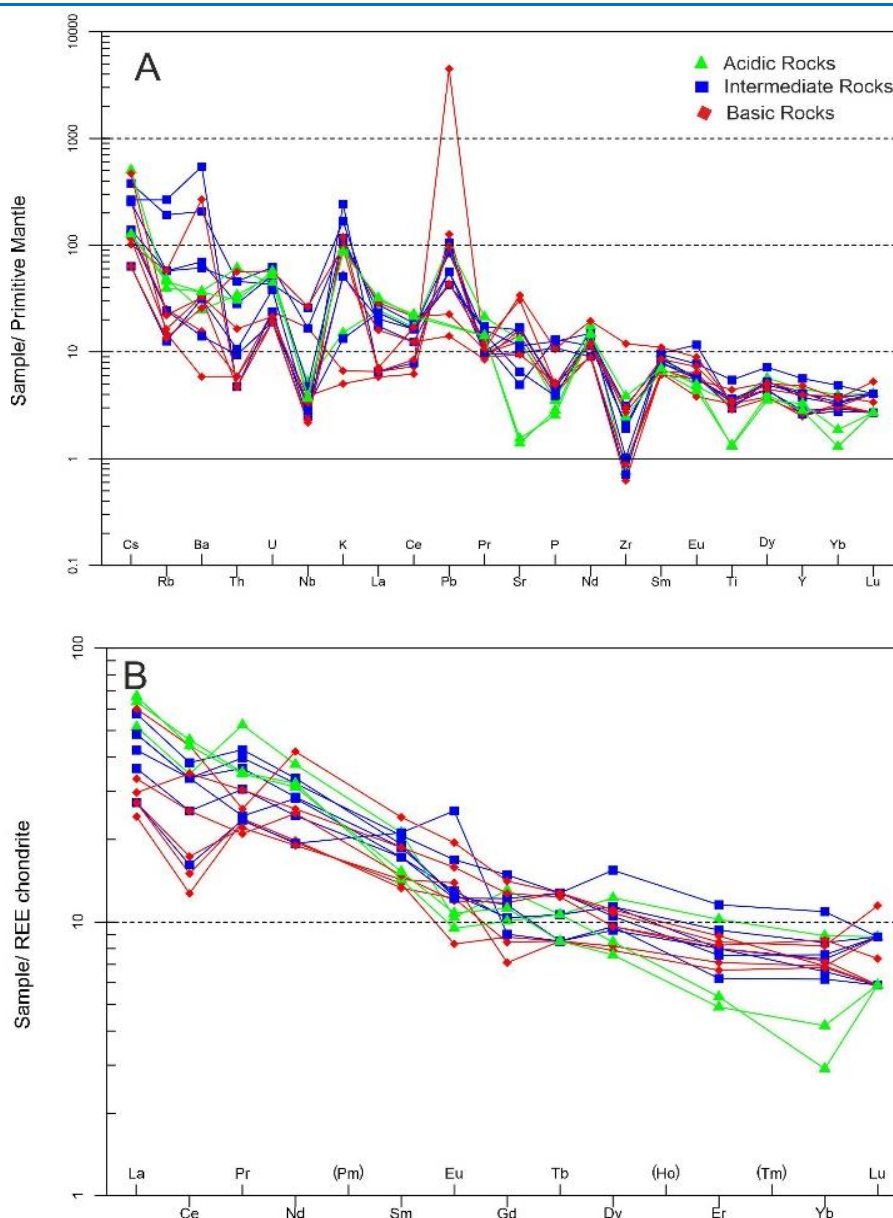
^۶ large ion lithophile elements

^۷ high field strength elements

^۸ Light rare earth elements

زمین‌شیمیایی مانند دگرسانی‌های گرمابی و آمیختگی سیال‌های کان‌ساز (Peretyazhko and Savina, 2010; Feng et al., 2011) و دگرسانی ناشی از واکنش میان سیال‌ها و سنگ دیواره (Monecke et al., 2007) دانسته شده است. در الگوی عنصرهای خاکی کمیاب بهنجارشده به ترکیب

کندريت نیز غنی‌شدگی از عنصرهای خاکی کمیاب سبک (LREE) نسبت به عنصرهای خاکی کمیاب سنگین (HREE) دیده می‌شود (شکل ۹-ب) که می‌تواند پیامد فراوانی در خاستگاه و یا درجه کم ذوب‌بخشی و یا پیامد جدایش بلوری ماگمایی باشد (Rollinson, 1993; Wilson, 2007).



شکل ۹. ترکیب سنگ‌های آتشفشانی جنوب منطقه مامونیه در **(A)** نمودار چندعنصری بهنجارشده به ترکیب گوشته اولیه؛ **(B)** الگوی عنصرهای خاکی کمیاب بهنجارشده به ترکیب کندريت (ترکیب گوشته اولیه: Sun and McDonough (1989)؛ ترکیب کندريت: Nakamura (1974)).

Figure 9. Volcanic rocks from the south of Mamoniye area in **A)** Primitive mantle-normalized multi-element spider diagram; **B)** Chondrite-normalized REE diagram (Normalization factors for primitive mantle and chondrite are from Sun and McDonough (1989) and Nakamura (1974) respectively).

می‌دهند (Tian et al., 2008). بی‌هنجاری ضعیف در Eu می‌تواند پیامد عملکرد فرایند جدایش بلوری کانی پلاژیوکلاز (Barnes et al., 2001)، یا خاستگاه گرفتن ماگمای مادر از گوشته‌ای پلاژیوکلازدار (Wilson, 2007)، فوگاسیتته بالای اکسیژن در محیط تبلور ماگما (Aslan et al., 2017) و یا تخریب کانی‌هایی مانند پلاژیوکلاز و هورنبلند در اثر واکنش سیال‌های گرمایی اسیدی با سنگ میزبان آندزیتی باشد. اگر بی‌هنجاری Eu با بی‌هنجاری Sr همراه باشد، جدایش بلوری پلاژیوکلاز رخ داده است. پس بی‌هنجاری ضعیف Sr و Eu در سنگ‌های جنوب منطقه مامونیه چه‌بسا نشان می‌دهد پلاژیوکلاز فاز پایداری در خاستگاه بوده است و یا پلاژیوکلاز فاز مهمی در هنگام جدایش بلوری و یا هنگام تغییر فوگاسیتته اکسیژن به‌شمار می‌رفته است (Wade et al., 2005). می‌توان گفت که ناهنجاری منفی ضعیف در Eu در سنگ‌های آتشفشانی نادرگرساں جنوب منطقه مامونیه مقدار بالای آب یا فوگاسیتته اکسیژن را توضیح می‌دهد. وجود آنومالی منفی Ce نیز می‌تواند نشانه‌ای از تخریب کانی زیرکن توسط سیال‌های اسیدی در یک محیط اکسیدان باشد. غنی‌شدگی از LILES و LREES نشانه‌هایی از ماگماتیسیم فرورانشی است که در سنگ‌های پهنه ماگمایی البرز و ارومیه - دختر دیده می‌شود (Asiabanha and Foden, 2012).

خاستگاه ماگما و جایگاه زمین‌ساختی

سنگ‌های آتشفشانی جنوب مامونیه، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی مرتبط با پهنه‌های فرورانش را نشان می‌دهند (غنی‌شدگی از عنصرهای LILE و تهی‌شدگی از HFSE). از آنجایی که عنصرهای HFSE و HREE در مقایسه با دیگر عنصرهای کمیاب تحرک کمتری دارند در بررسی سرشت و خاستگاه سنگ کارآمد هستند (Pang et al., 2013). بیشتر این عنصرها در هنگام فرایندهایی مانند هوازدگی، دگرسانی و دگرگونی

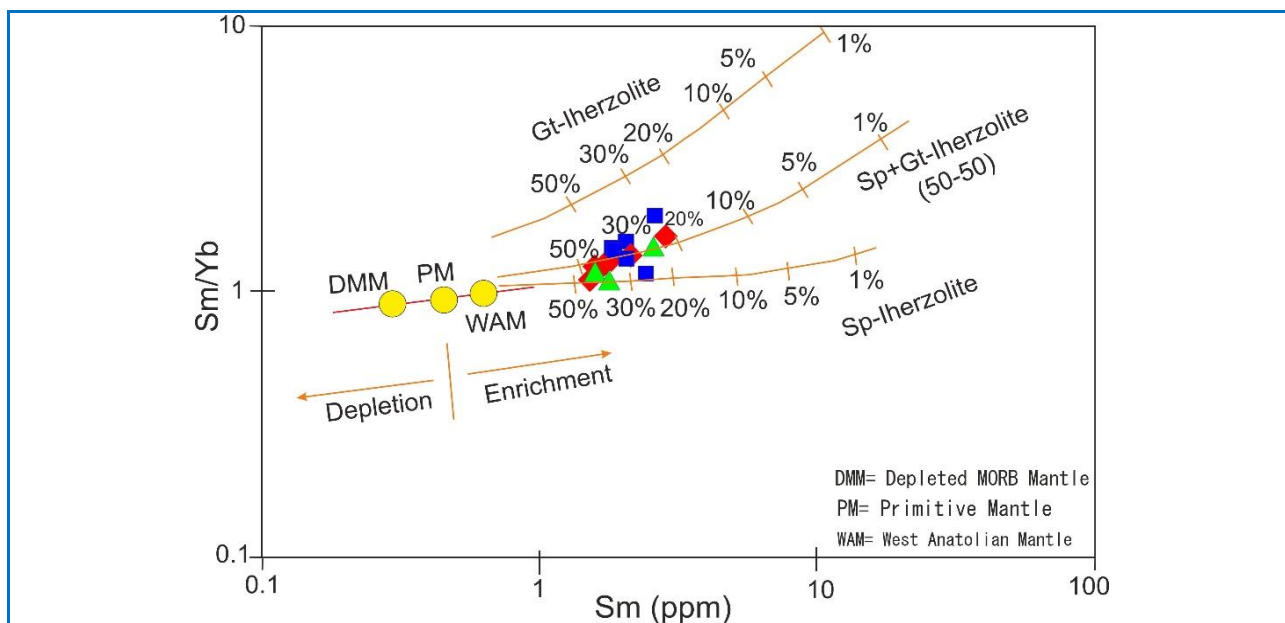
در پهنه فرورانش، HSFE ها (مانند Nb و Ti) درون تخته فرورونده به‌جای می‌مانند؛ اما LILE ها (مانند Ba, K و Sr) به‌آسانی به گوّه گوشته‌ای بالای تخته فرورونده راه می‌یابند (Pearce, 1983; Temel et al., 1998). همچنین، بالابودن عنصرهای خاکی کمیاب سنگین نشان‌دهنده نبود گارنت در خاستگاه ماگماست (Wilson, 2007; Shellnutt et al., 2015). کاهش HFSE را می‌توان پیامد حلالیت اندک این عنصرها در سیال‌های جداشده از تخته فرورونده دانست (Khedr and Arai, 2016). عنصرهای خاکی کمیاب نسبت به فازهای بلوری اصلی سنگ‌های آذرین مانند الیون و کلینوپیروکسن ناسازگار هستند و از این‌رو، به‌صورت فزاینده‌ای در سیال‌های جدایش‌یافته متمرکز می‌شوند. ناهنجاری بسیار مثبت Pb و مثبت K در نمودار عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی منطقه جنوب مامونیه پیامد آرایش ماگمای سازنده این سنگ‌ها با مواد پوسته‌ای و یا دگرنهادشدن گوّه گوشته‌ای با مذاب حاصل از تخته فرورونده است (Srivastava and Singh, 2004). غنی‌شدگی نسبی از LILE (مانند Ba, Rb, Nb و K) و تهی‌شدگی از عنصرهایی مانند Ti و Nb چه‌بسا گواهی بر خاستگاه گرفتن ماگمای پدیدآورنده این سنگ‌ها از گوشته‌ای سست‌کره‌ای و دگرنهاده در بالای پهنه فرورانش است (Yu et al., 2016; Tanirli and Rizaoglu, 2016). همچنین، تهی‌شدگی از عنصرهای با میدان پایداری بالا از ویژگی‌های شناخته‌شده ماگماهای پهنه‌های فرورانش است (Geng et al., 2009). تهی‌شدگی این عنصرها می‌تواند نشان‌دهنده مشارکت پوسته در فرایندهای ماگمایی (Shang et al., 2004) و یا فقر این عنصرها در خاستگاه باشد (Wu et al., 2003). تهی‌شدگی از Nb و Zr و غنی‌شدگی از U نشانه ذوب‌بخشی ماگمای سازنده این سنگ‌ها از گوّه گوشته‌ای است که تحت تأثیر مقادیر متفاوتی از سیال‌های برخاسته از تخته فرورونده و درجات متفاوت ذوب‌بخشی، غنی‌شدگی‌های متفاوتی را نشان

(فرایندهای ثانویه) حساسیت کمی دارند و وارد فاز مذاب نمی‌شوند (Zhang et al., 2016). برای تفسیر و بررسی خاستگاه ماگما و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی جنوب منطقه مامونیه نمودارها و نسبت‌های مختلفی از عنصرهای کمیاب و کم تحرک به کار برده شده‌اند. بر پایه بررسی‌های سامر و همکاران (Sommer at al., 2006)، نسبت Zr/Nb بیشتر از ۱۰ نشان‌دهنده ماگماتیسم در پهنه فرورانش است و مقدارهای کمتر از ۱۰ نشان‌دهنده خاستگاه غیرکوهزایی ماگماست. این نسبت برای نمونه‌های منطقه از ۱/۵۸ تا ۱۸/۴۸ و با میانگین ۷/۹۳ متغیر است نشان‌دهنده ارتباط سنگ‌های منطقه با فرایندهای فرورانش است.

نسبت‌های Nb/Th کمتر از ۳ از ویژگی‌های سنگ‌های کالک‌آلکالان کمان ماگمایی است (Whalen et al., 2006) که این نسبت به صورت میانگین برای سنگ‌های آتشفشانی جنوب منطقه مامونیه برابر با ۳/۱۶ است. این مقدارها نشان‌دهنده ارتباط سنگ‌های این منطقه با فرایندهای کوهزایی و فرورانش است. بر پایه بررسی‌های دفانت و دراموند (Defant and Drummond, 1990)، نسبت Sr/Y بالاتر از ۴۰ نشان‌دهنده مذاب‌های جدا شده از تخته فرورونده است؛ زیرا میزان Y به علت تعادل با مجموعه کانی‌های فشار بالا در ماده مذاب جدا شده از تخته فرورو بسیار کم است؛ اما از Sr به علت ناپایداری کانی پلاژیوکلاز بسیار غنی است. این نسبت در سنگ‌ها جنوب منطقه مامونیه از ۳/۴ تا ۳۵/۸ در نوسان است. بر پایه بررسی‌های مانکر و همکاران (Munker et al., 2004)، این مقدارها گویای جدایش مذاب سازنده این سنگ‌ها از گوه گشته‌ای است. برای الگوسازی ویژگی‌های خاستگاه گشته‌ای و درجه ذوب‌بخشی نمودار تغییرات Sm در برابر Sm/Yb به کار برده شد (شکل ۱۰). این نمودار بر پایه یک خاستگاه گشته‌ای تهی‌شده مورب و یک خاستگاه تهی‌نشده (WAM^{۱۱}) است که نماینده

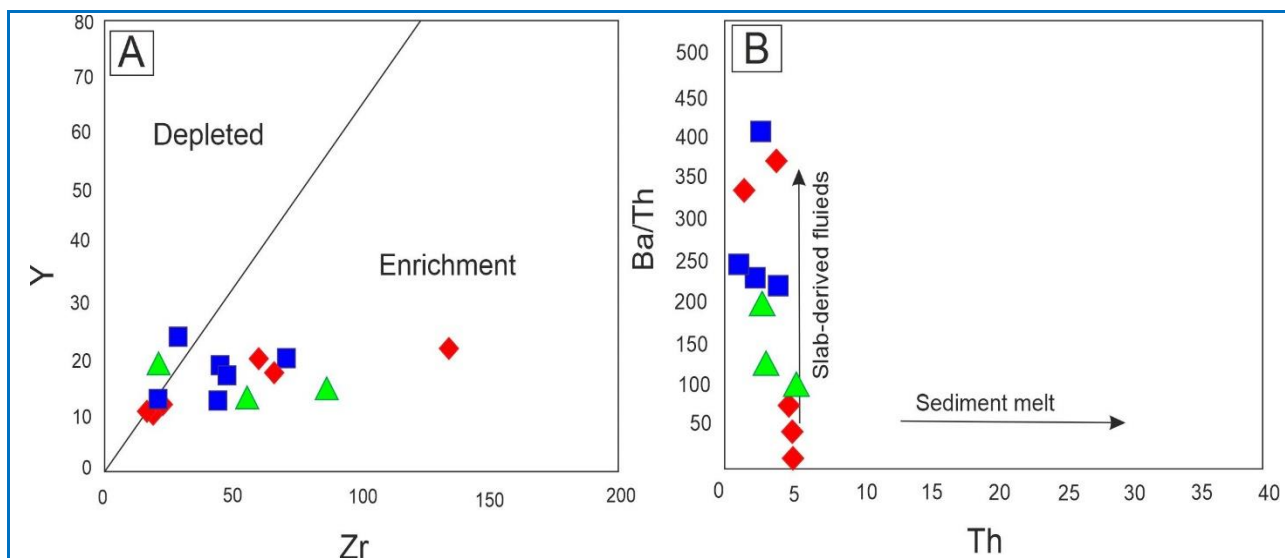
گوشته زیرقاره‌ای هستند. این نمودار نشان می‌دهد خاستگاه مذاب سازنده نمونه‌های آتشفشانی جنوب منطقه مامونیه یک گوشته غنی شده اسپینل+گارنت لرزولیتی با درجه ذوب‌بخشی کم (۴۰ تا ۲۰ درصد) و یک گوشته کمتر غنی شده اسپینل لرزولیتی با درجه ذوب‌بخشی بالا (۴۰ تا ۵۰ درصد) بوده است. افزایش درجه ذوب‌بخشی تهی‌شدگی خاستگاه گشته‌ای را افزایش می‌دهد (Pearce and Peate, 1995). بر پایه داده‌های سان و مک‌دوناف (Sun and McDough, 1989)، مقدار Zr/Y برابر با ۲/۴۶ و Nb/Y برابر با ۰/۰۸ نشان‌دهنده خاستگاه گشته‌ای تهی‌شده است. این نسبت‌ها برای نمونه‌های جنوب منطقه مامونیه به ترتیب در بازه ۰/۸ - ۶ و ۰/۱۷ - ۰/۸۶ در نوسان است و جدایش نمونه‌های منطقه از خاستگاه گوشته‌ای غنی‌شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار Zr در برابر Y (شکل ۱۱-A) نیز وابستگی زایشی سنگ‌های منطقه به گوشته غنی‌شده به خوبی روشن است. برای شناسایی نقش نهشته‌های تخته فرورونده نمودار Th در برابر Ba/Th به کار برده شد (شکل ۱۱-B). این عنصرها نشانگرهای ارزشمندی از مشارکت سیال‌ها یا دخالت رسوب‌ها در پیدایش ماگماهای فرورانشی هستند (Khademian et al., 2022)؛ زیرا Ba به علت تحرک بالا در سیال‌ها حل می‌شود. در برابر آن، Th به علت نامتحرک بودن وارد سیال‌های غنی از عنصرهای متحرک (مانند LILE) نمی‌شود؛ اما در مذاب‌های جدا شده از رسوب‌های تخته فرورونده تحرک بیشتری از خود نشان می‌دهد (Woodhead et al., 2001). در این نمودار، مقدار بالای Th نشان‌دهنده تأثیر رسوب‌های پلاژیک در خاستگاه ماگماست؛ اما بالا بودن میزان Ba/Th نشان‌دهنده تأثیر سیال‌های آزاد شده از تیغه فرورونده در ترکیب ماگمای مادر است (Kirchenbaur and Münker, 2015; Ajalli et al., 2021).

¹¹ WAM: West Anatolian Mantle



شکل ۱۰. الگوسازی درجات مختلف ذوب‌بخشی در نمودار تغییرات Sm در برابر Sm/Yb (Aldanmaz et al., 2000).

Figure 10. Partial melting modeling based on Sm/Yb versus Sm variation diagram (Aldanmaz et al., 2000).

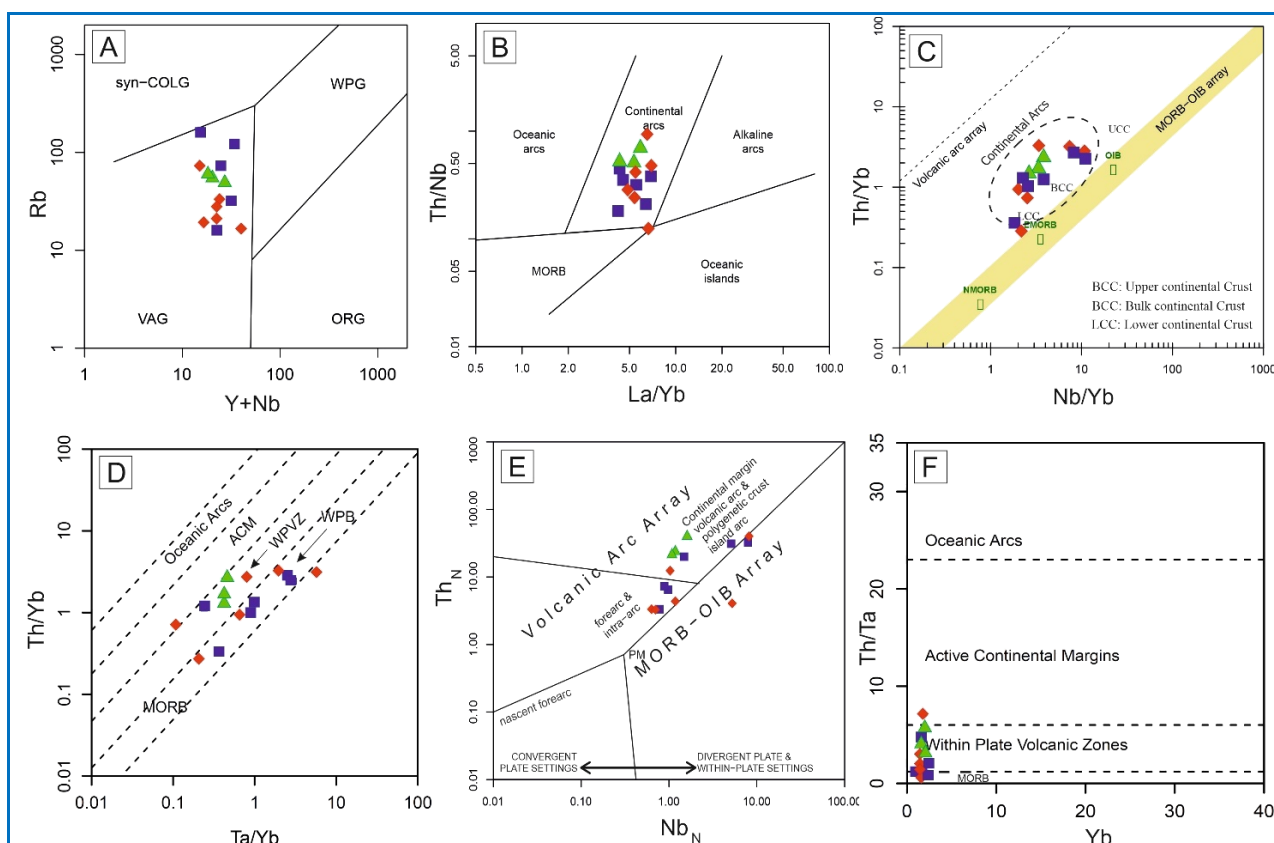


شکل ۱۱. A) نمودار Zr در برابر Y برای نمایش وابستگی زایش ماگما به گوشته غنی‌شده و تهی‌شده (Abu-Hamattah, 2005); B) نمودار Th در برابر Ba/Th برای نمایش تأثیر سیال جداسده از تخته فرورونده (Kirchenbaur et al., 2012).

Figure 11. A) Zr versus Y diagram for showing the magma genesis in relation to enriched and depleted mantle (Abu-Hamattah, 2005); B) Th versus Ba/Th diagram for showing the effect of slab-derived fluid (Kirchenbaur et al., 2012).

آتشفشانی به‌خوبی دیده می‌شود (شکل ۱۲-A). نمودار La/Yb در برابر Th/Nb، نشان‌دهنده ارتباط سنگ‌های آتشفشانی منطقه جنوب مامونیه با کمان آتشفشانی است (شکل ۱۲-B).

برای تعیین جایگاه زمین‌ساختی پیدایش سنگ‌های آتشفشانی جنوب منطقه مامونیه نیز از چندین نمودار بهره گرفته شد. در نمودار Y+Nb برابر Rb، وابستگی نمونه‌ها به محیط کمان



شکل ۱۲. ترکیب سنگ‌های آتشفشانی جنوب مامونیه در نمودارهای تعیین خاستگاه زمین‌ساختی پیدایش ماگما (A) نمودار Y+Nb در برابر Rb (Pearce et al., 1984); (B) نمودار La/Yb در برابر Th/Nb (Hollocher et al., 2012); (C) نمودار Nb/Yb در برابر Th/Yb (Pearce, 2008); (D) نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb (Schandl and Gorton, 2002); (E) نمودار Nb_N در برابر Th_N (Saccani, 2015); (F) نمودار Yb در برابر Th/Ta (Gorton and Schandl, 2000).

Figure 12. Composition of volcanic rocks from the southern Mamoniye area in the tectonomagmatic discrimination diagrams (A) Y+Nb versus Rb (Pearce et al., 1984); (B) La/Yb versus Th/Nb (Hollocher et al., 2012); (C) Nb/Yb versus Th/Yb (Pearce, 2008); (D) Ta/Yb versus Th/Yb (Schandl and Gorton, 2002); (E) Nb_N versus Th_N (Saccani, 2015); (F) Yb versus Th/Ta (Gorton and Schandl, 2000).

قاره و کمان جزیره‌ای پوسته پلی‌ژنتیک^{۱۲} و همچنین، پیش‌کمانی و درون‌کمان^{۱۳} جای می‌گیرند (شکل ۱۲-۱۲). در نمودار Yb در برابر Th/Ta نیز نمونه‌ها در محدوده WPVZ و MORB جای می‌گیرند (شکل ۱۲-۱۲). الگوهای تکتونوماگمایی در این منطقه همانند پهنه ماگمایی ارومیه-دختر است که همگی نشان‌دهنده نقش فرورانش سنگ‌کره اقیانوسی-نئوتتیس به زیر صفحه ایران هستند. به‌دنبال این فرورانش، ماگماتیسم کمانی و

نمودار Nb/Yb در برابر Th/Yb نسبت ورود مواد پوسته نسبت به ورود مواد مرتبط با فرورانش در سیستم‌های ماگمایی را نشان می‌دهد. در این نمودار، وابستگی نمونه‌ها به محیط کمان آتشفشانی دیده می‌شود (شکل ۱۲-۱۲). در نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb، نمونه‌های جنوب منطقه مامونیه در محدوده پهنه‌های آتشفشانی درون‌قاره‌ای (WPVZ)، بازالت‌های درون‌صفحه‌ای (WPB) جای گرفته‌اند (شکل ۱۲-۱۲). در نمودار Nb_N در برابر Th_N، نمونه‌ها در محدوده کمان ماگمایی حاشیه

¹² Polygenetic crust island arc

¹³ Forearc and intra-arc

پورفیری با زمینه تراکیتی و نهان‌بلور، غربالی، اینترگرانولار، اینترسرتال، هیالومیکرولیت و هیالوپورفیری، نهان‌بلورین پورفیری و میکروگرانولار در نمونه‌ها هستند. این مجموعه آتشفشانی غنی‌شدگی از عنصرهای سنگ‌دوست بزرگ یون (LILE) مانند Rb، Ba و K، غنی‌شدگی از عنصرهای خاکی کمیاب سبک (LREE) و تهی‌شدگی از عنصرهای با میدان پایداری بالا (HFSE) مانند Nb، Ti و P است که می‌تواند گواهی بر برخاستن ماگمای پدیدآورنده این سنگ‌ها از گوشته سست‌کره‌ای دگرنهادده در بالای پهنه فرورانش باشد. بررسی تغییرات عنصرهای کمیاب نشان‌دهنده رخداد آلایش با مواد پوسته‌ای و آمیختگی هنگام بالآمدن ماگمای مادر سنگ‌های آتشفشانی منطقه جنوب مامونیه است؛ چنانچه ناهنجاری بسیار مثبت Pb و مثبت K در نمودار عنکبوتی نیز گویای آلایش با مواد پوسته‌ای و یا دگرنهادشدن ناحیه گوشته‌ای با مذاب حاصل از تخته فرورونده و نقش سیال‌های آزادشده از تخته فرورونده در ترکیب ماگمای مادر و تکامل ماگمایی منطقه است. بر پایه داده‌های زمین‌شیمیایی و سنگ‌شناسی نمونه‌های آتشفشانی جنوب منطقه مامونیه از یک گوشته غنی‌شده اسپینل+گارنت لرزولیتی با درجه ذوب‌بخشی کم (۴۵ تا ۲۰ درصد) و یک گوشته کمتر غنی اسپینل لرزولیتی با درجه ذوب‌بخشی بیشتر (۲۵ تا ۴۵ درصد) خاستگاه گرفته‌اند. بر پایه نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی، بیشتر نمونه‌ها به محیط کمان آتشفشانی و پهنه فرورانشی وابسته هستند. با در نظر گرفتن همه شواهد می‌توان گفت فرایند فرورانش که همراه با آزادسازی آب و مواد فرار از سنگ‌کره فرورونده بوده است موجب دگرنهادشدن گوشت‌های ذوب‌بخشی آن به کمک سیال‌های آزادشده از سنگ‌کره اقیانوسی فرورونده شده است. در پایان، ماگمای حاصل هنگام گذر و یا توقف احتمالی در پوسته با مواد پوسته‌ای آلایش یافته است که این الگو با یافته‌های پیشنهادشده برای سراسر پهنه ماگمایی ارومیه- دختر و منطقه ساوه نیز همخوانی دارد.

پشت‌کمانی در محدوده گسترده‌ای از ایران رخ داده که نقطه اوج آن در ائوسن بوده است. در بازه زمانی ائوسن، برهم‌کنش فرایندهای مختلفی مانند برگشت به عقب تخته فرورونده، پیدایش یک محیط زمین‌ساختی کششی در بالای تیغه فرورونده، صعود گوشته سست‌کره‌ای و در کنار آن ذوب‌بخشی گوشته سنگ‌کره‌ای در رخداد ماگماتیسیم ائوسن در ارومیه- دختر نقش داشته باشند (Delavari and Damghani, 2022). در پیدایش ماگما در رژیم زمین‌ساختی پهنه‌های کمان قاره‌ای، عواملی مانند چرخش تخته فرورونده و شکسته‌شدن تخته ممکن است مؤثر باشند (Azizi et al., 2016). به باور وردل و همکاران (Verdel et al., 2011)، ماگماتیسیم پالئوژن کمان ارومیه-دختر و منطقه ساوه پیامد یک مرحله کششی در پی عقب‌گرد صفحه اقیانوسی فرورونده دانسته شده است. شاید عقب‌گرد پوسته اقیانوسی در ترشیری، مسئول اصلی بالآمدن گوشته سست‌کره‌ای گرم است که در پی آن درجه زمین‌گرمایی در ژرفای گوشته بالایی افزایش یافته است و در پایان، به ذوب گوشته سنگ‌کره‌ای کمک کرده است. این الگوی ژئودینامیکی برای مناطق همجوار با منطقه مطالعاتی در کمان ماگمایی ارومیه- دختر نیز بحث شده است (Yeganehfar et al., 2013; Ghorbani et al., 2014; Babazadeh et al., 2017).

برداشت

سنگ‌های آتشفشانی جنوب مامونیه در بخش میانی پهنه ماگمایی ارومیه- دختر شامل رخنمون‌های متنوعی از ریولیت، داسیت، تراکی‌داسیت، تراکیت، آندزیت، تراکی‌آندزیت، بازالت تراکی‌آندزیت و تراکی‌بازالت هستند که بر پایه داده‌های موجود، سرشت ماگمایی آنها کالک‌آلکالین تشخیص داده شد. شواهد میکروسکوپی گویای وجود بافت‌های آذرآواری،

سپاس‌گزاری

این مقاله بخشی از رسالهٔ دکتری زمین‌شناسی اقتصادی مربوط به دانشگاه لرستان است که با همکاری گروه لیتوسفر دانشگاه وین نوشته شده است. از همهٔ کسانی که در انجام

این پژوهش همکاری داشته‌اند سپاس‌گزاری می‌شود. همچنین، از داوران گرامی برای بررسی دقیق و پیشنهادهای ارزنده و از سردبیر محترم و هیات تحریریه نشریهٔ پتروولوژی سپاس‌گزاری می‌شود.

References

- Abu-Hamattah, Z.S.H. (2005) Geochemistry and petrogenesis of mafic magmatic rocks of the Jharol Belt, India: geodynamic implication. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25, 557-581. <http://www.doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.05.006>
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B., and Wortel, R. (2011) Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine*, 1-34. <http://www.doi.org/10.1017/s001675681100046x>
- Aghanabati, A. (1998) Major sedimentary and structural units of Iran (map). *Geosciences* 7. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Azizi, H., Mohammadi, K., Asahara, Y., Tsuboi, M., Daneshvar, N., and Mehrabi, B. (2016) Strongly peraluminous leucogranite (Ebrahim-Attar granite) as evidence for extensional tectonic regime in the Cretaceous, Sanandaj Sirjan zone, northwest Iran. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 76 (4), 529-541. <http://www.doi.org/10.1016/j.chemer.2016.08006>
- Ajalli, N., Torkian, A., and Tale Fazel, E. (2021) Geochemistry of basaltic rocks of Meshkin- Rasht Abad area (North of Zanjan). *Petrological Journal*, 45, 1-18 (in Persian). <http://www.doi.org/10.22108/ijp.2020.120869.1158>
- Aldanmaz, E., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F., and Mitchell, J.G. (2000) Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102, 67-95. [http://www.doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00182-7](http://www.doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00182-7)
- Allen, M.B., and Armstrong, H.A. (2008) Arabia-Eurasia collision and the forcing of mid-Cenozoic global cooling. *Palaeogeogr, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 265(1-2), 52-58. <http://www.doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.04.021>
- Ahmadzadeh, G., 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. <http://www.doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.02.008>
- Amidi, S.M., Emami, M.H., and Michel, R. (1984) Alkaline character of Eocene volcanism in the middle part of Iran and its geodynamic situation. *Geologische Rundschau* 73, 917-932. <http://www.doi.org/10.1007/BF01820882>
- Amidi, S.M., Shahrabi, M., and Navai, I. (2004) Geological map of Zaviyeh. Report No. 6160. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Asiabanha, A., Foden, J. (2012) Post Collisional transition from an extensional volcano-sedimentary basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. *Lithos* 148, 98-111. <http://www.doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.014>
- Asiabanha, A., Bardintzeff, J.M., Kananian, A., and Rahimi, G. (2012) Post-Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. *Asian Earth Sciences* 45(1), 79-94. <http://www.doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.09.020>
- Aslan, Z., Erdem, D., Temizel, İ., and Arslan, M. (2017) SHRIMP U-Pb zircon ages and whole-rock geochemistry for the Şapçı volcanic rocks, Biga Peninsula, Northwest Turkey: implications for pre eruption crystallization conditions and source characteristics. *International Geology*

- Review, 59(14), 1764-1785. <http://www.doi.org/10.1080/00206814.2017.1295282>
- Ayabe, M., Takanashi, K., Shuto, K., Ishimoto, H., and Kawabata, H. (2012) Petrology and geochemistry of adakitic dacite and high-MgO andesites, and related calc-alkaline dacites from the Miocene Okoppe volcanic field, Northeast Hokkaido, Japan. *Journal of Petrology* 53, 547-588. <http://www.doi.org/10.1093/petrology/egr071>
- Babazadeh, S., Raeisi, D., D'Antonio, M., Zhao, M., Long, L.E., Cottle, J.M., and Modabberi, S. (2022) Petrogenesis of Miocene igneous rocks in the Tafresh area (Central Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran): Insights into mantle sources and geodynamic processes. *Geological Journal*, 57(7), 2884-2903. <http://www.doi.org/10.1002/gj.4451>
- Babazadeh, S., Haase, K., Ghalamghash, J., Regelous, M., Poujol, M., Raeisi, D., and Zhao, M. (2023) Magmatic evolution of the migrating central Urumieh-Dokhtar arc, Iran: Implications for magma production. *International Journal of Earth Sciences*, 112(5), 1577-1597. <http://www.doi.org/10.1007/s00531-023-02314-5>
- Berberian, F., Muir, I.D., Pankhurst, R.J., and Berberian, M. (1981) Late Cretaceous and early Miocene Andean-type plutonic activity in northern Makran and Central Iran. *Journal of the Geological Society of London*, 139(5), 605-614. <http://www.doi.org/10.1144/gsjgs.139.5.0605>
- Barnes, S.J., Acterberg, E., Makovicky, E., and Li, C. (2001) Proton probe results for partitioning of platinum group elements between mono-sulfide solid solution and sulfide liquid. *South African Journal of Geology*, 104, 337-351. <http://www.doi.org/10.2113/gssajg.104.4.275>
- Babazadeh, S., Ghorbani, M.R., Bröcker, M., D'Antonio, M., Cottle, J., Gebbing, T., Mazzeo, F. C., and Ahmadi, P. (2017) Late Oligocene-Miocene mantle upwelling and interaction inferred from mantle signatures in gabbroic to granitic rocks from the Urumieh- Dokhtar arc, south Ardestan, Iran. *International Geology Review*, 1-19. <http://www.doi.org/10.1080/00206814.2017.1286613>
- Chaharlang, R., Ghalamghash, J., Saitoh, Y., Ducea, M.N., and Schmitt, A.K. (2023) Sr–Nd isotopes of Sabalan Volcano, NW Iran: insights into the origin of collisional adakites and geodynamic implications. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)* 112, 2065–2080. <https://doi.org/10.1007/s00531-023-02338-x>
- Chiu, H.Y., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Khatib, M.M., and Iizuka, Y. (2013) Zircon U-Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan subduction and Zagros orogeny. *Lithos* 162, 70-87. <http://www.doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.006>
- Cox, K.G., Bell, J.D., and Pankhurst, R.J. (1989) *The interpretation of igneous rocks*, 450p. Unwin Hyman, London.
- Davarpanah, A. (2009) *Magmatic Evolution of the Eocene Volcanic Rocks of the Bijgerd Kuh E Kharchin Area, Urumieh-Dokhtar Zone, Iran*. Master of Science Thesis. 154 pp. Georgia State University, Athens, Georgia, United States.
- Defant, M.J., Jackson, T.E., Drummond, M.S., De Boer, J.Z., Bellon, H., Feigenson, M.D., Maury, R.C., and Stewart, R.H. (1992) The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: An overview: *Geological Society of London Journal*, 149, 569-579. <http://www.doi.org/10.1144/gsjgs.149.4.0569>
- Defant, M.J., and Drummond, M.S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by partial melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347, 662-665. <http://www.doi.org/10.1038/347662a0>
- Delavari, M., and Damghani, A. (2022) Geochemical variations of the Eocene volcanic rocks from Kahak area (south of Qom): Evidence for different conditions of mantle melting in the Urumieh-Dokhtar magmatic arc. *Petrological Journal*, 50, 91-120 (in Persian). <http://www.doi.org/20.1001.1.22285210.1401.13.2.6.6>

- Dolatshahi, S., Zamanian, H., Karimzadeh Somarin, A., and Yang, X. (2019) Petrology, geochemistry and tectonic setting of the intrusive mass associated with Rangraz copper deposit (North of Saveh, central part of Urumieh-Dokhtar magmatic arc). *Petrological Journal*, 38, pp. 79-98 (in Persian). <http://www.doi.org/10.22108/ijp.2019.116329.1131>
- Fazli, N. (2015) Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of the North Narbaghi epithermal deposit, northeast of Saveh. 201 pp. Master's thesis, Department of Geology. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (In Persian).
- Fazli, N., Ghaderi, M., Lentz, D., and Li, J. (2019) Geology, alteration, mineralization and geochemistry of the North Narbaghi epithermal Ag-Cu deposit, northeast Saveh. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 28, 112, 13-22 (in Persian). <http://www.doi.org/10.22071/gsj.2018.97142.1246>
- Feng, J.L., Gao, S.P., and Zhang, J.F. (2011) Lanthanide tetrad effect in ferromanganese concretions and terra rossa overlying dolomite during weathering. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 71, 349-362. <http://www.doi.org/10.1016/j.chemer.2011.06.001>
- Feely, T.C., Cosca, M.A., and Lindsay, C.R. (2002) Petrogenesis and implications of calc-alkaline cryptic hybrid magmas from Washburn volcano, Absaroka volcanic province, U.S.A. *Journal of Petrology*, 43(4), 663-703. <http://www.doi.org/10.2113/gscanmin.38.5.1065>
- Ghasemi, A., and Talbot, C.J. (2007) A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6), 683-693. <http://www.doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.01.003>
- Ghasemi, H., Rostami, M., and Sadeghian, M. (2017) Basic magmatism in extensional back-arc basin of the Lower-Middle Jurassic at the Northern edge of Central Iran South of Eastern Alborz zones, Shahrood-Damghan. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27, 107 (in Persian). <http://www.doi.org/10.22071/gsj.2018.63800>
- Ghorbani, M.R., Graham, I.T., and Ghaderi, M. (2014) Oligocene-Miocene geodynamic evolution of the central part of Urumieh-Dokhtar Arc of Iran. *International Geology Review*, 56(8), 1039-1050. <http://www.doi.org/10.1080/00206814.2014.919615>
- Gorton, M.P., and Schandl, E.S. (2002) From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *Can Min*, 38, 1065-1073. <http://www.doi.org/10.2113/gscanmin.38.5.1065>
- Gorton, M.P., and Schandl, E.S. (2000) From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *The Canadian Mineralogist*, 38(5), 1065-1073. <http://www.doi.org/10.2113/gscanmin.38.5.1065>
- Geng, H., Sun, M., Yuan, C., Xiao, W., Xian, W., Zhao, G., Zhang, L., Wong, K., and Wu, F. (2009) Geochemical, Sr-Nd, and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: implications for ridge subduction. *Chemical Geology*, 266(3), 364-389. <http://www.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.07.001>
- Harker, A. (1909) The natural history of igneous rocks. 377 pp. Macmillan, London.
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., and Mitchell, S.F. (2007) Classification of altered volcanic arc rocks using immobile trace elements: development of the th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48(12), 2341-2357. <http://www.doi.org/10.1093/petrology/egm062>
- Heidari, S.M., Safavy, S. (2023) Geology and mineralization of the NE Narbaghi epithermal Cu (Au-Ag) deposit (Saveh). *Advanced Applied Geology*, 13(1), 1-25 (in Persian). <http://www.doi.org/10.22055/aag.2022.38941.2256>
- Hollocher, K., Robinson, P., Walsh, E., and Roberts, D. (2012) Geochemistry of amphibolite-facies volcanics and gabbros of the Storen Nappe in extensions west and southwest of Trondheim,

- western Gneiss region, Norway: A key to correlations and paleotectonic settings. *American Journal of Science*, 312(4), 357-416. <http://www.doi.org/10.2475/04.2012.01>
- Jamshidzaei, A., Torabi, G., Morishita, T., and Tamura, A. (2021) Eocene dike swarm and felsic stock in Central Iran: roles of metasomatized mantle wedge and Neo-Tethyan slab. *Journal of Geodynamics*, 145, 101844. <http://www.doi.org/10.1016/j.jog.2021.101844>
- Karsli, O., Chen, B., Aydin, F., and Şen, C. (2007) Geochemical and Sr Nd–Pb isotopic compositions of the Eocene Dölek and Sariçiçek Plutons, Eastern Turkey: Implications for magma interaction in the genesis of high-K calc-alkaline granitoids in a post-collision extensional setting. *Lithos*, 98(1–4), 67-96, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.03.005>
- Kaygusuz, A., Aslan, Z., AydTnçakTr, E., Yücel, C., Gücer, M. A. and Wen, C. (2018) Geochemical and Sr-NdPb isotope characteristics of the Miocene to Pliocene volcanic rocks from the Kandilli 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>
- Khademian, F., Alaminia, Z., Ghasemi, A., and Nadimi, A. (2022) Petrology, trace and rare earth elements geochemistry, and tectonic setting of basic- intermediate volcanic rocks from northwest of Nain, Isfahan. *Petrological Journal*, 52, 1-34 (in Persian). <http://www.doi.org/10.22108/ijp.2023.134625.1285>
- Khedr, M.Z., and Arai, S. (2016) Petrology of a Neoproterozoic Alaskan-type complex from the Eastern Desert of Egypt: implications for mantle heterogeneity. *Lithos*, 263, 15-32. <http://www.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.016>
- Kirchenbaur, M., and Münker, C. (2015) The behavior of the extended HFSE group (Nb, Ta, Zr, Hf, W, Mo) during the petrogenesis of mafic K- rich lavas: the Eastern Mediterranean case. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 165, 178-199. <http://www.doi.org/10.1016/j.gca.2015.05.030>
- Kirchenbaur, M., Münker, C., Schuth, S., Garbe- Schonberg, D., and Marchev, P. (2012) Tectonomagmatic constraints on the sources of Eastern Mediterranean K-rich lavas. *Journal of Petrology*, 53, 27- 65. <http://www.doi.org/10.1093/petrology/egr055>
- Lustrino, M., Fedele, L., Agostini, S., Prelević, D., and Salari, G. (2019) Leucitites within and around the Mediterranean area. *Lithos*, 324-325, 216-233. <http://www.doi.org/10.1016/j.gr.2020.03.014>
- Lustrino, M., Salari, G., Rahimzadeh, B., Fedele, L., Masoudi, F., and Agostini, S. (2021) Quaternary melanephelinites and melilitites from Nowbaran (NW Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Iran): origin of ultrabasic-ultracalcic melts in a post-collisional setting. *Journal of Petrology* 62, 1-31. <http://www.doi.org/10.1093/petrology/egac079>
- Madanipour, S., Ehlers, T.A., Yassaghi, A., and Enkelmann, E. (2017) Accelerated middle Miocene exhumation of the Talesh Mountains constrained by U-Th/He thermochronometry: Evidence for the Arabia-Eurasia collision in the NW Iranian Plateau. *Tectonics*, 36, 1538–1561, <http://www.doi.org/10.1002/2016TC004291>
- Mason, B., and Moore, C.B. (1982) *Principles of geochemistry*. 43 pp. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Moghadam, H.S., Ghorbani, G., Zaki Khedr, M., Fazlnia, N., Chiaradia, M., Eyuboglu, Y., Santosh, M., Galindo Francisco, C., Lopez Martinez, M., Gourgaud, A., and Arai, S. (2014) Late Miocene K-rich volcanism in the Eslamieh Peninsula (Saray), NW Iran: implications for geodynamic evolution of the Turkish-Iranian High Plateau. *Gondwana Research* 26, 1028-1050. <http://www.doi.org/10.1016/j.gr.2013.09.015>
- Moghadam, H., Li, X.H., Ling, X.X., Santos, J.F., Stern, R.J., Li, Q.L., and Ghorbani, G. (2015) Eocene Kashmar granitoids (NE Iran): petrogenetic constraints from U-Pb zircon

- geochronology and isotope geochemistry. *Lithos*, 216, 118-135. <http://www.doi.org/10.1016/j.lithos.2014.12.012>
- Moghadam, H.S., Li, Q.L., Griffin, W.L., Stern, R.J., Santos, J.F., Ducea, M.N., Ottley, C.J., Karsli, O., Sepidbar, F., and O'Reilly, S.Y. (2022) Temporal changes in subduction- to collision related magmatism in the Neotethyan orogen: the Southeast Iran example. *Earth-Science Reviews* 226, 103930. <http://www.doi.org/10.1016/j.gr.2020.03.014>
- Monecke, T., Dulski, P., and Kempe, U. (2007) Origin of convex tetrads in rare earth element patterns of hydrothermally altered siliceous igneous rocks from the Zinnwald Sn-W deposit, Germany. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 335-353. <http://www.doi.org/10.1016/j.gca.2006.09.010>
- McQuarrie, N., and van Hinsbergen, D.J.J. (2013) Retrodeforming the Arabia-Eurasia collision zone: Age of collision versus magnitude of continental subduction. *Geology* 41(3), 315-318. <http://www.doi.org/10.1130/G33591.1>
- Munker, C., Worner, G., Yogodzinski, G., and Churikova, T. (2004) Behaviour of high field strength elements in subduction zones: constraints from Kamchatka-Aleutian arc lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(3-4), 275-293. <http://www.doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.030>
- Nouri, N., Azizi, H., Stern, R., Asahara, Y., Khodaparast, S., Madanipour, S., and Yamamoto, K. (2018) Zircon U-Pb dating, geochemistry and evolution of the Late Eocene Saveh magmatic complex, central Iran: Partial melts of sub-continental lithospheric mantle and magmatic differentiation. *Lithos*, 314-315, 274-292. <http://www.doi.org/10.1016/j.lithos.2018.06.013>
- Nakamura, N. (1974) Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na, and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochemical Acta*, 38(5), 757-775. <http://www.doi.org/10.1016/0016-7037>
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G., and Jolivet, L. (2008) Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: a new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106, 380-398. <http://www.doi.org/10.1016/j.lithos.2008.09.008>
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Lin, Y.C., Lee, H.Y., Lo, C.H., and Khatib, M.M. (2013) Iranian ultrapotassic volcanism at ~11 Ma signifies the initiation of post-collisional magmatism in the Arabia-Eurasia collision zone. *Terra Nova*, 25, 405-413. <http://www.doi.org/10.1016/j.gr.2020.03.014>
- Pearce, J.A. (1983) Role of the Sub-Continental Lithosphere in Magma Genesis at Active Continental Margins. In C.J., Hawkesworth, and M.J., Norry, Eds., *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, p. 230-249, Shiva Cheshire, UK. <http://www.doi.org/10.4236/me.2014.51005>
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., and Tindle, A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25(4), 956-983. <http://www.doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Pearce, J.A. (1996) A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: Trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulfide exploration. In D.A., Wyman, Ed., *Short Course Notes*, 12, p. 79-113. Geological Association of Canada. <http://www.doi.org/10.4236/ojg.2016.610095>
- Pearce, J.A., and Peate, D.W. (1995) Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23, 251-285. <http://www.doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.001343>
- Pearce, J.A. (2008) Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100, 14-48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>

- Peretyazhko, I.S., and Savina, E.A. (2010) Tetrad effects in the rare earth element patterns of granitoid rocks as an indicator of fluoride silicate liquid immiscibility in magmatic systems. *Petrology*, 18, 514-543. <http://www.doi.org/10.1134/S086959111005005X>
- Rabiee, A., Rossetti, F., Asahara, Y., Azizi, H., Lucci, F., Lustrino, M., and Noazem, R. (2020) Long-lived, Eocene-Miocene stationary magmatism in NW Iran along a transform plate boundary. *Gondwana Research* 85, 237-262. <http://www.doi.org/10.1016/j.gr.2020.03.014>
- Rajabpour, S. (2015) Mineralogy, alteration and geochemistry of the volcanic copper deposit of Kohe-Peng Saveh, the middle part of the Urumieh-Dakhtar subduction zone. 332 pp. PhD thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (In Persian).
- Raeisi, D., Zhao, M., Babazadeh, S., Long, L.E., Hajsadeghi, S., and Modabberi, S. (2021) Synthesis on productive, sub productive and barren intrusions in the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran, constraints on geochronology and geochemistry. *Ore Geology Review*, 132, 103997. <http://www.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.103997>
- Rajabpour, S., Behzadi, M., Jiang, S.Y., Rasa, I., Lehmann, B., and Ma, Y. (2017) Sulfide chemistry and sulfur isotope characteristics of the Cenozoic volcanic-hosted Kuh-Pang copper deposit, Saveh county, northwestern central Iran. *Ore Geology Reviews* 86, 563-583. <http://www.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.03.001>
- Rezaei Kahkhaei, M., Galindo, C., Pankhurst, R.J., and Esmaeily, D. (2011) Magmatic differentiation in the calc-alkaline Khalkhab-Neshveh pluton, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42, 499-514. <http://www.doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.04.022>
- Rezaei Kahkhaei, M., Esmaili, D., and Francisco, C.G. (2014) Geochemical and isotopic (Nd and Sr) constraints on elucidating the origin of intrusions from northwest Saveh, Central Iran. *Geopersia* 4(1): 103-123. <http://www.doi.org/10.22059/jgeope.2014.51195>
- Rollinson, H.R. (1993) Using geochemical data Evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, 352p. Wiley, New York, 352.
- Ruprecht, P., Bergantz, G.W., Cooper, K.M., and Hildreth, W. (2012) The crustal magma storage system of Volcán Quizapu, Chile, and the effects of magma mixing on magma diversity. *Journal of Petrology* 53(4), 801-840. <http://www.doi.org/10.1093/petrology/egs002>
- Salari, G., Lustrino, M., Ghorbani, M.R., Agostini, S., and Fedeale, L. (2021) Petrological characterization of the Cenozoic igneous rocks of the Tafresh area, central Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (Iran). *Periodico di Mineralogia*, 90(1), 59-83. <http://www.doi.org/10.13133/2239-1002/16620>
- Schandl, E.S., and Gorton, M.P. (2002) Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology* 97, 629-642. <http://www.doi.org/10.2113/97.3.629>
- Shahsavari Alavijeh, B., Rashidnejad-Omran, N., Toksoy-Köksal, F., Xu, W., and Ghalamghash, J. (2019) Oligocene subduction-related plutonism in the Nodoushan area, Urumieh-Dokhtar magmatic belt: Petrogenetic constraints from U-Pb zircon geochronology and isotope geochemistry. *Geoscience Frontiers*, 10, 725-751. <http://www.doi.org/10.1016/j.gsf.2018.03.017>
- Shahabpour, J. (2007) Island-arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(5-6), 652-665. <http://www.doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.02.004>
- Shang, G.K., Satir, M., Siebel, W., Nasifa, E. N., Taubold, H., Liegeois, J.P., and Tchoua, F.M. (2004) Geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematic: case of the Sangmelima region, Ntem complex, southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 40(1-2), 61-79. <http://www.doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.02.004>

- Shellnutt, J.G., Bhat, G.M., Wang, K.L., Yeh, M.W., Brookfield, M.E., and Jahn, B.M. (2015) Multiple mantle sources of the early Permian Panjal Traps, Kashmir, India. *American Journal of Sciences*, 315, 589-619. <http://www.doi.org/10.2475/07.2015.01>
- Soesoo, A. (2000) Fractional crystallization of mantle-derived melts as a mechanism for some I-type granite petrogenesis: an example from Lachlan Fold Belt, Australia. *Journal of the Geological Society*, 157, 135– 149. <https://doi.org/10.1144/jgs.157.1.135>
- Stern, R.J., Moghadam, H.S., Pirouz, M., and Mooney, W. (2021) The geodynamic evolution of Iran. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 49, 9-36. <http://www.doi.org/10.1016/j.gr.2020.03.014>
- Sommer, C.A., Lima, E.F., Nardi, L.V.S., Liz, J.D., and Waichel, B.L. (2006) The evolution of Neoproterozoic magmatism in Southernmost Brazil: shoshonitic, high- K tholeiitic and silica saturated, sodic alkaline volcanism in post-collision basins. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 78, 573-589. <http://www.doi.org/10.1590/S0001-37652006000300015>
- Srivastava, R.K., and Singh, R.K. (2004) Trace element geochemistry and genesis of the Precambrian sub-alkaline mafic dikes from the central Indian craton: evidence for mantle metasomatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(3), 373-389. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00150-0)
- Sun, S.S., and McDonough, W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313-345. <http://www.doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Saccani E. (2015) A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematics. *Geosci Front* 6: 481-501. <http://www.doi.org/10.1016/j.gsf.2014.03.006>
- Tatsumi, Y. (1989) Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones. *Journal of Geophysical Research*, 94(B4), 4697-4707. <http://www.doi.org/10.1029/JB094iB04p04697>
- Tanirli, M. and Rizaoglu T. (2016) Whole-rock and mineral chemistry of mafic cumulates from the Low-Ti ophiolite in the southern part of Kahramanmaraş, Turkey. *Russian Geology and Geophysics*, 57, 1398-1418. <http://www.doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.018>
- Temel, A., Gundogdu, A., Gourgaud, M.N. (1998) Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic high-K calc-alkaline volcanism in Konya", Central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 327-354. [http://www.doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00062-6](http://www.doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00062-6)
- Tian, L., Castillo, P.R., Hawkins, J.W., Hilton, D.R., Hanan, B.B., and Piatruszka, A.J. (2008) Major and trace element and Sr-Nd isotope signatures of lavas from the Central Lau Basin: Implications for the nature and influence of subduction components in the back-arc mantle. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 657-670. <http://www.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.039>
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Hassanzadeh, J., and Guest, B. (2011) A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics*, 30(3), TC3008. <https://www.doi.org/10.1029/2010TC002809>
- Winchester, J.A., and Floyd, P.A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343. [http://www.doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](http://www.doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Winter, J.D. (2001) *An introduction to Igneous and Metamorphic petrology*, 697p. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Wade, J.A., Plank, T., Stern, R.J., Tollstrup, D.L., Gill, J.B., O'Leary, J.C., Eiler, J.M., Moore, R.B.,

- Woodhead, J.D., Trusdell, F., Fischer, T.P., and Hilton, D.R. (2005) The May 2003 eruption of Anatahan volcano, Mariana Islands: Geochemical evolution of a silicic island-arc volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 146, 139-170. <http://www.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.11.035>
- Wehrmann, H., Hoernle, K., Jacques, G., Garbe-Schönberg, D., Schumann, K., Mahlke, J., and Lara, L. (2014) Sulphur and chlorine geochemistry of mafic to intermediate tephras from the Chilean Southern Volcanic Zone (33-43°S) compared with those from the Central American Volcanic Arc. *International Journal of Earth Sciences*, 103, 1945-1962. <http://www.doi.org/10.1007/s00531-014-1006-9>
- Whitney, D.L., and Evans, B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187. <http://www.doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Whalen, J.B., McNicoll, V.J., van Staal, C.R., Lissenberg, C.J., Longstaffe, F.J., Jenner, G.A., and van Breeman, O. (2006) Spatial, temporal and geochemical characteristics of Silurian collision-zone magmatism, Newfoundland Appalachians: an example of a rapidly evolving magmatic system related to slab break-off. *Lithos*, 89, 377-404. <http://www.doi.org/10.1016/j.lithos.2005.12.011>
- Wilson, M. (1989) *Igneous Petrogenesis*. 466 pp. Unwin Hyman, London.
- Wilson, M. (2007) *Igneous Petrogenesis*, 411p. Chapman and Hall, London.
- Woodhead, J.D., Hergt, J.M., Davidson, J.P., and Eggins, S.M. (2001) Hafnium isotope evidence for conservative element mobility during subduction zone processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 192, 331-346. [http://www.doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00453-8](http://www.doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00453-8)
- Wu, F., Jahn, B., Wildec, S. A., Lod, C. H., Yuie, T. F., Lina, Q., Ge, W., and Sun, D. (2003) Highly fractionated I-type granites in NE China (II): isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3-4), 191-204. [http://www.doi.org/10.1016/S0024-4937\(03\)00015-X](http://www.doi.org/10.1016/S0024-4937(03)00015-X)
- Yeganehfar, H., Ghorbani, M.R., Shinjo, R., and Ghaderi, M. (2013) Magmatic and geodynamic evolution of Urumieh-Dokhtar basic volcanism, Central Iran: major, trace element, isotopic, and geochronologic implications. *International Geology Review*, 55, 767-786. <http://www.doi.org/10.1080/00206814.2012.752554>
- Yousefi, F., Sadeghian, M., Lentz, D.R., Wanhainen, C., and Mills, R.D. (2021) Petrology, petrogenesis, and geochronology review of the Cenozoic adakitic rocks of northeast Iran: Implications for evolution of the northern branch of Neo-Tethys. *Geological Journal*, 56(1), 298-315. <http://www.doi.org/10.1002/gj.3943>
- Yousefi, S. (2017) Mineralogy, alteration, geochemistry and formation pattern of Zarandiyeh copper deposit, northeast of Saveh. 178 pp. Master's thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (In Persian).
- Yousefi, S., and Alipourasl, M. (2019) Vein-type copper mineralization in the Zarandieh area based on mineralogy, geochemistry and fluid inclusions studies, Saveh, Markazi province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 28, 203-214 (in Persian). <http://www.doi.org/10.22071/gsj.2018.82635.1090>
- Yu, Q., Ge, W.C., Zhang, J., Zhao, G.C., Zhang, Y.L., and Yang, H. (2016) Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implication of Late Paleozoic Volcanic Rocks from the Dashizhai Formation in Inner Mongolia, NE China. *Gondwana Research*, 47, 164-177. <http://www.doi.org/10.1016/j.gr.2016.01.010>
- Zamanian, H., Dolatshahi, S., Yang, X., Karimzadeh S.A.M., and Meshkani, S.A. (2021) Geochemical, fluid inclusion and O-H-S isotope constraints on the origin of the Rangraz copper deposit, Central Iran. *Ore Geology Reviews*, 128, 103877.

<http://www.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103877>

- Zanetti, A., Tiepolo, M., Oberti, R., and Vannucci, R. (2004) Trace-element partitioning in olivine: modeling of a complete data set from a synthetic hydrous basanite melt. *Lithos*, 75, 39-54. <http://www.doi.org/10.1016/j.lithos.2003.12.022>
- Zhang, C., Liu, C.Z., Wu, F.Y., Zhang, L.L., and Ji, W.Q. (2016) Geochemistry and geochronology of mafic rocks from the Luobusa ophiolite, south Tibet. *Lithos*, 245, 93-108. <http://www.doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.031>
- Zhang, C.L., Li, Z.X., Li, X.H., and Ye, H.M. (2009) Neoproterozoic mafic dyke swarms at the northern margin of the Tarim Block, NW China: age, geochemistry, petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Science*, 35, 167-179. <http://www.doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.02.003>