

Original Research Paper

Geochemistry and tectono-magmatic setting of hypabyssal intrusive rocks in the south of Mamouniyeh, Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran

Mohammad Goudarzi¹, Hassan Zamanian^{*1,2}, and Urs Klötzli³¹ Department of Geology, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran² School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran³ Department of Lithospheric Research, Faculty of Earth Sciences, Geography and Astronomy, University of Vienna, Vienna, Austria

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2024 March 12

Accepted: 2024 July 23

Available online: 2025 March 21

Keywords:

Geochemistry

Tectonic setting

Subduction

Monzonite

Diorite

Urumieh-Dokhtar

ABSTRACT

The study area is located in the south of Mamouniyeh and middle part of the Urumieh-Dokhtar magmatic Arc. The Oligo-Miocene intrusive rocks have combined domain of gabbro, gabbroic diorite, diorite, monzonite, monzodiorite and quartz monzonite with calc-alkaline nature and they are metaluminous type, which microscopic evidence shows granular, heterogranular, hypidiomorphic, intersertal and porphyry textures in them. A notable feature is the LILE enrichment in comparison to HFSEs, a characteristic of calc-alkaline rocks from continental margin subduction zones. Positive Pb anomaly indicates contamination of the magma by crustal material, while the scarcity of elements such as Ti, Nb implies an altered lithospheric mantle source located above the subduction zone. The $Ba/Nb > 28$ and $Ba/Ta > 450$ indicate an active continental margin. A faint Eu anomaly, bending chondrite-normalized REE pattern, and balanced La/Yb ratios suggest a high-water content in the source magma. It appears that the origin of the magma involves the partial melting of low-grade spinel lherzolite mantle at a depth of 60-70 km. Geochemical analyses, align these granitoids with the active continental margin, stemming from Neotethys oceanic crust subduction beneath the central Iranian plate. This subduction facilitated mantle wedge metasomatism and partial melting through fluids released from the subducting oceanic crust.

1. Introduction



The study area is located in the Markazi province and south of Mamouniyeh, which is a part of the Zaviyeh 1:100,000 geological map and is positioned within the middle part of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc and characterized by the presence of volcanic

and intrusive rocks which are suitable for mineralization. The various magmatic and tectonic activities, there is a significant effect on the geological evolution of this area. Our recent study (Goudarzi et al., 2025a) indicates a long-term tectonomagmatic evolution

* Corresponding author: Hassan Zamanian; E-mail: zamanian.h@lu.ac.ir

Citation:Goudarzi M., Zamanian, H., and Klötzli, U., 2025. Geochemistry and tectono-magmatic setting of hypabyssal intrusive rocks in the south of Mamouniyeh, Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 35(1), 135, 129-148. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.447739.2139>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2024.447739.2139 dor: 20.1001.1.10237429.1404.35.1.8.9This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

from intermediate to mafic magma, spanning approximately 60 to 3 million years in the central part of the Urumieh-Dokhtar Belt, in the Saveh region. These findings highlight the complexities of tectonomagmatic evolution in this area. Additionally, processes such as fractional crystallization, crustal contamination, and magma mixing may play critical roles in the genesis of these rocks. Due to the lack of detailed studies on the hypabyssal intrusive rocks in this area (Mamouniyeh), our research aims to establish a link between the tectonic setting and the magmatic evolution of these rocks. Our study presents new petrological and geochemical data from this part of UDMA.

2. Research methodology

Sampling of surface volcanic units and drilled boreholes was carried out simultaneously with the preparation of a 1:20000 geological map of the area. Forty samples of hypabyssal intrusive rocks were collected based on lithological diversity and then thin sections were prepared and after studying petrography, 13 samples with the least amount of alteration were analyzed by ICP-MS and XRF methods and by combining the information obtained from field observations, microscopic studies and analysis of the main and rare elements using the GCDkit software, petrogenesis and the formation of volcanic rocks of the region have been investigated.

3. Results and discussions

3.1. Regional geology

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 km. The magmatic rocks within the UDMA show a variety of lithologies, including lavas, pyroclastic deposits, and plutonic rocks such as granites and diorites. These rocks originated from the subduction of the Arabian plate beneath the Eurasian plate, resulting in mantle melting and magma formation. In the middle part of UDMA, Eocene volcanic units have been significantly disrupted due to the intrusion and displacement caused by shear-compressional faulting. The granitoid intrusions exposed in the northwest of Saveh show a variable composition ranging from monzogabbro to granite. These masses include the Salijard granodiorite group, Nashweh granodiorite, and Khalkhab quartz monzodiorite. Based on Sr and Nd isotopic ratios, mantle metasomatism has played a significant role in the origin of these intrusive masses in the northwest of Saveh.

3.2. Petrography

According to petrographic studies, the rock types include monzonite, monzodiorite, diorite and gabbroicdiorite. The main outcrop area

of the gabbro-gabbroicdiorite units is in the northeastern part of the 1:20000 map of area which microscopic studies show granular, hetero-granular, hyp-idiomorphic and granular and porphyritic textures. Plagioclase, orthoclase, hornblende and clinopyroxene in different sizes are the main constituents of the rock. Secondary and alteration minerals include epidote, chlorite, actinolite, clay mineral, apatite, zircon, carbonate, iron oxide and hydroxide. The outcrops of monzonite, monzodiorite in the center, west and northeast include parts of the main elevations of study area. In microscopic studies the main textures are granular, porphyritic, porphyritic microgranular. The main minerals observed include plagioclase, K-feldspar, clinopyroxene, hornblende, quartz and secondary minerals are apatite and small amounts of zircon, clay minerals, chlorite, epidote, biotite, carbonate, iron oxides and tourmaline.

4. Conclusion

The amount of SiO_2 varies from 51.1 to 60.1wt.% and the total amount of Al_2O_3 from 14.2 to 17.7wt.%. The total amount of alkali elements in the samples varies from 4.7 to 6.67 wt.%. The magmatic series of rocks is calc-alkaline series and they are metaluminous. The geochemical data of REE suggest the effect of crystal segregation and mixing during magma ascent. In spider diagram (Primitive Mantle-normalized multi-element and Chondrite-normalized REE) samples show enrichment in large ion lithophile elements (LILE), especially Pb, U, Th and depleted of high field strength elements (HFSE), such as Nb, Ti, P, Yb. The strongly positive Pb anomaly can be caused by crustal involvement in magmatic processes. The Values > 28 in the Ba/Nb and > 450 in the Ba/Ta ratio for these rocks indicate an active continental margin setting. A weak Eu anomaly and a listric-shaped in chondrite-normalized REE pattern, along with moderate La/Yb ratios in the host suites, suggest a high-water content in the source magma. This likely led to early hornblende fractionation and the preferential depletion of MREEs, HREEs, and Y from the magma. The strongly positive Pb anomaly is indicative of the contamination of mantle-derived magma with crustal materials. The intrusive rocks in the south of Mamouniyeh originated from a garnet-poor mantle. The key role of the partial melting process in the origin of this intrusive bodies was known based on the ratios between La and La/Sm. The identification of the tectonic location using the ratio of minor elements indicates that the volcanic arc granitoids in the range of the active continental margin. The enrichment of Ce/Sm (average 1.8) is much higher than that of Sm/Yb (average 1.5), which occurs when garnet is not present at the origin, meaning that Ce has entered the mineral phase, as shown in the Sm/Yb vs. Ce/Sm plot. The available geochemical data shows the contamination with crustal materials and mixing during the ascent of parent magma and role of fluids released from the subducting

plate in the composition of the magma. As well as, during the ascent and presence of magma within the crust of subduction zone, it often becomes mixed with injections of fresh magma from the mantle. This process hinders its evolution through partial crystallization and preserves significant amounts of compatible elements, including copper. These elements are conducive to the formation of mineral

deposits in this region. Subduction process, which was accompanied by the release of water and volatile materials from the subducting spheroid, caused the metasomatism of the mantle wedge and its partial melting by the fluids released from the subducting oceanic spheroid. This pattern is consistent with the results presented in the entire of UDMA.

بررسی ژئوشیمی و جایگاه زمین‌ساختی-ماگمایی توده‌های نفوذی نیمه‌ژرف در جنوب مامونیه، بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر، ایران

محمد گودرزی^۱، حسن زمانیان^{۱*} و اورس کلوتزلی^۲^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران^۲ دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران^۳ گروه تحقیقات لیتوسفر، دانشکده علوم زمین، جغرافیا و نجوم، دانشگاه وین، وین، اتریش

چکیده

منطقه مطالعاتی در جنوب مامونیه و در بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر واقع شده است. توده‌های نفوذی با سن الیگومیوسن دارای بازه ترکیبی دیوریت، گابرو دیوریت، مونزونیت و مونزودیوریت با ماهیت کالک‌آلکان و از نوع متآلومینوس هستند که شواهد میکروسکوپی بافت‌های گرانولار، میکروگرانولار پورفیریتیک، هتروگرانولار، هیپایدیومورفیک، افیتیک و پورفیری را در آن‌ها نشان می‌دهد. غنی‌شدگی عناصر LILE نسبت به عناصر HFSE در توده‌های نفوذی منطقه از ویژگی‌های سنگ‌های کالک‌آلکان مناطق فرورانش حاشیه قاره‌ای است. غنی‌شدگی از عناصری مانند Pb, K, U, Th و تهی‌شدگی از عناصری مانند Nb, Ti, P, Yb شواهدی از آرایش ماگما با مواد پوسته‌ای و دلیلی بر منشا گرفتن ماگمای به‌وجود آورنده این سنگ‌ها از گوشته سست‌کره (آستونسفر) متاسوماتیسم شده در بالای پهنه فرورانش است. به‌نظر می‌رسد که خاستگاه ماگمای سازنده این توده‌ها، ذوب بخشی درجه پایین اسپینل لرزولیت گوشته دگرنگ‌ها در ژرفای حدود ۷۰ کیلومتری است. فرایندهای ذوب بخشی در پیدایش توده‌های نفوذی جنوب مامونیه نقش کلیدی داشته است. شناسایی جایگاه زمین‌ساختی با استفاده از نسبت عناصر جزئی نشان‌دهنده این است که نمونه‌های مورد مطالعه در زمره گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی و در محدوده مرز فعال قاره‌ای و مرتبط با ماگماتیسیم ناشی از فرورانش پوسته اقیانوسی تیتس جوان به زیر ورقه ایران مرکزی هستند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

ژئوشیمی

جایگاه زمین‌ساختی

فرورانش

مونزونیت

دیوریت

ارومیه-دختر

۱- پیش‌نوشتار

باختری به جنوب خاوری متوقف شده است (Chiu et al., 2013; Moghadam et al., 2022a; Stern et al., 2021). سنگ‌های اولترا پتاسیک (Ahmadzadeh et al., 2010; Pang et al., 2013; Lustrino et al., 2019) و آداکتیتی (Salari et al., 2021) نیز در این مرحله نمایان شده‌اند. ماگماتیسیم سنوزویک ارومیه-دختر به دو بخش آلومینیم بالا و آلومینیم پایین تقسیم‌بندی شده است که گروه آلومینیم بالا در ارتباط با فعالیت‌های پیش از برخورد و گروه آلومینیم پایین در ارتباط با فعالیت‌های پس از برخورد می‌باشند (Babazadeh et al., 2022). همچنین بابازاده و همکاران (Babazadeh et al., 2023) ماگماتیسیم بخش مرکزی ارومیه-دختر را به دو بخش ماگمایی ۳۸-۴۲ میلیون سال و ۱۸-۲۵ میلیون سال تقسیم‌بندی نموده‌اند. بر این

فعالیت ماگمایی مهم و گسترده‌ای در دوره زمانی از حدود ۵۵ میلیون سال پیش (پالئوسن-پسین - ائوسن پیشین) تا حدود ۳۷ میلیون سال پیش (ائوسن پسین) ایران را تحت تاثیر قرار داد (Verdel et al., 2011; Rossetti et al., 2014; Babazadeh et al., 2016; Kazemi et al., 2019; Honarmand et al., 2013; Lucci et al., 2016; Moghadam et al., 2015; Jafari et al., 2023). ماگماتیسیم کمربند ماگمایی ارومیه-دختر (UDMA) در طول ائوسن، با استقرار ماگماهای کالک‌آلکان مربوط به فرورانش (و تولیتی-شوشونیتی) به اوج خود رسیده است (Omran et al., 2008; Verdel et al., 2011; Rabiee et al., 2020). پس از شروع مرحله برخورد قاره‌ای در الیگوسن-میوسن شدت فعالیت ماگمایی کاهش یافته و سپس به تدریج از شمال

* نویسنده مسئول: حسن زمانیان؛ E-mail: zamanian.h@lu.ac.ir

ماخذنگاری:

گودرزی، م.، زمانیان، ح. و کلوتزلی، ا.، ۱۴۰۴، بررسی ژئوشیمی و جایگاه زمین‌ساختی-ماگمایی توده‌های نفوذی نیمه‌ژرف در جنوب مامونیه، بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر، ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۵(۱)، ۱۳۵-۱۲۹، ۱۴۸. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.447739.2139>

doi: 10.22071/gsj.2024.447739.2139



doi: 10.1001.1.10237429.1404.35.1.8.9

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

۲- روش پژوهش

جهت بررسی فرایندهای موثر در تشکیل و تکوین توده‌های نفوذی جنوب مامونیه، همزمان با تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ از منطقه (شکل ۱)، از رخنمون‌های سطحی و گمانه‌های حفر شده در محدوده مطالعاتی نمونه‌برداری شد. این نمونه‌برداری‌ها تنوع کاملی از سنگ‌های موجود در منطقه را در برداشت. تعداد ۴۰ نمونه از توده‌های نفوذی منطقه برداشت و سپس مقاطع نازک تهیه و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان به مطالعه سنگ‌نگاری آن‌ها پرداخته شد. از میان نمونه‌های یاد شده، ۱۳ نمونه با کمترین میزان دگرسانی برای آنالیز شیمیایی کل سنگ به روش ICP-MS و XRF در آزمایشگاه تجزیه و تحلیل مولد معدنی زراآما تهران مورد آنالیز قرار گرفتند و در نهایت، با استفاده از تلفیق اطلاعات به دست آمده از مشاهدات صحرایی، مطالعات میکروسکوپی و آنالیز عناصر اصلی و کمیاب با استفاده از نرم‌افزارهای GCDkit و Excel به بررسی پتروژن و نحوه تشکیل آن‌ها پرداخته شده است.

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- زمین‌شناسی عمومی و زمین‌ساخت

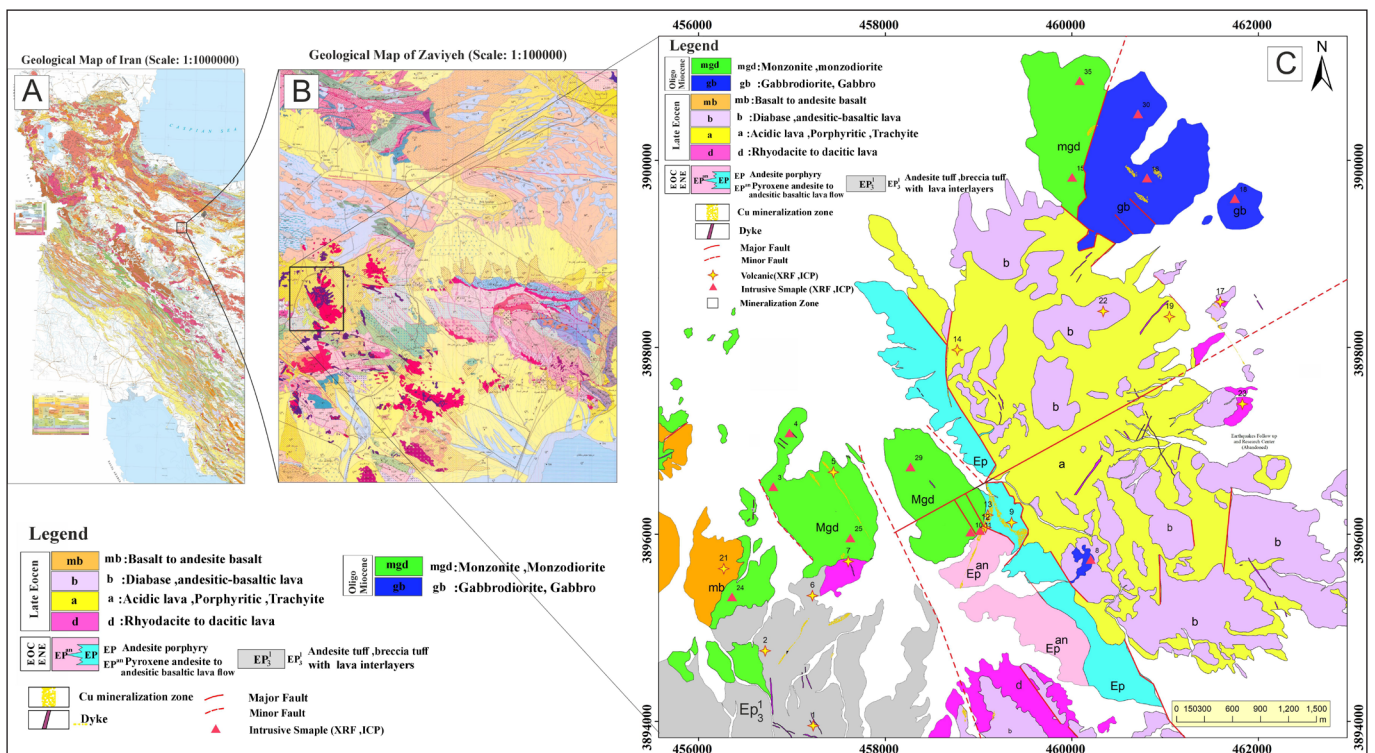
منطقه مطالعاتی جنوب مامونیه به عنوان بخشی از برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ (Amidi et al., 2004) قسمتی از کمان ماگمایی ارومیه-دختر را تشکیل می‌دهد که در این ناحیه به دلیل هجوم توده‌های نفوذی و جابه‌جایی زیاد توسط گسلش برشی-فشارشی واحدهای آتشفشانی ائوسن به طور کامل به هم ریخته‌اند. بیشتر فعالیت‌های ماگمایی در طی ائوسن و الیگوسن رخ داده است (Chiu et al., 2013; Moghadam et al., 2011; Verdel et al., 2015). در گستره برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه ۳ دسته گسل‌های اصلی و فرعی (در مقیاس منطقه‌ای) وجود دارند که به نظر می‌رسد مربوط به ۳ نسل جداگانه می‌باشند. گسل‌ها دارای روند خاوری-باختری هستند که تشکیل آن‌ها احتمالاً مربوط به پیامد فاز چین‌خوردگی پیرنه‌ای می‌باشد و ظاهراً قدیمی‌ترین نسل از گسل‌های این منطقه هستند. دسته‌ای دیگر از گسل‌ها دارای روندهای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری می‌باشند که تشکیل آن‌ها را می‌توان به فاز فشارشی چرخه پایانی آلپی نسبت داد و دسته دیگری که در این محدوده وجود دارند، گسل‌هایی با روند شمالی-جنوبی هستند که دو دسته گسل‌های یاد شده در بالا را جابه‌جا نموده‌اند. زمان تشکیل این گسل‌ها را می‌توان به فاز کششی چرخه پایانی آلپی نسبت داد (Amidi et al., 2004). مهم‌ترین گسل‌های منطقه بیشتر دارای سازوکار امتدادلغز، اریبلغز و به ندرت راندگی می‌باشند و حکایت از وجود نیروهای برشی-فشارشی دارند. روند بیشتر گسل‌ها خاوری-باختری است که روند مجموعه‌های آذرین در این ناحیه را نیز تحت تاثیر پهنه‌های برشی راستگرد قرار داده است (حیدری و همکاران، ۱۴۰۱). روند شمال‌خاور-جنوب‌باختر، و به ندرت شمالی-جنوبی با سازوکار بیشتر امتداد لغز (چپ و راست گرد) (Khodaparast et al., 2020) نسبت به روند قبلی از طول کمتری برخوردارند و معمولاً به گسل‌های اصلی متصل بوده، و در دو طرف آن گسترش یافته‌اند. راندگی را می‌توان آخرین فاز از تکوین عملکرد این گسل‌ها در نظر گرفت که در برخی گسل‌ها همچون گسل ساوه شواهد آن وجود دارد. از این رو، این موارد به رژیم زمین‌ساختی کششی از نوع درون‌کمانی، به واسطه بالاآمدگی همزمان با گسل‌های عادی و خروج ماگما در ائوسن این ناحیه اشاره دارد (Chiu et al., 2013; Nouri et al., 2018). در ائوسن پایانی-الیگوسن تغییر تدریجی رژیم زمین‌ساختی کششی به فشارشی با ایجاد پهنه برشی راست گرد، و فعالیت گسل‌های امتدادلغز، متناسب با فشار حاکم در بخش‌های مختلف همراه است (Morley et al., 2009). تداوم این نیروی فشارشی به تغییر روند ساختاری و جابه‌جایی واحدها به صورت شکل‌پذیر و شکننا انجامیده است که پیامد آن ایجاد روند چیره خاوری-باختری فعلی در مرکز ناحیه ساوه می‌باشد (حیدری و همکاران، ۱۴۰۱). این فرایند به ویژه در مراحل آغازین با ایجاد فضاهای خالی در ژرفای بیشتر موجب جایگیری توده‌های نفوذی نیمه‌ژرف می‌شود. این فاز از مراحل دگرشکلی

اساس، برگشت صفحه فرورانده شده (slab roll-back) تیس جوان در حد فاصله زمانی ۳۸-۴۲ میلیون سال موجب رخنمون ماگماتیسیم قدیمی‌تر در بخش‌های خاوری و ماگماتیسیم جوان‌تر در بخش‌های باختری این پهنه ماگمایی شده است. یافته‌های اخیر، سنگ‌های ملانفلینی-ملیلیتی اولتراکلیسیک اولترابازیک، که در محیط‌های زمین‌ساختی برخوردی بسیار غیرمعمول هستند، پیچیدگی فرایندهای پتروژنتیک در UDMA را تایید می‌کنند (Lustrino et al., 2021). بر اساس برخی مطالعات (Caillat et al., 1978; Ramezani, 2005; Ghasemi and Talbot, 2007; Rezaei-Kakhkhaei et al., 2018; Nouri et al., 2018; Keshavarzi et al., 2014; et al., 2011, 2014) توده‌های نفوذی گرانئوئیدی رخنمون یافته در شمال باختر ساوه دارای ترکیب متغیری از مونزوگابرو تا گرانیت هستند و شامل گروه گرانودیوریت سلجرد، گرانودیوریت نشوه و کوآرتزموژودیوریت خلخاب می‌شوند (Rezaei-Kakhkhaei et al., 2014). بر پایه نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd، متاسوماتیسیم گوشته‌ای نقش مهمی را در پیدایش توده‌های نفوذی شمال باختری ساوه داشته است (Rezaei-Kakhkhaei et al., 2011). بر اساس مطالعات نوری و همکاران (Nouri et al., 2018)، ماگمای مادر و مافیک منطقه ساوه بر اثر ذوب بخشی کم‌ژرفای گوشته سنگ‌کره‌ای متاسوماتیسیم شده در اثر گسترش مرتبط با فشارزدایی در فشار کم به وجود آمده است و بر اساس سن‌سنجی اورانیم-سرب، این مجموعه ماگمایی در ائوسن بالایی متبلور شده است (Nouri et al., 2018). در خصوص برخورد در پهنه ارومیه-دختر نظریات مختلفی ارائه شده است که شامل برخورد نرم (soft collision) در الیگوسن آغازین (Moghadam et al., 2022a; b; McQuarrie and van Hinsbergen, 2013; Allen and Armstrong, 2008) و برخورد سخت (hard collision) در ۲۰ میلیون سال پیش (Moghadam et al., 2022a, b) 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; 2024; Babazadeh et al., 2023). پژوهش اخیر (Goudarzi et al., 2025a) ما نشان‌دهنده یک تکامل زمین‌ساختی-ماگمایی طولانی مدت از ماگمای با ترکیب حدواسط تا مافیک از حدود ۶۰ تا ۳ میلیون سال پیش در مرکز ارومیه دختر در منطقه ساوه است که بر پیچیدگی‌های تکامل زمین‌ساختی-ماگمایی در این منطقه تاکید دارد.

منطقه مطالعاتی در استان مرکزی و در کیلومتر ۸۸ اتوبان تهران-ساوه و در ۵ کیلومتری جنوب شهرک صنعتی مامونیه قرار دارد (شکل ۱) و به سبب قرارگیری در بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر و ناحیه معدنی ساوه که دربرگیرنده اندیس‌های فراوان معدنی و کانه‌سازی مختلف مانند مس، طلا، آهن و ... و آثار معدن‌کاری قدیمی است، مورد توجه کاوشگران و پژوهشگران مختلفی از نظر کانی‌سازی نیز بوده است (فضلی، ۱۳۹۴؛ فضلی و همکاران، ۱۳۹۸؛ یوسفی، ۱۳۹۶، یوسفی و علیپور، ۱۳۹۸؛ دولتشاهی و همکاران، ۱۳۹۸؛ حیدری و همکاران، ۱۴۰۱، حیدری و صفوی، ۱۴۰۲؛ رجب‌پور، ۱۳۹۴؛ گودرزی و همکاران، ۱۴۰۳؛ الف‌ب، پ؛ Zamanian et al., 2021; Rajabpour et al., 2017; Goudarzi et al., 2024b,d). با توجه به این که توده‌های نفوذی بررسی شده در این پژوهش (منطقه جنوب مامونیه) در نقشه‌های پایه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه مشخص نگردیده‌اند (شکل ۱) و همچنین تاکنون به صورت مجزا و ویژه در مورد نحوه تشکیل، تکوین و محیط زمین‌ساختی-ماگمایی آن‌ها مطالعات دقیقی صورت نگرفته است و کمتر مورد توجه بوده‌اند، از این رو، با توجه به اهمیت موضوع و لزوم کسب بینش واقع بینانه‌تری در مورد ماهیت، محیط زمین‌شناختی و تکامل زمین‌ساختی این توده‌های نفوذی مشخص شدن ارتباط آن‌ها با سایر توده‌های منطقه، این پژوهش انجام گرفته است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، ژئوشیمی، پتروژن و خاستگاه توده‌های نفوذی در منطقه جنوب مامونیه است که بر اساس نقشه ۱:۲۰۰۰۰ تهیه شده از منطقه به ۲ گروه کلی بروزند یافته تقسیم می‌شوند (شکل ۱).

آتشفشانی با ترکیب اسیدی تا بازیگ نفوذ کرده‌اند. بر اساس نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰ زاویه (Amidi et al., 2004) واحدهای سنگی آتشفشانی و آذرآواری سنی معادل ائوسن داشته و واحدهای نفوذی بر اساس مطالعات نوری و همکاران (Nouri et al., 2018) بر اساس سن سنجی اورانیم-سرب توده‌های نفوذی منطقه ساوه در الیگومیوسن در منطقه نفوذ کرده‌اند (Nouri et al., 2018).

و ایجاد فضاهای کشتی در پهنه‌های برشی به قدری آشکار است که در بیشتر مطالعات جدید با عنوان فازهای کشتی پس از برخورد معرفی می‌شوند (Richards and Sholeh, 2016). سنگ‌های نفوذی رخنمون یافته در محدوده ۱:۲۰,۰۰۰ مطالعاتی جنوب مامونیه (شکل ۱) شامل مجموعه‌ای با ترکیب دیوریت، گابرو، میکرودیوریت، مونزونیت و کوارتز مونزونیت هستند که درون تناوبی از سنگ‌های



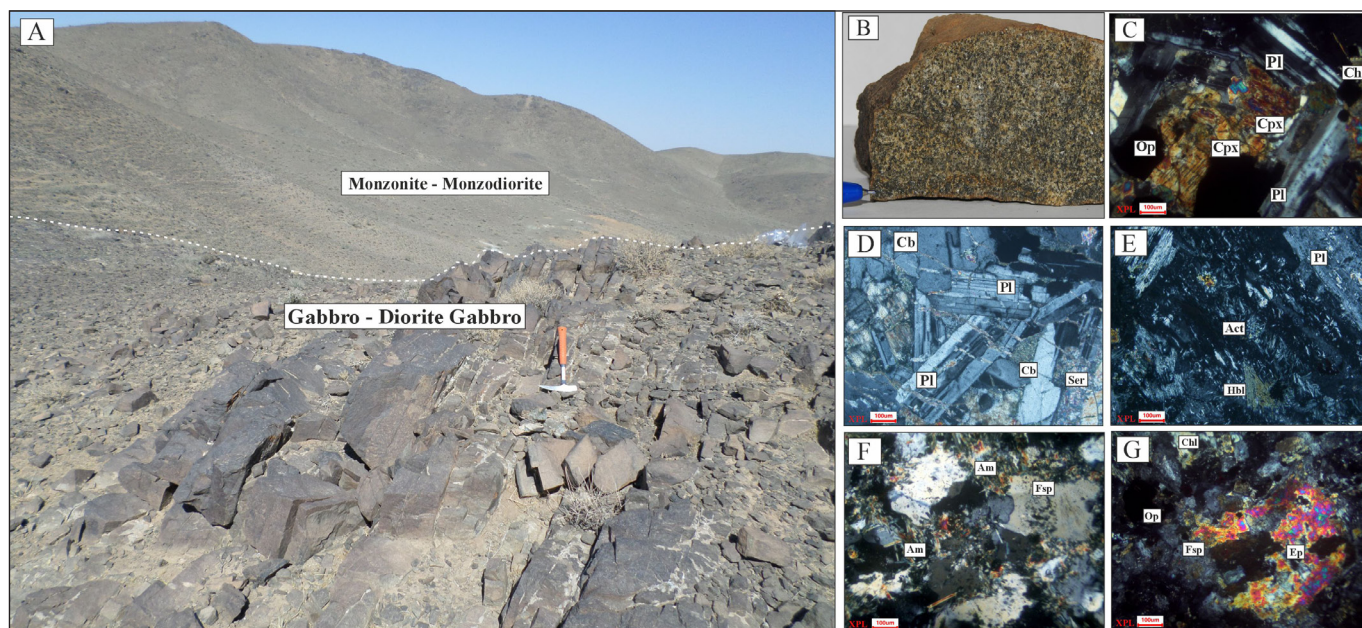
شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی در (A) نقشه ساده زمین‌شناسی ناحیه‌ای ایران و کمر بند ماگمایی ارومیه دختر بر گرفته از آفانباتی (Aghanabati, 1998)، نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰ زاویه (Amidi et al., 2004)، نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰,۰۰۰ تهیه شده از منطقه مطالعاتی حین عملیات صحرایی (C).

Figure 1. The location of study area in A) the simple regional geological map of Iran and UDMA (Aghanabati, 1998), B) 1:100,000 geological map of Zaviyeh (Amidi et al., 2004) and C) 1:20,000 geological map of the study

شده است (شکل ۲- E). پلاژیوکلاز با اندازه‌های فنوکریست تا میکروکریست و میکرولیت به مقادیر متوسط تا زیاد دگرسان و آرزلیکی و سریستی شده‌اند و گاه بافت آنتی راپاکیوی نشان می‌دهند (شکل ۲- E). شدت دگرسانی در بعضی بلورها زیاد است و فقط جزئی از کانی اولیه به جا مانده است. حاشیه بعضی بلورها واکنشی و غیرتعادلی است و در فضای حاصل از خوردگی بلورها اپیدوت یا کلریت جایگزین شده است (شکل‌های ۲- D, G). بلورهای شکل دار و نیمه شکل دار پیروکسن با برش‌های عرضی هشت ضلعی با اندازه میکروفونوکریستال تا میکروکریستال به مقدار متوسط تا شدید دگرسان و کلریتی شده‌اند (شکل ۲- C). بلورهای آمفیبول شعاعی در برخی نمونه‌ها به میزان زیاد دیده می‌شوند (شکل ۲- F). کانی‌های فرومیزین بیشتر به صورت میکروفونوکریست تا میکروکریست اپاستی شده و کلریتی شده مشاهده می‌شوند. بیشتر کانی‌های فرعی با مقادیر کمتر شامل آپاتیت و زیرکن و کانی‌های ثانویه و دگرسانی شامل اپیدوت، کانی رسی، کربنات، اکسید و هیدروکسید آهن و کلریت هستند.

۳-۱-۱- سنگ‌نگاری واحد گابرو-گابرو دیوریت

رخنمون عمده این واحد در بخش شمال خاوری گستره نقشه ۱:۲۰,۰۰۰ منطقه مطالعاتی با نمود صحرایی تیره و ریخت‌شناسی نیمه‌صخره‌ای مشاهده می‌شود (شکل ۲- A). رنگ این واحد در سطح هوازده خاکستری تیره بوده و در سطح تازه شکسته سبز مایل به خاکستری و ترکیب آن شامل گابرو، گابرو دیوریت و دیوریت گابرو می‌باشد (شکل ۲- B). در مطالعات میکروسکوپی نمونه‌ها، بافت‌های گرانولار، هتروگرانولار، هیپ ایدیومورفیک، آنتی راپاکیوی و گرانولار مشاهده می‌گردند. بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن در اندازه‌های متفاوت اجزای اصلی تشکیل دهنده سنگ می‌باشند (شکل‌های ۲- C, D) و بیشتر نیمه‌شکل دار تا شکل دار هستند و گاه حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد سنگ را درشت‌بلورها به خود اختصاص داده‌اند. برخی از بلورها ماکل دو تایی دارند و گاه به میزان متوسط تا زیاد اورالیتی شده‌اند و گاه توسط آمفیبول جانشین شده‌اند. فنوکریست تا میکروکریستال‌های هورنبلند به مقدار کم تا متوسط دگرسان و کلریتی شده‌اند و در مواردی سبب ایجاد اکتینولیت در نمونه‌ها



شکل ۲- A) نمای کلی از رخنمون‌های توده‌های نفوذی محدوده (دید به سمت جنوب باختر). B) نمونه دستی از واحد گابرو-گابرودیوریت، C) درشت‌بلور کلینوپروکسن و پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سنتیتیک به همراه کانی‌های فرومیزین کلریتی شده. D) سریستی شدن بلورهای پلاژیوکلاز در امتداد ماکل‌های پلی‌سنتیتیک و پرشدگی شکستگی‌ها با کربنات در نمونه گابرودیوریت. E) ریزبلورهای هورنبلند دگرسان شده که سبب ایجاد اکتینولیت‌های ریز و سوزنی شده است و پلاژیوکلازهای با بافت آنتی‌آپاکوی. F) ریزبلور سوزنی و شعاعی آمفیبول همراه با فلدسپات و کوارتز میکروکریستالین. G) ریزبلورهای آلکالی فلدسپات آرژیلیکی شده و بلورهای پلاژیوکلاز با دگرسانی اپیدوتی. Pl: پلاژیوکلاز، Ep: اپیدوت، Cb: کربنات، Ser: سریست، Cpx: کلینوپروکسن، Fsp: فلدسپات، Chl: کلریت، Op: کانی‌های کدر (اپک)، Act: اکتینولیت، Hbl: هورنبلند. علائم اختصاری برگرفته از کرتز (Kretz, 1983).

Figure 2- A) A general view of the plutonic outcrops (view to the southwest). B) A close view of gabbro unit. C) Coarse crystal of clinopyroxene and plagioclase with polysynthetic twinning and chloritized ferromagnesian minerals. D) Sericitization of plagioclase crystals along polysynthetic twinning and fracture filling with carbonate in gabbrodiorite. E) Altered hornblende microcrystals that caused the creation of fine and needle shaped actinolites and plagioclase with anti-apakivi texture. F) Tabular and radial amphibole microcrystal with microcrystalline quartz. G) Argillized alkali feldspar microcrystals and plagioclase crystals with epidote alteration. Mineral abbreviations (Kretz, 1983): Pl: plagioclase, Ep: epidote, Am: amphibole, Cb: carbonate, Ser: sericite, Cpx: clinopyroxene, Fsp: feldspar, Chl: chlorite, Op: opa minerals, Act: actinolite.

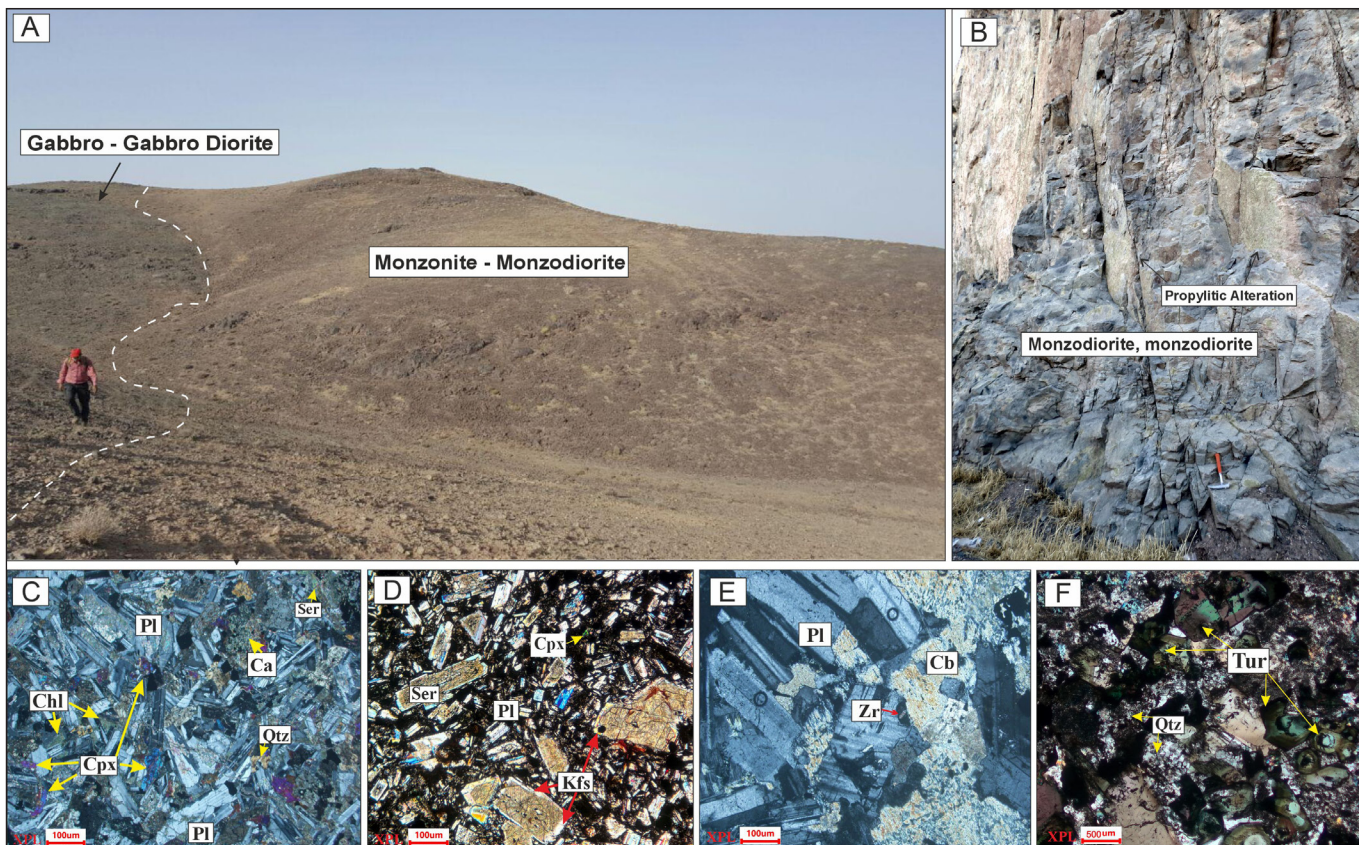
اختصاص می‌دهند (شکل ۳- C). میکروفونوکریستال تا میکروکریستال‌های منشوری آمفیبول موجود در نمونه‌ها به مقدار متوسط تا کم دگرسانی کلریتی نشان می‌دهند. نفوذ سیال با دمای نسبتاً بالا حاوی عنصر بور سبب تشکیل تورمالین در برخی نمونه‌ها شده که بلورهای تورمالین گاه به مقدار زیاد مشاهده می‌شوند (شکل ۳- F).

۳-۲- ژئوشیمی سنگ کل و سری ماگمایی

جهت بررسی رفتار ژئوشیمیایی توده‌های نفوذی در منطقه مطالعاتی، پس از بررسی‌های زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری، تعداد ۱۳ نمونه از سنگ‌های کمتر دگرسان شده از رخنمون‌های سطحی و مغزه‌های حفاری جهت انجام آنالیز شیمیایی انتخاب گردید که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. با استفاده از این داده‌ها و ترسیم نمودارهای مربوطه بر اساس الگوی رفتاری اکسیدهای اصلی، عناصر کمیاب و عناصر نادرخاکی به بررسی فرایندهای اولیه و نقش فرایندهای پس از تولید ماگما مانند تبلور بخشی و آلودگی با پوسته قاره‌ای پرداخته شد. در نمونه‌های مورد بررسی، مقادیر SiO₂ از ۵۱/۱ تا ۶۰/۱ درصد و مقدار Al₂O₃ از ۱۴/۲ تا ۱۷/۷ درصدوزنی متغیر است. مجموع عناصر آلکالی در نمونه‌ها از ۴/۷ تا ۶/۶۷ درصد وزنی تغییر می‌کند. مقدار LOI نمونه‌ها نیز از ۱ تا ۳/۴ درصد وزنی اندازه‌گیری شده است.

۳-۱-۲- سنگ‌نگاری واحد مونزونیت، مونزودیوریت

رخنمون‌های این واحد سنگی در مرکز و باختر و همچنین شمال خاوری محدوده مطالعاتی قرار گرفته و نمود صحرایی آن تیره بوده و دارای ریخت‌شناسی صخره‌ای است که بخشی از ارتفاعات اصلی منطقه را شامل می‌شود. رنگ نمونه دستی این واحد سنگی خاکستری تیره با بافت ریزدانه می‌باشد و طیف ترکیبی آن شامل کوارتز، مونزونیت، مونزودیوریت است. در مطالعات میکروسکوپی، بافت‌های اصلی شامل گرانولار و پورفیروید هستند. بیشتر کانی‌های اصلی مشاهده شده شامل پلاژیوکلاز، فلدسپات پتاسیم، کلینوپروکسن، هورنبلند، کوارتز و آمفیبول و کانی‌های فرعی شامل آپاتیت و زیرکن به مقدار کم، کانی‌های رسی، کلریت، اپیدوت، بیوتیت، کربنات، اکسیدهای آهن و کانی‌های کدر هستند. پلاژیوکلازهای شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار تخته‌ای فراوان‌ترین جزء تشکیل‌دهنده سنگ به‌شمار می‌روند و در برخی موارد خوردگی نشان می‌دهند و توسط مواد ثانویه مثل کلریت پر شده‌اند (شکل ۳- C). فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در مواردی کربناتی و اغلب به مقدار زیاد سریستی شده و گاه به سبب شدت دگرسانی زیاد، بقایای کمی از بلورها به جا مانده است و در مواردی حجم زیادی از میکروکریستال‌های زمینه را به خود اختصاص داده‌اند (شکل‌های ۳- D, E). بلورهای نیمه‌شکل‌دار و بی‌شکل کلینوپروکسن در مواردی به مقدار زیاد حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد نمونه را به خود



شکل ۳- A) نمای کلی از رخنمون واحد مونزونیتی- مونزودیوریتی (دید به سمت شمال‌خاور). B) نمای نزدیکی از واحد مونزونیتی. C) درشت بلورهای پلاژیوکلاز به همراه بلورهای کوچکی از کلینوپیروکسن در بین آن‌ها که بعضی از کانی‌ها توسط کربنات و کلریت جایگزین شده‌اند. D) میکروولیت‌ها و میکرو کریستال‌های پلاژیوکلاز و پلاژیوکلاز سریسیت شده که با پاتاسیم فلدسپات بی‌شکل در حاشیه‌ها جایگزین شده‌اند، E) بافت افیتی و دگرسانی کربناتی با ادخال‌هایی از کانی زیرکن در نمونه مونزونیتی، F) تورمالینی شدن در واحد کوارتز مونزونیت تحت تاثیر سیالات حاوی بور. علائم اختصاری کانی‌ها: Pl: پلاژیوکلاز، Ep: اپیدوت، Cb: کربنات، Ser: سریسیت، Hb: هورنبلند، Zr: زیرکن، Op: کانی‌های کدر (اپک). علائم اختصاری برگرفته از کرتز (Kretz, 1983).

Figure 3- A) A general view of monzonite-monzodiorite rock units (view to the northwest). B) A close view of monzonite. C) Coarse plagioclase crystals with inclusions of small clinopyroxene crystals where some minerals have been replaced by carbonate and chlorite (in XPL). D) Fine-grained groundmass containing plagioclase microlites and microcrystals and sericitized plagioclase that replace by K-feldspar in the rim with hypocrystalline texture (in XPL). E) Aphitic texture and carbonate alteration with zircon inclusions in monzodiorite (in XPL). F) Tourmalinization in quartz monzonite under the influence of boron containing fluids. Mineral abbreviations; (Kretz, 1983): Pl: plagioclase, Cpx: clinopyroxene, Ca: calcite, Cb: carbonate, Qtz: quartz, Tur: tourmaline, Ser: sericite, Zr: zircon, Op: opaque minerals.

جدول ۱- نتایج آنالیز زمین‌شیمیایی سنگ کل سنگ‌های نفوذی جنوب مامونیه (عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی، عناصر فرعی و نادرخاکی بر حسب گرم در تن).

Table 1. The results of Whole rock geochemical composition of the plutonic rocks from south of Mamouniyeh (major elements in wt. %, trace and rare earth elements in ppm).

Sample No	MN G-3	MN G-4	MN G-8	MN G-10	MN G-11	MN G-15	MN G-16	MN G-18	MN G-24	MN G-25	MN G-29	MN G-30	MN G-35
SiO ₂	56.5	58.3	53.1	52.2	60.1	56.4	52.7	53.9	56.2	56.9	58.6	51.1	58.3
Al ₂ O ₃	16.4	15.3	16.4	17.5	14.2	14.8	17.1	15.1	16.1	14.9	15.1	17.7	14.3
CaO	5.38	3.61	7.6	6.3	5.2	6.83	6.81	6.97	6.11	4.64	4.3	7.7	5.1
Fe ₂ O ₃	9.9	9.5	9.8	10.1	9.2	10.2	10.4	10.2	9.1	10.4	8.3	10.7	9.1
K ₂ O	0.67	0.8	0.46	0.5	0.67	0.74	0.69	0.5	0.6	0.65	0.3	0.6	0.8
MgO	2.63	3.1	2.63	3.2	2.95	3.28	3.8	3.1	3.1	2.6	3.1	3.3	3
MnO	0.18	0.21	0.24	0.19	0.26	0.21	0.3	0.27	0.1	0.16	0.23	0.34	0.3
Na ₂ O	5.17	5.87	5.64	5.1	4.88	4.94	5.1	4.88	6.18	6.32	5.43	4.1	5.87

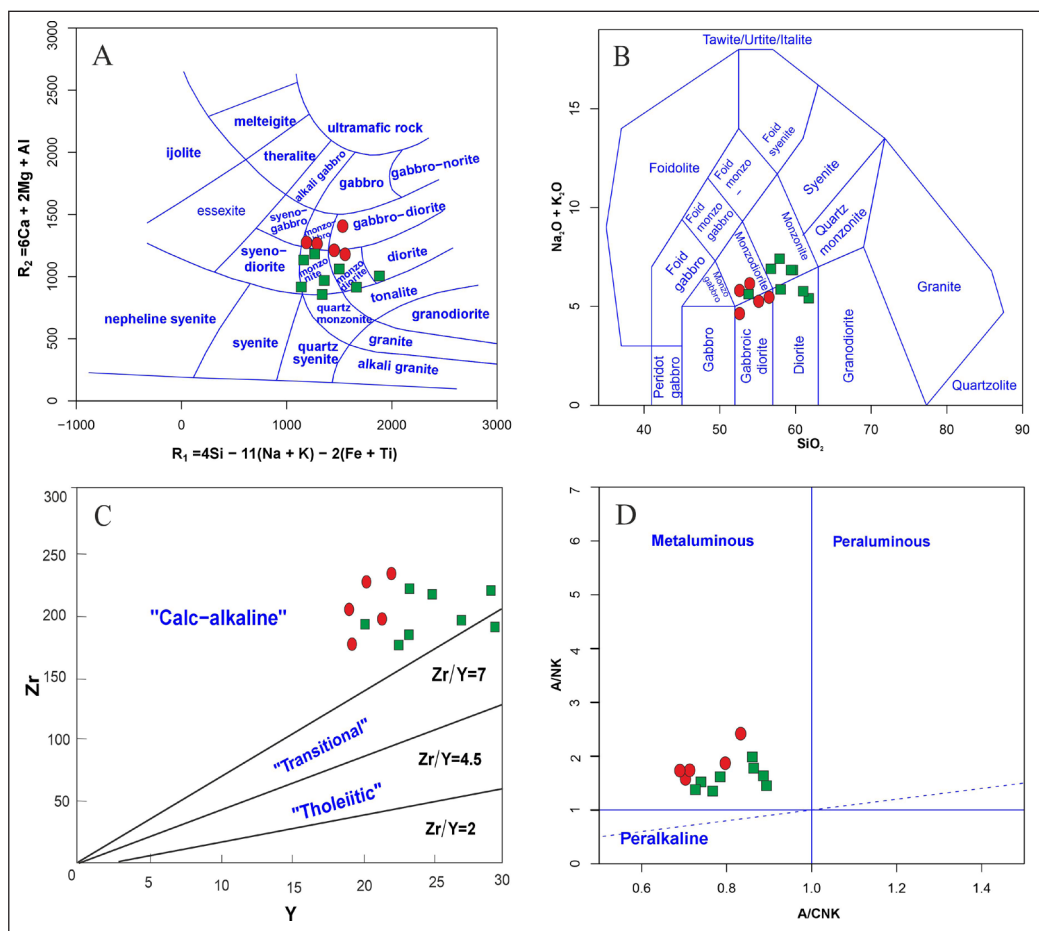
ادامه جدول ۱- نتایج آنالیز زمین‌شیمیایی سنگ کل سنگ‌های نفوذی جنوب مامونیه (عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی، عناصر فرعی و نادرخاکی بر حسب گرم در تن).

Continued from Table 1. The results of Whole rock geochemical composition of the plutonic rocks from south of Mamouniyeh (major elements in wt. %, trace and rare earth elements in ppm).

Sample No	MN G-3	MN G-4	MN G-8	MN G-10	MN G-11	MN G-15	MN G-16	MN G-18	MN G-24	MN G-25	MN G-29	MN G-30	MN G-35
P ₂ O ₅	0.19	0.18	0.24	0.77	0.3	0.45	0.3	0.6	0.3	0.2	0.5	0.3	0.36
TiO ₂	0.59	0.91	0.74	1.1	0.8	0.94	0.95	0.9	0.94	0.89	0.96	1.2	0.9
LOI	2.14	1.96	2.57	2.44	1	1.1	1.7	3.4	1.23	1.98	2.63	2.53	1.7
Total	99.8	99.7	99.4	99.4	99.6	99.9	99.9	99.7	100	99.6	99.5	99.6	99.7
As	15.7	10.1	7.1	11.7	9.1	11.8	4.2	11.4	13.2	13.5	10.4	6.1	11.7
Ba	482	364	412	382	285	311	324	475	321	394	436	483	384
Be	1.2	1.3	1.1	1.7	1.3	1.3	0.9	1.3	1.2	1	1.4	1.1	1.2
Ce	27.9	29.3	28.3	38.4	39.5	41.2	31.5	43.4	22.5	27.3	40	26.8	38.1
Co	12.7	9.2	24.3	16.9	16.5	12.8	25.4	24.1	15.2	13.5	16.3	20.3	14.7
Cr	39	25	19	58	29	14	34	18	42.0	39.0	45.0	36.0	26.0
Cs	1.03	0.7	1.2	1.4	1.4	1.3	1.4	1.7	1	1.2	1.3	1.4	1.1
Dy	6.1	5.6	6.5	4.9	5.8	4.8	4.4	6.6	6.1	5.8	5.5	5.1	6.1
Er	3.2	2.7	2.7	3.2	2.4	3.1	2.9	3.2	2.6	2.7	2.9	2.5	3.1
Eu	0.84	0.92	0.91	1.23	1.03	1.14	0.98	1.12	1.26	1.06	1.13	1.4	1.04
Gd	4.8	5.1	4.3	4.5	4.44	5.1	3.9	4.4	5.2	4.1	4.9	5	5.3
Hf	2.4	2.2	3.1	2.5	2.8	3.1	3.5	5.1	3.8	4.6	2.4	3.4	4.1
La	14	17	13	27	18	26	13	19	15	18	24	14	18
Lu	0.41	0.47	0.36	0.39	0.41	0.43	0.37	0.45	0.41	0.31	0.3	0.4	0.39
Nb	13.2	10.2	14.1	13.2	10.1	11.8	10.6	17.3	11.8	9.2	11.6	17.2	13.5
Nd	14.2	14.9	13.8	21.4	17.2	22.3	13.5	19.8	16.2	17.3	20.6	19.8	21.1
Ni	11	3	3.1	2	7	10	13	11	8	6	7	9	12
P	621	713	654	1297	856	1209	697	1163	793	811	1032	752	1120
Pb	15.3	8.8	16.4	12.8	16.3	10.2	8.6	11.6	13.5	12.3	16.2	9.8	6.6
Pr	3.59	3.25	2.86	6.1	4.9	6.72	4.22	4.89	3.1	3.4	5.9	5	4.2
Rb	17.9	15.3	13.5	23.4	26.8	12.4	13.7	17.8	19.6	18.3	24.8	10.5	9.4
S	123	45	64	745	128	73	63	56	183	189	310	62	53
Sc	19.4	10.1	29.4	30.1	18.5	28.8	29.3	31.3	26.1	21.9	22.7	26.4	23.8
Sm	3.7	3.3	3.2	4.8	5.1	5.1	4.7	4.3	3.4	3.1	4.6	3.3	4.9
Sn	0.7	0.8	1.1	0.9	1.3	1.1	0.9	0.8	0.9	1.2	0.8	1.2	1.2
Sr	196	157	210	216	142	194	223	179	212	170	154	206	184
Ta	1.01	0.8	0.8	0.82	0.55	0.64	0.65	1.03	0.71	0.86	0.94	1	0.8
Tb	1.1	0.9	1	0.9	0.67	0.9	0.8	0.9	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7
Th	8.1	9.4	10.3	9.6	10.1	8.8	9	8.6	9.2	9.5	10.4	8.1	9.2
Tm	0.38	0.36	0.47	0.41	0.51	0.39	0.41	0.48	0.44	0.39	0.38	0.34	0.41
U	1.7	1.5	1.4	1.8	1.9	1.8	2	1.9	1.6	1.7	1.6	2.2	1.9
V	143	79	198	173	136	311	289	293	158	172	186	273	231
Y	20.3	22.7	19.2	29.2	27.1	20.4	19.4	21.7	23.4	25.1	23.4	22.1	29.7
Yb	3.1	2.74	2.13	2.72	2.85	3.32	2.87	2.81	2.6	2.16	2.72	1.95	3.1
Zn	21.1	10.9	68.9	69	84.6	73	74	64.2	41.1	49.2	56.4	65.2	75.4
Zr	192	174	203	217	194	227	174	196	182	215	219	232	187

برای نام‌گذاری سنگ‌های نفوذی منطقه جنوب مامونیه به جهت کاهش تاثیر دگرسانی از نمودار کاتیونی دولارش و همکاران (De la Roche et al., 1980) استفاده شد و بر این اساس، ترکیب شیمیایی سنگ‌های درونی منطقه در محدوده گابرو، گابرو دیوریت، دیوریت، مونزونیت، مونزودیوریت، کوآرتز مونزونیت قرار می‌گیرند (شکل ۴- A). همچنین بر اساس نمودار SiO_2 در برابر Na_2O+K_2O (Middlemost, 1994)، ترکیب سنگ‌های نفوذی منطقه در محدوده دیوریت، گابرو دیوریت، مونزونیت و مونزودیوریت قرار می‌گیرد (شکل ۴- B). سری ماگمایی و ماهیت سنگ‌های نفوذی بر اساس نمودار Zr در برابر Y (Finger et al., 1997; Sylvester, 1998) هستند.

برای نام‌گذاری سنگ‌های نفوذی منطقه جنوب مامونیه به جهت کاهش تاثیر دگرسانی از نمودار کاتیونی دولارش و همکاران (De la Roche et al., 1980) استفاده شد و بر این اساس، ترکیب شیمیایی سنگ‌های درونی منطقه در محدوده گابرو، گابرو دیوریت، دیوریت، مونزونیت، مونزودیوریت، کوآرتز مونزونیت قرار می‌گیرند (شکل ۴- A). همچنین بر اساس نمودار SiO_2 در برابر Na_2O+K_2O (Middlemost, 1994)، ترکیب سنگ‌های نفوذی منطقه در محدوده دیوریت، گابرو دیوریت، مونزونیت و مونزودیوریت قرار می‌گیرد (شکل ۴- B). سری ماگمایی و ماهیت سنگ‌های نفوذی بر اساس نمودار Zr در برابر Y (Finger et al., 1997; Sylvester, 1998) هستند.



شکل ۴- رده‌بندی شیمیایی و تعیین ماهیت سنگ‌های نفوذی جنوب مامونیه. A) نمودار کاتیون‌های دولارش و همکاران (De la Roche et al., 1980)؛ B) نمودار SiO_2 در برابر Na_2O+K_2O (Middlemost, 1994)؛ C) نمودار Zr/Y در برابر Th/Yb (Ross and Bedard, 2009)؛ D) نمودار A/CNK (نسبت مولی $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$) در برابر A/NK (نسبت مولی $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$) (Middlemost, 1994)؛ E) نمودار Zr/Y در برابر Y (Ross and Bedard, 2009).

Figure 4. Chemical classification and determining the nature for intrusive rocks in south of Mamuniyeh. A) Geochemical classification of studied rocks in the multi cationic R1-R2 diagram (De La Roche et al., 1980); B) SiO_2 vs. Na_2O+K_2O (Middlemost, 1994); C) Zr vs. Y plot (after Ross and Bedard, 2009); D) Plot of A/NK [molar ratio $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$] vs. A/CNK [molar ratio $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$] for studied rocks (from Shand, 1943).

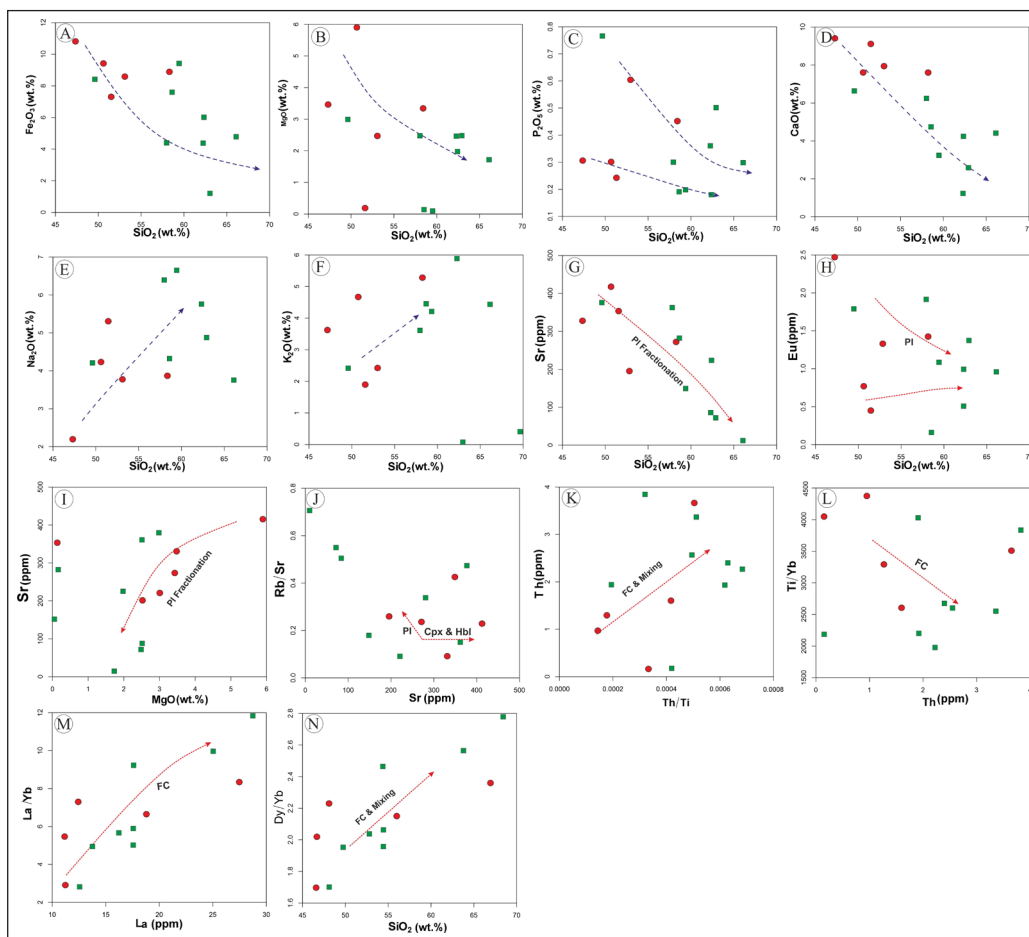
ماگمایی و یا آرایش هستند، اما پراکنندگی‌ها می‌توانند در اثر تحولانی از نوع آرایش ماگما با پوسته بالایی، دگرسانی و یا تمرکزهای بلوری ایجاد شوند (Wilson, 2007). در نمونه‌های مورد مطالعه مقدار SiO_2 از ۵۱/۱ تا ۶۰/۱ متغیر است. طبق نمودارهای هارکر که نسبت به عناصر اصلی ترسیم شده‌اند (شکل ۵)، Al_2O_3 ، CaO ، Fe_2O_3 ، TiO_2 ، MgO و تا حدودی P_2O_5 روند نزولی نسبت به افزایش مقدار

جهت پی‌بردن به ماهیت برخی فرایندهای موثر در تحول ماگما از جمله تبلور تفریقی، می‌توان از نمودارهای دوتایی تغییرات اکسید-اکسید-عناصر و یا عنصر-عناصر هارکر (Harker, 1909) استفاده کرد. به‌طور کلی روندهایی که دارای ارتباط خطی مثبت یا منفی هستند تحت کنترل تبلور بخشی، اختلاط

۳-۳- بررسی تغییرات عناصر

متبلور می‌شوند، ولی تفریق پیدا نمی‌کنند و از این رو، این عناصر روند افزایشی نشان می‌دهند، افزون‌ه بر این، می‌تواند ناشی از فراوانی پتاسیم حین دگرسانی سنگ‌های منطقه باشد. پراکندگی K_2O نیز می‌تواند در ارتباط با دگرسانی پتاسیک در مراحل بعدی (سریشی و کائولینیتی شدن) باشد. در شناسایی نقش تحولات ماگمایی مانند ذوب بخشی، جدایش بلورین و تفریق از نمودارهای دیگری نیز استفاده می‌شود. در نمودار SiO_2 در برابر Sr (شکل ۵-۵)، استرانسیم تغییراتی هم‌روند با جدایش ماگمایی کم فشار دارد. Sr برخلاف کلینوپیروکسن در پلاژیوکلاز سازگار است، به همین دلیل با جدایش پلاژیوکلاز، مقدار استرانسیم هم‌زمان با افزایش مقادیر SiO_2 در سنگ‌های منطقه مطالعاتی کاهش نشان می‌دهد (Wilson, 2007) (شکل ۵-۵). همچنین مقدار Sr با افزایش مقادیر MgO روند کاهشی نشان می‌دهد که بیانگر جدایش پلاژیوکلاز است (شکل ۵-۱). مقادیر Eu با افزایش SiO_2 ابتدا به‌صورت افزایشی و سپس کاهشی می‌شود که نشان می‌دهد جدایش پلاژیوکلاز نقش مهمی در پیدایش ماگما دارد (شکل ۵-۸). همچنین ارتباط مثبت بین افزایش استرانسیم و Eu گویای جدایش چشمگیر پلاژیوکلاز است.

SiO_2 نشان می‌دهند (شکل ۵). مقادیر Na_2O و K_2O نیز سیر افزایشی نشان می‌دهند. در مجموعه‌های کالک آلکالن با افزایش مقدار SiO_2 ، مقادیر MgO ، Fe_2O_3 ، CaO ، TiO_2 ، MgO و CaO کاهشی و مقادیر Na_2O و تا حدودی K_2O افزایش می‌یابند (Feely et al., 2002). روند کاهشی MgO ، Fe_2O_3 و P_2O_5 می‌تواند بیانگر تبلور کانی‌های فرومیزی و تاثیر تفریق بلوری باشد. روند کاهشی در مقدار CaO می‌تواند ناشی از تبلور پلاژیوکلازها و یا تغییر پلاژیوکلازها از آنورتیت به آلبیت باشد. این روند، نشان‌دهنده تبلور پلاژیوکلازهای کلسیک طی تفریق ماگمایی است. این عنصر همچنین در ساختار کلینوپیروکسن و آمفیبول نیز می‌تواند وارد شود و مصرف آن در مراحل اولیه تبلور توسط این کانی‌ها، این روند را توجیه می‌کند همانطور که در مقاطع میکروسکوپی مربوط به واحد گابرو مقادیر کمتری از کانی‌های میزبان کلسیم نسبت به نمونه‌های مربوط به مونزودیوریت دیده می‌شود و میزان CaO از گابرو به سمت مونزودیوریت کاهش می‌یابد (شکل ۵-۵). روند افزایشی Na_2O و K_2O که جزو عناصر ناسازگار هستند، بیانگر عدم تفریق کانی‌های فلدسپات است. کانی‌های فلدسپات به دلیل وزن مخصوص کمتر از ماگمای حدواسط، با آن که از ماگما



شکل ۵- نمودارهای دوتایی برای تفسیر پتروژنتیکی سنگ‌های نفوذی منطقه. A) SiO_2 در برابر Fe_2O_3 ; B) SiO_2 در برابر MgO ; C) SiO_2 در برابر P_2O_5 ; D) SiO_2 در برابر CaO ; E) SiO_2 در برابر Na_2O ; F) SiO_2 در برابر K_2O ; G) SiO_2 در برابر Sr ; H) SiO_2 در برابر Eu ; I) MgO در برابر Sr ; J) Sr در برابر Rb/Sr ; K) Th در برابر Th/Ti ; L) Th در برابر Ti/Yb ; M) La در برابر La/Yb ; N) SiO_2 در برابر Dy/Yb . روندهای تفریق و جدایش عناصر بر اساس دیویدسون و همکاران (Davidson et al., 2007)، ویلسون (Wilson, 2007)، استپانوف و همکاران (Stepanov et al., 2014) و کلیم و همکاران (Klimm et al., 2008). مقدار همه اکسیدها برحسب درصد وزنی (wt) و عناصر فرعی بر حسب گرم در تن (ppm) است.

Figure 5. Diagrams for petrogenetic interpretation of Mamuniyeh intrusive rocks. A) SiO_2 vs Fe_2O_3 ; B) SiO_2 vs MgO ; C) SiO_2 vs P_2O_5 ; D) SiO_2 vs CaO ; E) SiO_2 vs Na_2O ; F) SiO_2 vs K_2O ; G) SiO_2 vs Sr ; H) SiO_2 vs Eu ; I) MgO vs Sr ; J) Sr vs Rb/Sr ; K) Th vs Th/Ti ; L) Th vs Ti/Yb ; M) La vs La/Yb ; N) SiO_2 vs Dy/Yb . Fractionation trends are from Davidson et al. (2007), Wilson (2007), Klimm et al. (2008) and Stepanov et al. (2014).

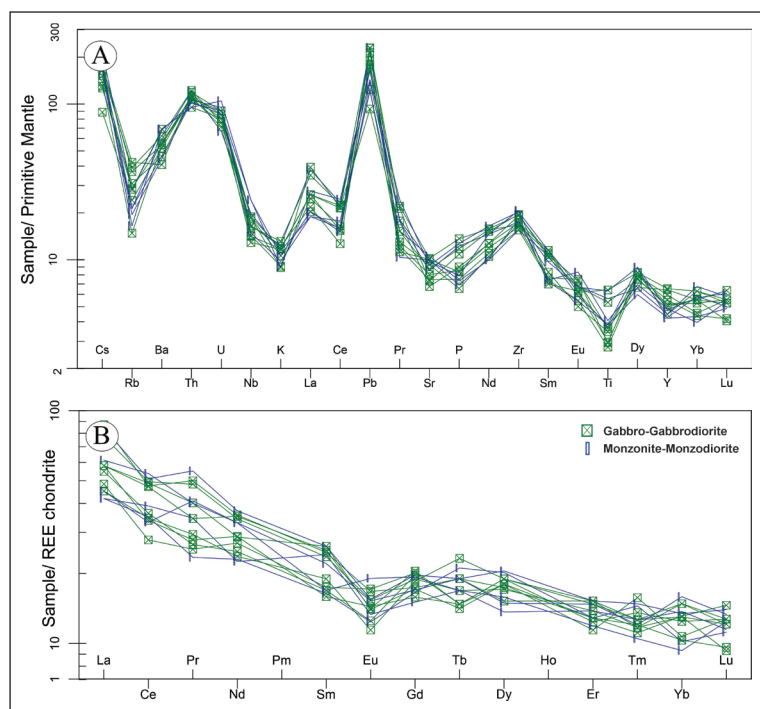
فوکاسیته اکسیژن بوده است (Rollinson, 1993; Wade et al., 2005). تهی‌شدگی از عناصر با میدان پایداری بالا از ویژگی‌های شاخص ماگماهای مناطق فرورانش است (Geng et al., 2009) و می‌تواند نشان‌دهنده مشارکت پوسته در فرایندهای ماگمایی (Leeman and Sisson, 1996; Kuster and Harms, 1998; Dostal et al., 2001;) باشد همانگونه که بی‌هنجاری به‌شدت مثبت Pb در نمودار عنکبوتی منطقه جنوب مامونیه حاصل آرایش ماگمای سازنده این سنگ‌ها با مواد پوسته‌ای و یا متاسوماتیسم گوشته‌ای است (Kamber et al., 2002; Srivastava and Singh, 2004). تهی‌شدگی از عناصر Ta, P, Ti و Nb نشانه‌هایی از ماگماتیسم فرورانش است که در سنگ‌های پهنه ماگمایی ارومیه- دختر دیده می‌شود (Shafiei et al., 2009). بی‌هنجاری منفی Ti نشان‌دهنده نقش سیال‌های آزادشده از صفحه فرورونده است که نقشی مهم در غنی‌سازی عناصر کمیاب سبک و عناصر سنگ‌دوست بزرگ‌یون در گوه گوشته‌ای دارند (Kuster and Harms, 1998; Ulmer, 2001).

برخی از پژوهشگران، سیالات غنی از کلر را عامل تهی‌شدگی ماگماهای کمان‌ها از عناصر با شدت میدان بالا و غنی‌شدگی آن‌ها از عناصر سنگ‌دوست بزرگ‌یون (LILE) می‌دانند (Pearce and Peate, 1995; Keppler, 1996). حلالیت بالای LILE در این سیالات و شستشو و حمل و نقل آن‌ها از سنگ کره اقیانوسی فرورونده به داخل گوه گوشته‌ای محل منشا ماگما و همچنین، نامحلول و نامتحرک بودن عناصر HFS در این رخداد، نقش مهمی در توزیع این عناصر در سنگ‌های ماگمایی مناطق کمانی دارند. سیالات غنی از کلر عامل اصلی تهی‌شدگی ماگماهای کمان‌ها از عناصر با شدت میدان بالا و غنی‌شدگی آن‌ها از عناصر سنگ‌دوست بزرگ‌یون هستند. می‌توان گفت غلظت عناصر LILE ممکن است تابعی از رفتار فاز سیال باشد (Green, 2006)، در حالی که غلظت عناصر HFSE توسط شیمی منشا و فرایندهای بلور-مذاب که در هنگام تکوین سنگ رخ می‌دهد، کنترل می‌شود (Rollinson, 1993). بی‌هنجاری منفی فسفر در نمونه‌ها نیز می‌تواند در نتیجه جدا شدن آپاتیت از ماگما باشد (Wu et al., 2003). به باور برخی پژوهشگران (MacDonald et al., 2000; Fitton et al., 1988) مقدار بالاتر از ۲۸ در نسبت Ba/Nb و مقادیر بالاتر از ۴۵۰ در نسبت Ba/Ta بیانگر محیط حاشیه قاره‌ای فعال یا ماگمای کمان قاره‌ای است و این مقادیر برای سنگ‌های منطقه مطالعاتی به ترتیب با میانگین ۳۱ و ۴۷۷ گویای یک محیط حاشیه قاره‌ای فعال است.

مقادیر Rb/Sr با افزایش مقادیر Sr، ابتدا روند کاهشی و سپس افزایش و تا حدودی خطی نشان می‌دهد (شکل ۵-۱). نمودارهای La/Yb در برابر La، Th، در برابر La، Ti/Yb و Th/Ti در برابر Th (Schiano et al., 2010) نیز نشان دهنده بروز آرایش در هنگام فرایندهای جدایش بلوری در ماگمای منطقه هستند (شکل‌های ۵-۱، ۵-۲، ۵-۳). نسبت Dy/Yb با افزایش مقادیر SiO₂ روند تقریباً کاهشی دارد که بیانگر این موضوع است که جدایش هورنبلند در تکامل ماگمایی در منطقه مطالعاتی موثر بوده است (شکل ۵-۴).

۳-۴- بررسی نمودارهای عنکبوتی

نمونه‌های منطقه مطالعاتی نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) و NMORB (Sun and McDonough, 1989) پهنجار شدند (شکل ۶). شیب منفی در نمودارهای عنکبوتی که نشان‌دهنده غنی‌شدگی عناصر LILE نسبت به عناصر HFSE است، گویای تهی‌شدگی ماگمای سازنده سنگ‌های منطقه از عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) مانند Ti و Yb است و عناصر سنگ‌دوست (لیتوفیل) بزرگ‌یون (LILE) به ویژه Ba و Cs غنی‌شدگی نشان می‌دهند. شکل‌گیری سنگ‌ها در مناطق فرورانش عاملی است که سبب غنی‌شدگی LREE ها می‌شود (Winter, 2001). تهی‌شدگی HREE ها از ویژگی‌های ماگماهای کالک آلکالن است (Tatsumi, 1989). تهی‌شدگی از عناصری مانند Ti و Nb می‌تواند گویای منشا گرفتن ماگمای به وجود آورنده این سنگ‌ها از یک گوشته سست کره‌ای متاسوماتیسم شده در بالای پهنه فرورانش باشد. نمودار به‌جای شده عناصر کمیاب نسبت به کندریت (شکل ۷-۱)، بی‌هنجاری ضعیف Eu و یک الگوی REE لیستری شکل نشان می‌دهد و LREEs نسبت به HREEs غنی‌شدگی نشان می‌دهند. بی‌هنجاری ضعیف در Eu می‌تواند به دلیل عملکرد فرایند تفریق کانی پلاژیوکلاز (Wilson, 2007; Rollinson, 1993;) باشد (Wilson, 2007). می‌توان گفت که عدم بی‌هنجاری شاخص منفی در Eu در سنگ‌های غیردگرسان منطقه، مقدار بالای آب یا فوکاسیته اکسیژن را توضیح می‌دهد (Frey et al., 1978; Richards et al., 2012). اگر بی‌هنجاری Eu با بی‌هنجاری Sr همراه باشد، جدایش بلوری پلاژیوکلاز رخ داده است (Wilson, 2007). بنابراین با توجه به بی‌هنجاری منفی Sr و Eu در سنگ‌های منطقه می‌توان گفت که پلاژیوکلاز فاز پایدار در خاستگاه و یا فاز مهم در هنگام جدایش بلورین و یا هنگام تغییر



شکل ۶- A) نمودار چندعنصری پهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) B) نمودار پهنجار شده عناصر نادر خاکی نسبت به کندریت (Boynton, 1984) در جنوب مامونیه.

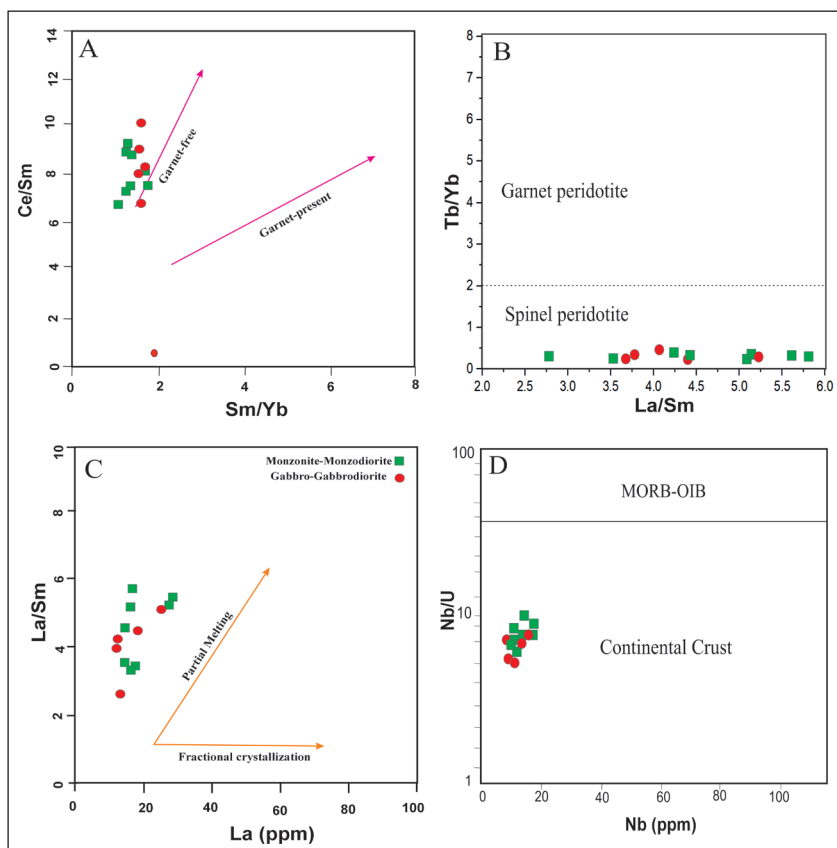
Figure 6- A) Primitive mantle-normalized trace-element spider diagram for intrusive rocks of Mamuniyeh samples. Normalizing values are from Sun and McDonough (1989). B) Chondrite-normalized REE patterns of the Mamuniyeh samples, with chondrite values are from Boynton (1984).

۴- بحث

نفوذی منطقه (۴/۵ تا ۹/۹) می‌توان گفت که تا حدودی وجود گارنت در خاستگاه این سنگ‌ها نیز محتمل است. در نمودار La در برابر La/Sm (Li et al., 2011) نیز نقش کلیدی فرایند ذوب بخشی در پیدایش توده‌های نفوذی در جنوب مامونیه مشخص است (شکل ۷-۷). همچنین در نمودار Nb در برابر می‌توان نقش آرایش پوسته‌ای را در پیدایش ماگمای سازنده را نشان داد (شکل ۷-۷). توده‌های نفوذی جنوب مامونیه در این نمودار در محدوده ترکیب‌های پوسته قاره‌ای، نشان‌دهنده تاثیر ترکیب‌های پوسته‌ای در سیر تحولی ماگمای سازنده این سنگ‌ها است. نسبت Nb/U در پوسته پایینی و بالایی به ترتیب نزدیک به ۲۵ و ۹ است. این نسبت در نفوذی‌های مامونیه از ۵/۳ تا ۱۰ است که می‌تواند بیانگر نقش پوسته بالایی در آرایش ماگمای سازنده این سنگ‌ها باشد. پراکندگی نمونه‌ها و روند تغییرات در نمودارهای هارکر را نیز می‌توان در راستای آرایش پوسته‌ای و دگرسانی دانست.

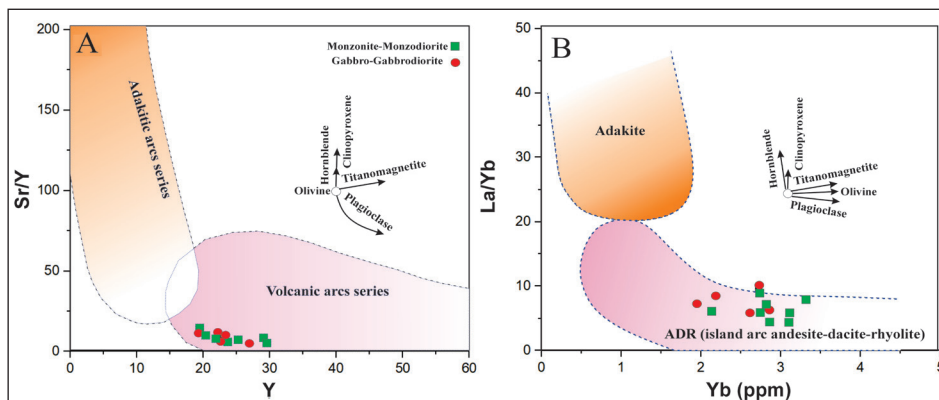
توده‌های نفوذی منطقه بر اساس نمودارهای تفکیک‌کننده سنگ‌های ماگمایی بهنجار از آداکیت‌ها، ویژگی‌های آداکیتی مانند مقادیر بالایی از نسبت‌های Sr/Y و La/Yb را نشان نمی‌دهند و ویژگی‌های کالک‌آلکان و سنگ‌های کمان‌های آتشفشانی مانند مقادیر کم Sr و مقادیر بالای Y و Yb را نشان می‌دهند (شکل ۸).

به منظور تعیین خاستگاه کانی‌شناسی و درجه ذوب بخشی ماگمای منشأ می‌توان از عناصر نادر خاکی بهره برد. عنصر Yb به شدت در گارنت نسبت به کلینوپیروکسن و یا اسپینل سازگار و عنصر La به شدت ناسازگار است (Aldanmaz et al., 2000)، بنابراین از فراوانی عناصر به شدت ناسازگاری مانند La و کمتر ناسازگار Sm به جهت بررسی ترکیب کلی ناحیه منشأ می‌توان استفاده نمود. بر این اساس، نمودار Sm/Yb در برابر Ce/Sm (Hawkesworth et al., 1994)، نشان‌دهنده حضور کم گارنت در خاستگاه ماگمای سازنده توده‌های نفوذی جنوب مامونیه است (شکل ۷-۷). این مسئله با غنی‌شدگی Ce/Sm (میانگین ۸/۱) که نسبت به Sm/Yb (میانگین ۱/۵) بسیار بیشتر است سازگار است، چرا که این مورد هنگامی رخ می‌دهد که گارنت در خاستگاه حضور نداشته باشد، به این معنی که Ce وارد فاز کانیایی شده است. در نمودار La/Sm در برابر Tb/Yb (Wang et al., 2008) نیز بر اساس موقعیت قرارگیری سنگ‌های نفوذی منطقه، ترکیب گوشته منشأ، بیشتر اسپینل لرزولیتی بوده است که می‌تواند از ژرفای حدود ۷۰ کیلومتری و فشاری عادل ۱۸ تا ۲۰ کیلو بار، که محدوده پایداری اسپینل است منشأ گرفته باشد (شکل ۷-۷). از سوی دیگر به باور پترز و همکاران (Peters et al., 2008) با توجه به مقادیر $(La/Yb)_N > 1$ در مذاب‌های رخساره گارنت نسبت به مذاب‌های رخساره اسپینل و مقادیر این نسبت در سنگ‌های



شکل ۷- (A) Sm/Yb در برابر Ce/Sm (Hawkesworth et al., 1994) جهت تعیین وضعیت حضور گارنت در منشأ. (B) نمودار La/Sm در برابر Tb/Yb (Wang et al., 2008). (C) تعیین روند ذوب بخشی در نمودار La در برابر La/Sm (Li et al., 2011) برای تعیین روند ذوب بخشی در نمودار La در برابر Nb/U (Yan and Zhao, 2008).

Figure 7-A) Determination of absence or presence of garnet at source in Sm/Yb vs. Ce/Sm (Hawkesworth et al., 1994); B) La/Sm vs Tb/Yb diagram (Wang et al., 2008); C) La vs. La/Sm diagram (Li et al., 2011) for determination of partial melting process; D) Nb versus Nb/U diagram (Yan and Zhao, 2008).



شکل ۸- نمودارهای تفکیک سنگ‌های ماگمایی بهنجار (نرمال) از آداکیت‌ها. A) نمودار Y در برابر Sr/Y (Defant and Drummond, 1990); B) نمودار Yb در برابر La/Yb (Defant and Drummond, 1990).

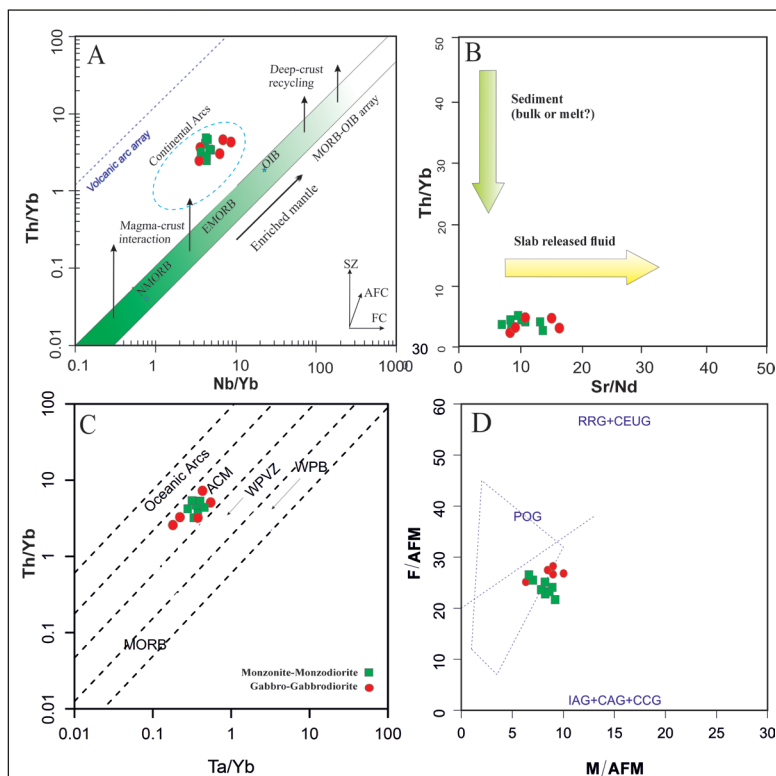
Figure 8. Separation diagrams of normal magmatic rocks from adakites. A) Y vs. Sr/Y diagram (Defant and Drummond, 1990); B) Yb vs. La/Yb diagram (Defant and Drummond, 1990).

(شکل ۹- D). افزایش مقادیر Sr/Nd و میزان تقریباً ثابت نسبت Th/Yb در نمونه‌های منطقه نشان‌دهنده وجود سیال‌های آزادشونده به‌عنوان عامل اصلی دگرنهادشدن گوشته است و نقش فرایندهای ذوب در این بین کم‌رنگ‌تر بوده است. افزون بر این، نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb (Schandl and Gorton, 2002) نیز نشان‌دهنده انطباق کامل توده‌های نفوذی جنوب مامونیه با حاشیه‌های قاره‌ای فعال است (شکل ۹- E). بر پایه مدلی که مانیار و پیکولی (Maniar and Piccoli, 1989) ارائه دادند، بر اساس نسبت $M/AFM: (100 * MgO / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + FeO + MgO))$ در برابر $F/AFM: (100 * FeO / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + FeO + MgO))$ توده‌های نفوذی منطقه جنوب مامونیه در زمره IAG+CAG+CCG قرار می‌گیرند (شکل ۹- F).

برای درک ویژگی‌های محیط پیدایش و تعیین جایگاه زمین‌ساختی، بر اساس نمودار Nb/Yb در برابر Th/Yb (Pearce et al., 1984) استفاده شد. در مناطق فرورانش میزان Th درون ماگما افزایش و Nb کاهش می‌یابد (Leat et al., 2004). بر اساس شکل ۹- A، نمونه‌های منطقه بالاتر از آرایه گوشته‌ای و موازی با گوشته دگرنهادی جای گرفته‌اند که نشان‌دهنده سرشت گوشته غنی شده برای آن‌هاست (Buchs et al., 2013; Rossetti et al., 2017). این نمونه‌ها به سمت آرایه کمان آتشفشانی و یا تخته فرورو در بخش زیرین آرایه MORB-OIB حرکت می‌کنند که گویای متاثر شدن توده‌های نفوذی منطقه از فرایندهای فرورانش و تاثیر حاشیه‌های قاره‌ای فعال است. نمودار Sr/Nd در برابر Th/Yb (Woodhead et al., 1998)، نقش سیال‌های آزاد شده از تیغه فرورونده در ترکیب ماگمای مادر را نشان می‌دهد

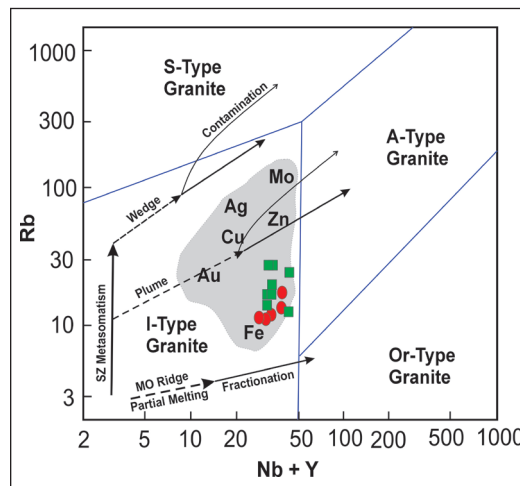
شکل ۹- تعیین خاستگاه زمین‌ساختی سنگ‌های نفوذی جنوب مامونیه. A) نمودار Nb/Yb در برابر Th/Yb (Pearce et al., 1984); B) نمودار Sr/Nd در برابر Th/Yb (Woodhead et al., 1998); C) نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb (Schandl and Gorton, 2002); D) نمودار M/AFM $(100 * MgO / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + FeO + MgO))$ در برابر $F/AFM: (100 * FeO / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + FeO + MgO))$ (Maniar and Piccoli, 1989).

Figure 9. Determining the tectonic origin of intrusive rocks in the south of Mamouniyeh. A) Nb/Yb vs. Th/Yb (Pearce et al., 1984); B) Sr/Nd vs. Th/Yb (Woodhead et al., 1998); C) Ta/Yb vs. Th/Yb (Schandl and Gorton, 2002); D) M/AFM $(100 * MgO / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + FeO + MgO))$ vs. F/AFM $(100 * FeO / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + FeO + MgO))$ plot (Maniar and Piccoli, 1989).



توسط فرایندهای تبلور جزئی، تهی می‌شود. در طول عبور و حضور ماگماها در پوسته ناحیه فرورانش، اغلب با تزریق ماگمای تازه از گوشته مخلوط می‌شوند. این فرایند از طریق تبلور جزئی مانع از تکامل آن‌ها می‌شود و مقادیر بالایی از عناصر سازگار مانند مس را حفظ می‌کند که برای تشکیل ذخایر معدنی مناسب است. برعکس، این امر شانس تجمع عناصر ناسازگار مانند مولیبدن را که معمولاً در انواع مختلف ذخایر معدنی یافت می‌شوند را کاهش می‌دهد (Christiansen and Keith, 1996).

از دیدگاه ارتباط با تشکیل ذخایر معدنی، به نظر می‌رسد ذخایر مس، طلا، سرب، روی و آهن به طور معمول در همراهی با توده‌های نفوذی نوع I تفریق یافته‌نشده هستند (شکل ۱۰). این عناصر در طی تفریق ماگماهای سیلیسی تهی می‌شوند. افزون بر این، افزایش آلودگی پوسته قاره‌ای سبب رقیق شدن غلظت ماگمای این عناصر نیز می‌شود. در نتیجه، بیشترین احتمال گسترش کانسنگ با ماگماهای کمتر تفریق یافته و با آلودگی کمتر با پوسته قاره‌ای است (Christiansen and Keith, 1996). ظاهراً مس



شکل ۱۰- نمودار Rb در برابر Nb+Y در ارتباط با انواع کانی‌سازی و تاثیر فرایندهای مختلف و ترکیبات منشا بر روند عناصر کمیاب (Christiansen and Keith, 1996).

Figure 10. Nb+Y vs. Rb diagram in connection with mineralization types and the effect of different processes and origin compounds on the of rare elements trend (Christiansen and Keith, 1996).

۵- نتیجه گیری

شناسایی جایگاه زمین‌ساختی با استفاده از نسبت عناصر جزئی نشان دهنده این است که نمونه‌های مورد مطالعه در زمره گرانیتوئیدهای کمان آتشفشانی و در محدوده مرز فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند. در طول عبور و حضور ماگما در پوسته ناحیه فرورانش، اغلب با تزریق ماگمای تازه از گوشته مخلوط می‌شوند. این فرایند از طریق تبلور جزئی مانع از تکامل آن‌ها می‌شود و مقادیر بالایی از عناصر سازگار مانند مس را حفظ کرده است که برای تشکیل ذخایر معدنی در این منطقه مناسب است. با در نظر گرفتن کلیه شواهد به نظر می‌رسد که توده‌های نفوذی جنوب مامونیه با ماگماتیسم ناشی از فرورانش پوسته اقیانوسی تتیس جوان به زیر ورقه ایران مرکزی در ارتباط هستند، که این مسئله با کل ماگماتیسم کمان ماگمایی ارومیه - دختر نیز همخوانی دارد. فرایند فرورانش با آزادسازی آب و مواد فرار از سنگ کره فرورو همراه بوده که موجب متاسوماتیسم گوه گوشته‌ای بالایی پهنه بنیوف و ذوب بخشی آن شده است و در نهایت ماگمای حاصل از ذوب بخشی گوه گوشته‌ای متاسوماتیسم شده هنگام عبور و یا توقف در پوسته با مواد پوسته‌ای آلاش یافته است.

سنگ‌های نفوذی برونزد یافته در منطقه جنوب مامونیه و بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر با سن الیگومیوسن دارای ترکیب سنگ‌شناختی گابرودیوریت، دیوریت، مونزونیت و مونزدیوریت با ماهیت کالک آلکالن و از نوع متآلمینوس هستند که توالی‌های آتشفشانی ائوسن منطقه را قطع کرده‌اند. این سنگ‌ها به‌طور عمده از کانی‌های پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن، هورنبلند، فلدسپات پتاسیم و کوارتز تشکیل شده‌اند و مقادیر SiO_2 در آن‌ها از ۵۱/۱ تا ۶۰/۱ متغیر است. غنی‌شدگی از عناصری مانند Pb, K, U, Th و تهی‌شدگی از عناصری مانند Nb, Ti, P, Yb نشان می‌دهد توده‌های نفوذی منطقه منشا گرفته از یک گوشته سست کره‌ای در بالای پهنه فرورانش و یا پوسته تحتانی هستند که تحت تاثیر آلاش با پوسته بالایی قرار گرفته‌اند. به نظر می‌رسد سنگ‌های نفوذی منطقه، از گوشته با ترکیب غالباً اسپینل لرزولیتی هستند که می‌توانند از ژرفای ۶۰-۷۰ کیلومتری و فشاری معادل ۱۸ تا ۲۰ کیلو بار منشا گرفته باشند. مقادیر بالاتر از ۲۸ در نسبت Ba/Nb و مقادیر بالاتر از ۴۵۰ در نسبت Ba/Ta برای این سنگ‌ها بیانگر یک محیط حاشیه قاره‌ای فعال است.

کتابنگاری

- حیدری، س.م.، صفوی، س.، ۱۴۰۲، زمین‌شناسی و کانه‌زایی کانسار مس (طلا- نقره) اپی‌ترمال شمال خاور نارباغی (ساوه)، نشریه زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۱۳، شماره ۴۷، صفحه ۱-۲۵.
<https://doi.org/10.22055/aag.2022.38941.2256>
- حیدری، س.م.، صفوی، س.، اکبرپور، ا.، حسن‌لو، ع.، محقق، ب.، ۱۴۰۱، جایگاه زمین‌شناسی، ساختاری و کانه‌زایی ذخایر گرمابی-ماگمایی مس (± طلا) ناحیه ساوه-رزن، نشریه علوم زمین، دوره ۳۲، شماره ۲، صفحه ۸۹-۱۰۴.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2021.276571.1894>
- دولت‌شاهی، س.، زمانیان، ح.، کریم‌زاده ثمرین، ع.ر.، یانگ، ش.، ۱۳۹۸، سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و جایگاه زمین‌ساختی توده نفوذی همراه با کانسار مس رنگرز (شمال ساوه، بخش میانی کمان ماگمایی ارومیه-دختر). مجله پترولوژی، ۱۰(۲)، ۳۸، ص. ۷۹-۹۸.
 doi: 10.22108/ijp.2019.116329.1131
- رجب‌پور، ش.، ۱۳۹۴، کانی‌شناسی، دگرسانی و ژئوشیمی کانسار مس ولکانیکی کوه پنگ ساوه، بخش میانی پهنه فرورانش ارومیه-دختر، رساله دکتری، دانشگاه شهید بهشتی.
 فصلی، ن.، ۱۳۹۴، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار اپی‌ترمال نارباغی شمالی، شمال شرق ساوه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس. ۲۰۱ ص.
- فضلی، ن.، قادری، م.، لنتز، د.، لی، ح.، ۱۳۹۸، زمین‌شناسی، دگرسانی، کانه‌زایی و ژئوشیمی کانسار اپی‌ترمال نقره-مس نارباغی شمالی، شمال خاور ساوه، فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۱۲، صفحه ۱۳ تا ۲۰.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2018.97142.1246>
- گودرزی، م.، زمانیان، ح.، کلوتزلی، ا.، ۱۴۰۳، الف، الگوی کانی‌زایی مس بر اساس داده‌های کانی‌شناسی، دگرسانی، زمین‌شیمی و میانبارهای سیال در جنوب مامونیه، بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر، ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، شماره ۳۴ دوره ۳، صفحه ۳۵-۶۲.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2024.424348.2122>
- گودرزی، م.، زمانیان، ح.، کلوتزلی، ا.، ۱۴۰۳، زمین‌شیمی، سنگ‌شناسی و جایگاه تکنونوماگمایی گدازه‌های آتشفشانی ائوسن در جنوب مامونیه، کمان ماگمایی ارومیه-دختر، استان مرکزی، ایران. مجله پترولوژی، شماره ۱۵ (۱)، صفحه ۸۵-۱۱۶.
<https://doi.org/10.22108/ijp.2024.139861.1315>
- گودرزی، م.، زمانیان، ح.، کلوتزلی، ا.، لنتز، د.، یوله، م.، ۱۴۰۳، کاربرد شیمی مگنتیت-تیتانومگنتیت در درک فرایندهای کانه‌ساز: بررسی موردی سامانه کانی‌سازی مس مامونیه، کمربند ماگمایی ارومیه-دختر. مجله زمین‌شناسی اقتصادی، در دست چاپ. ۱۱۲۵.
<https://doi.org/10.22067/econg.2025.1125>
- یوسفی، س.، ۱۳۹۶، کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی و الگوی تشکیل کانسار مس زرنده، شمال شرق ساوه، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- یوسفی، س.، علیپور اصل، م.، ۱۳۹۸، کانی‌سازی مس رگه‌ای در منطقه زرنده با تکیه بر مطالعات کانی‌شناسی، ژئوشیمی و میانبارهای سیال، ساوه، استان مرکزی، مجله علوم زمین، شماره ۱۱۱، صفحه ۲۰۳ تا ۲۱۴.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2018.82635.1090>

References

- Aghanabati, A., 1998. Major sedimentary and structural units of Iran (map). *J Geosci* 7: 29-30.
- Ahmazadeh, 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.
- 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(1): 67-95.
- Allen, M.B., and Armstrong, H.A., 2008. Arabia-Eurasia collision and the forcing of mid-Cenozoic global cooling. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 265 (1-2), 52-58.
- Amidi, S.M., Shahrabi, M., and Navai, I., 2004. Geological map of Zaviyeh. *Geol. Surv. Iran NO.* 6160.
- 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. *Int. Geol. Rev.* 1-19.
- 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. *Int. J. Earth Sci.* 112 (5), 1577-1597.
- 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. *Geol. J.* 57(7), 2884-2903.
- Barnes, S. J., Acterberg, E., Makovicky, E., and Li, C., 2001. Proton probe results for partitioning of platinum group elements between mono-sulphide solid solution and sulphide liquid. *South African Journal of Geology*, 104: 337-351.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: P. Henderson (Editor), *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, Amsterdam. pp. 63-114.
- Buchs, D. M., Bagheri, S., Martin, L., Hermann, J., and Arculus, R., 2013. Paleozoic to Triassic Ocean opening and closure preserved in Central Iran: constraints from the geochemistry of meta-igneous rocks of the Anarak area. *Lithos*, 172, 267-287.
- Cai, K.D., Sun, M., Yuan, C., Zhao, G.C., Xiao, W.J., Long, X.P. and Wu, F.Y., 2011. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of peraluminous granites from the Chinese Altai, NW China. *Lithos*, 127(1-2): 261-281.
- Caillat, C., Dehlavi, P., and Martel-Jantin, B., 1978. *Geologie de la region de Saveh (Iran), contribution al etude du volcanisme et du plutonisme tertiaires de la zone de Iran central*, these de Doctorat de Specialities, Grenoble University.
- Chen, Y.X., Song, S.G., Niu, Y.L., and Wei, C.J., 2014. Melting of continental crust during subduction initiation: a case study from the Chaidanuo peraluminous granite in the North Qilian suture zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 132(5): 311-336.

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.006>.
- Christiansen, E.H., and Keith, J.D., 1996. Trace element systematics in silicic magmas: A metallogenic perspective: Geological Association of Canada Short Course Notes Volume 12, Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: 24-26 May 1996, Winnipeg, Manitoba Canada, p. 115-151.
- Collins, W. J., and Richards, S. W., 2008. Geodynamic significance of S-type granites in circum-Pacific orogens. *Geology*, 36(7): 559-562.
- Davidson, J., Turner, S., Handley, H., Macpherson, C., and Dosseto, A., 2007. Amphibole “sponge” in arc crust *Geology* 35: 787–790.
- De La Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., and Marchal, M., 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major element analysis- its relationship with current nomenclature, *Chem Geol.* Vol.29, pp.183-210.
- Defant, M.J., and Drummond, M.S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*. 347: 662- 665.
- 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*, 10(2), 38, pp. 79-98 (In Persian). doi: 10.22108/ijp.2019.116329.1131.
- Dostal, J., Church, B. N., Reynolds, P. H., and Hopkinson, L., 2001. Eocene volcanism in the Buck Creek basin, central British Columbia (Canada): transition from arc to extensional volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(1-3): 149-170.
- Fazli, N., 2015. *Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of the North Narbaghi epithermal deposit, northeast of Saveh, master's thesis, Department of Geology, Tarbiat Modares University. (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). doi: 10.22071/gsj.2018.97142.1246.
- 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.
- Finger, F., Roberts, M.P., Haunschmid, B., Schermaier, A., and Steyrer, H.P., 1997. Variscan granitoids of central Europe: their typology, potential sources and tectonothermal relations. *Mineralogy and Petrology*, 61(2): 67–96.
- Fitton, J.G., James, D., Kempton, P.D., Ormerod, D.S., and Leeman, W.P., 1988. The role of lithospheric mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the western United States. *Journal of Petrology, Special Volume (1)*: 331-349.
- Frey, F.A., Chappell, B.W., and Roy, S.D., 1978. Fractionation of rare-earth elements in the Tuolumne Intrusive Series, Sierra Nevada batholith, California: *Geology*, v. 6, p. 239–242.
- 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.
- 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.
- Goudarzi, M., Zamanian, H., and Klotzli, U., 2024a. *Geochemistry, Petrography, and Tectono-Magmatic Setting of Eocene Volcanic Lavas in the South of Mamouniyeh, Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Markazi Province, Iran*. *Petrological journal*, 15 (1), 85–116. <https://doi.org/10.22108/ijp.2024.139861.1315>. (In Persian).
- Goudarzi, M., Zamanian, H., and Klotzli, U., 2024c. *Copper mineralization pattern based on mineralogy, alteration, geochemistry of intrusive rocks and fluid inclusion in the south of Mamouniyeh, middle part of Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran*. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.424348.2122>. (In Persian).
- Goudarzi, M., Zamanian, H., Klötzli, U., and Ullah, M., 2024b. Evidence of boiling in ore-forming process based on quartz textures and fluid inclusions studies, a case study in Mamouniyeh Cu deposit, Iran, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-8552, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-8552>.
- Goudarzi, M., Zamanian, H., Klötzli, U., Lentz, D., and Ullah, M., 2024d. Genesis of the Mamouniyeh Copper Deposit in the Central Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Iran: Constraints from Geology, Geochemistry, Fluid Inclusions, and H–O–S Isotopes. *Ore Geology. Review*, 175, 106279. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106279>.
- Goudarzi, M., Zamanian, H., Klötzli, U., Lentz, D., and Ullah, M., 2025b. *Constraining Ore-Forming Processes Using Magnetite-Titanomagnetite Chemistry: A Case Study of the Mamouniyeh Cu Mineralization System, Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc*. *Journal of Economic Geology*. <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1125>. (In Persian).
- Goudarzi, M., Zamanian, H., Klötzli, U., Sláma, J., Míková, J., Burda, J., Lantz, D., Ullah, M., and Homnan, J., 2025a. Unraveling the Protracted Magmatic Evolution in the Central Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (Northeast Saveh, Iran): Constraints from Zircon U–Pb Dating, Lu–Hf Isotopes, and Geochemical Signatures. *Minerals*. Under review.

- Green, N.L., 2006. Influence of slab thermal structure on basalt source regions and melting conditions: REE and HFSE constraints from Garibaldi volcanic belt, northern Cascadia subduction system. *Lithos*, 87(1–2): 23–49.
- Harker, A., 1909. The natural history of igneous rocks. Methuen, London. 344p.
- Hawkesworth, C. J., Gallagher, K., Hergt, J. M., and McDermott, F., 1994. Destructive plate margin magmatism: Geochemistry and melt generation. *Lithos*, 33 (1–3), 169-188. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0024-4937(94)90059-0).
- Heidari, S. M., and 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). doi:10.22055/aag.2022.38941.2256.
- Heidari, S. M., Safavy, S., Akbarpour, A., Hassanlou, A., and Mohaghegh, B., 2022. *Geology, structure and mineralization of Cu (\pm Au) hydrothermal-magmatic deposits of Saveh-Razan region, Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, Vol. 32, Issue 2, Serial No. 124. (In Persian). Doi: <https://doi.org/10.22071/gsj.2021.276571.1894>.*
- Honarmand, M., Rashidnejad -Omran, N., Carfu, F., Emami, M. H., and Nabatian, G., 2013. Geochronology and magmatic history of a calc-alkaline plutonic complex in the Urumieh– Dokhtar magmatic belt, central Iran: Zircon ages as evidence for two major plutonic episodes: *Abhandlungen, Neues Jahrbuch für Mineralogie*. 190(1): 67–77.
- Jafari, A., Ao, S., Jamei, S., and Ghasemi, H., 2023. Evolution of the Zagros sector of Neo-Tethys: Tectonic and magmatic events that shaped its rifting, seafloor spreading and subduction history. *Earth-Science Reviews* 241.
- Kamber, B. S., Ewart, A., Collerson, K. D., Bruce, M. C., and McDonald, G. D., 2002. Fluid-Mobile Trace Element Constraints on the Role of Slab Melting and Implications for Archean Crustal Growth Models. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 144: 38-56.
- Kazemi, K., Kananian, A., Xiao, Y., and Sarjoughian, F., 2019. Petrogenesis of Middle-Eocene granitoids and their mafic microgranular enclaves in central Urmia-Dokhtar Magmatic Arc (Iran): evidence for interaction between felsic and mafic magmas. *Geoscience Frontiers*, 10 (2), 705-723. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.006>.
- Keppler, H., 1996. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction zone fluids. *Nature*, 380(6571): 237–240.
- Keshavarzi, R., Bijani, M. H., Esmaeili, D., and Rezaei, M., 2014. Geology, petrography and geochemical of the Selijerd intrusive rocks, northeast Saveh, central Iran. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences* 8(10): 1839-1846.
- Khodaparast, S., Madanipour, S., Nozaem, R., and Hessami, Kh., 2020. Structural evidence on strike slip Kinematic inversion of the Kushk-e Nosrat Fault zone, Central Iran., *Geopersia* 10 (1), 2020, PP. 195-209, DOI: 10.22059/GEOPE.2020.291450.648508.
- Klimm, K., Holtz, F., and King, P.L., 2008. Fractionation vs. magma mixing in the Wangrah suite A-type granites, Lachlan Fold Belt, Australia: experimental constraints. *Lithos* 102, 415–434. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.07.018>.
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American mineralogist*, 68(1-2), 277-279.
- Kuster, D. and Harms, U., 1998. Post-collisional potassic granitoids form the southern and northwestern parts of the late Neoproterozoic East African Orogen: a review. *Lithos*, 45: 177-195.
- Leat, P. T., Pearce, J. A., Barker, P. F., Millar, I. L., Barry, T. L., and Larter, R. D., 2004. Magma genesis and mantle flow at a subducting slab edge: the South Sandwich arc- basin system. *Earth and Planetary Science Letters*, 227: 17- 35.
- Leeman, W. P., and Sisson, V. B., 1996. Geochemistry of boron and its implication for crustal and mantle processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 33(1): 645-707.
- Li, J. X., Qin, K. Zh., Li, G. M., Xiao, B., Chen, L., and Zhao, J. X., 2011. Post-collisional ore bearing adakitic porphyries from Gangdese porphyry copper belt, southern Tibet: Melting of thickened juvenile arc lower crust. *Lithos*, 126, 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.018>.
- Lucci, F., Rossetti, F., White, J.C., Moghadam, H.S., Shirzadi, A., and Nasrabad, M., 2016. Tschermak fractionation in calc-alkaline magmas: the Eocene Sabzevar volcanism (NE Iran). *Arab. J. Geosci.* 9, 573.
- Lustrino, M., Fedele, L., Agostini, S., Prelević, D., and Salari, G., 2019. Leucitites within and around the Mediterranean area. *Lithos* 324-325, 216–233.
- 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.
- Macdonald, R., Hawkesworth, C.J., and Heath, E., 2000. The Lesser Antilles volcanic chain: a study in arc magmatism. *Earth-Science Reviews*, 49(1–4): 1–76.
- Maniar, P. D., and Piccoli, P. M., 1989. Tectonic discrimination of granitoids”, *The Geological Society of America Bulletin*, Vol. 101 (5): 635-643.
- 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.
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth Science. Review*, 37, 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9).

- 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.
- Moghadam, H.S., Griffin, W.L., Santos, J.F., Chen, R.X., Karsli, O., Lucci, F., Sepidbar, F., and O'Reilly, S.Y., 2022a. Geochronology, geochemistry and petrology of the Oligocene magmatism in SE segment of the UDMB, Iran. *Lithos* 416–417, 106644.
- 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., O'Reilly, S.Y., 2022b. Temporal changes in subduction- to collision-related magmatism in the Neotethyan orogen: The Southeast Iran example. *Earth Sci. Rev.* 226, 103930.
- Morley, C.K., Kongwung, B., Julapour, A., Abdolghafourian, M., Hajian, M., Waples, D., Warren, J., Otterdoom, H., Srisuriyon, K., and Kazemi, H., 2009. Structural development of a major late Cenozoic basin and transpressional belt in central Iran: The Central Basin in The Qom– saveh area. *Geosphere*, Volume 5, 4: 325–362. <https://doi.org/10.1130/ges00223.1>.
- Nagudi, N. O., Koberl, C. H., and Kurat, G., 2003. Petrography and geochemistry of the Sing granite, Uganda, and implication for its origin. *Journal of African Earth Sciences*, 35: 51-59.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.23.050195.001343>.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., and Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25: 956-983.
- Peters, T. J., Menzies, M., Thirlwall, M., and Kyle, P. R., 2008. Zuni-Bandera volcanism, RioGrande, USA-Melt formation in garnet and spinel facies mantle straddling the asthenosphere-lithosphere boundary. *Lithos*, 102(1-2), 295-315.
- 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.
- Raiesi, 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, constrains on geochronology and geochemistry. *Ore Geol. Rev.* 132, 103997.
- Rajabpour, S., 2015. *Mineralogy, alteration and geochemistry of the volcanic copper deposit of Kohe-Peng Saveh, the middle part of the Urumieh-Dokhtar subduction zone, PhD thesis, Department of Geology, Shahid Beheshti University. (In Persian)*.
- Rajabpour, Sh., Behzadi, M., Jiang, Sh-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 (2017) 563–583.
- 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.
- Rezaei-Kahkhaei, M., Galindo, C., Pankhurst, R.J., and Esmaily, D., 2011. Magmatic differentiation in the calc-alkaline Khalkhab–Neshveh pluton, Central Iran: *J. Asian Earth Sci.* 42, 499–514.
- Richards, J. P., and Sholeh, A., 2016. The Tethyan Tectonic History and Cu-Au Metallogeny of Iran. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 19, 193-212.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A., and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential; examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Econ. Geol.* 107, 295–332.
- Rollinson, H., 1993. *Rising geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman John Wiley and Sons, New York, 352 p.
- Ross, P.S., and Bédard, L.P., 2009. Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams. *Can J Earth Sci* 46: 823-839 doi: 10.1139/E09054.
- Rossetti, F., Monié, P., Nasrabad, M., Theye T., Lucci, F., and Saadat, M., 2017. Early Carboniferous subduction- zone metamorphism preserved within the Palaeo- Tethyan Rasht ophiolites (western Alborz, Iran). *Journal of the Geological Society*, 174, 741–758. <https://doi.org/10.1144/jgs2016-130>.
- Rossetti, F., Nozaem R., Lucci F., Vignaroli G., Gerdes A., Nasrabad, M., and Theye T., 2014. Tectonic setting and geochronology of the Cadomian (Ediacaran-Cambrian) magmatism in Central Iran, Kuh-e-Sarhangi region (NW Lut Block), *Journal of Asian Earth Sciences*, v.102, p. 24–44.

- Salari, G., Lustrino, M., Ghorbani, M.R., Agostini, S., and Fedele, 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.
- 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.
- Schiano, P., Monzier, M., Eissen, J. P., Martin, H., and Koga, K. T., 2010. Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 160, 297–312.
- Shafiei, B., Haschke, M., and Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44(3): 265–283.
- Shand, S. J., 1943. *Eruptive rocks. Their genesis, composition, classification and their relation to deposits.* Thomas Murby and Company, London.
- Shang, G. K., Satir, M., Sieble, 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.
- Srivastava, R. K., and Singh, R. K., 2004. Trace element geochemistry and genesis of Precambrian sub-alkaline mafic dikes from the central Indian craton evidence for mantle metasomatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 373-389.
- Stepanov, A., Mavrogenes, J.A., Meffre, S., and Davidson, P., 2014. The key role of mica during igneous concentration of tantalum. *Contrib. Miner. Petrol.* 167, 1009. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-1009-3>.
- Stern, R.J., Moghadam, H.S., Pirouz, M., and Mooney, W., 2021. The Geodynamic Evolution of Iran. *Annual Rev. Earth Planet. Sci. Lett.* 49, 9–36. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071620-052109>.
- 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.
- Sylvester, P. J., 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos* 45: 29–44.
- Tatsumi, Y., 1989. Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones. *Journal of Geophysical Research*, 94(B4): 4697-4707.
- Ulmer, P., 2001. Partial melting in the mantle wedge the role of H₂O in the genesis of mantle derived “arc-related” magmas. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 127(1-4), 215-232.
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Hassanzadeh, J., and Guest, B., 2011. A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics* 30, 3008–3302.
- 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.
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J., Dong, Y., Vasconcelos, P.M., Pearson, N., Wan, Y., Dong, H., Li, C., Yu, Y., Zhu, T., Feng, X., Zhang, Q., Zi, F., and Chu, Z., 2008. Eocene melting of subducting continental crust and early uplifting of central Tibet: evidence from central-western Qiangtang high-K calc-alkaline andesites, dacites and rhyolites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 272, 158–171.
- Wilson, M., 2007. *Igneous Petrogenesis.* Chapman & Hall, London. 411p.
- Winter, J. D., 2001. *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology.* Prentice-Hall Inc, p. 796.
- Woodhead, J., Eggins, S., and Johnson, R., 1998. Magma genesis in the New Britain island arc: Further insights into melting and mass transfer processes. *Journal of Petrology*, 39(9), 1641–1668.
- Wu, F., Jahn, B., Wildec, S. A., Lod, C. H., Yuie, T. F., Lina, Q., Gea, 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.
- Yan, J., and Xin Zhao, J., 2008. Cenozoic alkali basalts from Jingpohu, NE China: The role of lithosphere–asthenosphere interaction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(1-2), 106 –121.
- Yousefi, S., 2017. *Mineralogy, alteration, geochemistry and formation pattern of Zarandiyeh copper deposit, northeast of Saveh, master’s thesis, Department of Geology, Shahrood University of Technology. (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). doi: 10.22071/gsj.2018.82635.1090.
- 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*, Volume 128, January 2021, 103877.